

Тезисы докладов
международной конференции

ФИЗИКА.СПБ

19–23 октября 2020 года

Физика.СПб: тезисы докладов международной конференции 19–23 октября 2020 г.
— СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020

Организатор

ФТИ им. А. Ф. Иоффе

При поддержке

ООО «ИННО-МИР»

Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 20-02-22042)

Программный комитет

Аверкиев Никита Сергеевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — председатель

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — заместитель председателя

Арсеев Петр Иварович (ФИАН)

Варшалович Дмитрий Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Воробьев Леонид Евгеньевич (СПбПУ)

Гавриленко Владимир Изяславович (ИФМ)

Дьяконов Михаил Игоревич (Université Montpellier II, France)

Иванчик Александр Владимирович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Калашникова Александра Михайловна (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Карачинский Леонид Яковлевич (ООО «Коннектор Оптикс»)

Конников Семен Григорьевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Кучинский Владимир Ильич (СПбГЭТУ, ФТИ им. Иоффе)

Новожилов Виктор Юрьевич (СПбГУ)

Пихтин Никита Александрович (ООО «Эльфолюм», ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Рудь Василий Юрьевич (СПбПУ)

Степина Наталья Петровна (ИФП им. А. В. Ржанова)

Сурис Роберт Арнольдович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Нестоклон Михаил Олегович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Устинов Виктор Михайлович (НТЦ микроэлектроники РАН)

Организационный комитет

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) — председатель

Поняев Сергей Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — зам. председателя

Азбель Александр Юльевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Дюделев Владислав Викторович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Когновицкая Елена Андреевна (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)

Лосев Сергей Николаевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Петров Павел Вячеславович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Рябочкина Полина Анатольевна (МГУ им. Н. П. Огарёва)

Серин Артем Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Черотченко Евгения Дмитриевна (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Международная конференция 2020 года продолжает традицию Итоговых семинаров по физике и астрономии по результатам конкурсов грантов для молодых ученых, проводившихся в Санкт-Петербурге с середины 90-х.

Изучение моделей космической селенофизики с использованием многопараметрического анализа и фрактальной геометрии

Чуркин К. О.¹, Андреев А.О.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Демина Н.Ю.¹

¹КФУ

e-mail: kchurkin87@gmail.com

Данная работа посвящена созданию метода анализа планетофизических моделей для оценки их достоверности и подобия. В настоящее время разработаны высокоточные динамические теории небесных тел, космические альтиметрические измерения проводятся с точностью до миллисекунды, но, тем не менее, построение и анализ планетофизических моделей остается сложной и не решенной в полном объеме задачей. Это также относится к исследованиям в области селенодезии, поскольку физическая поверхность Луны и ее связь с небесной системой координат являются многопараметрическими нелинейными системами. Соответственно, для анализа таких систем необходимо использовать методы статистической физики и фрактальной геометрии [1]. На основе этих методов можно изучить подобие и структуру элементов модели, проводить анализ динамических параметров в различных фазовых пространствах. Классические методы сравнения различных топографических систем требуют большого количества вычислений и измерений, а поскольку физический рельеф имеет нелинейную структуру, использование классических подходов для его анализа практически невозможно. Поэтому задача разработки новых методов для редукции и изучения селенодезических нелинейных моделей является современной и актуальной [2]. Необходимо также отметить, что при создании различных структурных моделей селенографической физической поверхности используются различные наблюдения и методы, таким образом, возникает необходимость оценивать в таких системах надежность и достоверность представленных в них данных. В настоящей работе с использованием многопараметрического гармонического анализа и разложения альтиметрических данных по сферическим функциям, было выполнено построение моделей физической поверхности Луны, и для них проведено сравнение подобия выбранных локальных областей сложных лунных структур. Альтиметрические данные для построения моделей были получены с бортов окололунных космических аппаратов «Clementine», «Kaguya», «LRO», «Зонд». Построенные цифровые модели имеют координатные параметры радиус-векторов точек поверхности согласно проведенным космическим измерениям. Следует также отметить, что из-за того, что при создании моделей использовались данные различных космических миссий, исследуемые модели имеют и различные системы координат [3], это касается также положения центра отсчета координатных данных [4]. Усредненная фрактальная размерность селеноцентрических моделей оказалась равной $d = 1,345$. Параметры подобия и различия локальных областей для построенных в

настоящей работе моделей определялись авторским методом с использованием коэффициентов фрактального подобия. Анализ макроповерхностей на основе многопараметрического и фрактального анализа для созданных в работе селеноцентрических моделей ранее в мировой практике не проводился. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 18-32-00895 мол_a.

Список литературы

1. Gulick D., Scott J., *The Beauty of Fractals*, Published and Distributed by the Mathematical Association of America, 1-106, (2010);
2. Turcotte D.L., A fractal interpretation of topography and geoid spectra on the Earth, Moon, Venus, and Mars, *Journal of Geophysical Research*, V. 92, Issue B4, 597-601, (1987)
3. Konopliv A.S. The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission / A. S. Konopliv, R. Park, D.-N. Yuan et al. // *J. Geophys. Res. Planets*. – 2013. – Vol. 118, № 7. – P. 1415-1434.
4. Nefedyev Y.A. Analysis of data of “Clementine” and “KAGUYA” missions and “ULCN” and “KSC-1162” catalogues / Y. A. Nefedyev, S. G. Valeev, R. R. Mikeev, A.O. Andreev // *Adv. Space Res.* – 2012. – Vol. 50, № 11. – P. 1564-1569.

Номер проекта РФФИ: 18-32-00895 мол_a

Создание теоретической имитационной модели орбитальной привязки оптических наблюдений лунных объектов, выполненных с борта космического окололунного спутника, к селеноцентрической системе координат

Андреев А. О.¹, Нефедьев Л.А.¹, Демина Н.Ю.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Гудец Р.², Багров А.В.³, Петрова Н.К.¹, Загидуллин А.А.¹

¹КФУ

²Чешский технический университет

³Институт астрономии РАН (ИНАСАН)

e-mail: alexey-andreev93@mail.ru

Настоящая работа направлена на создание селеноцентрического каталога положений лунных объектов (SCLO) и разработку теоретической имитационной модели орбитальной привязки оптических наблюдений лунных объектов с борта космического окололунного спутника к селеноцентрической системе координат, которая задается SCLO. Основой многопараметрической и высокоточной имитационной цифровой модели являются данные, полученные современными космическими лунными миссиями. Несмотря на современные спутниковые высокоточные альтиметрические и гравитационные наблюдения задачи по селеноцентрической привязки спутниковых измерений до сих пор не решены в полном объеме. Это следует из того факта, что спутниковые миссии выполнены к квазидинамической системе координат, так как космические аппараты имели в основном орбитальную привязку [1, 2]. Для решения задач нашего исследования получены следующие новые результаты: а) с использованием робастного моделирования проведено исследование достоверности координатных данных у современных систем координатно-

временного обеспечения для лунных объектов; b) разработан алгоритм и создан программный комплекс трансформации селенографических координат (TSC); c) проведено тестирование программного комплекса TSC для работы с навигационными данными и нахождения планетофизических параметров; d) разработан метод адаптивного регрессионного моделирования (ARM) для трансформации систем координат и оценивании структур и параметров селеноцентрической системы (SS); e) для работ по расширению и оценке опорной селеноцентрической системы разработан алгоритм многопараметрической идентификации SS, основанный на ARM-методе; f) на основе данных оптических наблюдений, полученных спутниковыми лунными миссиями «Clementine», «Kaguya», «LRO» и «Apollo» [3], была построена глобальная динамическая селеноцентрическая система; g) в итоге разработана имитационная цифровая модель орбитальной привязки оптических наблюдений лунных объектов, выполненных с применением звездных датчиков окололунного спутника и бортового лазерного интерферометра, к селеноцентрической системе координат. С использованием адаптивного регрессионного анализа проведена оценка полученных в работе данных. Точность координатной привязки наблюдаемого объекта на лунной поверхности в плановых координатах равна ± 40 метров, точность радиус-вектора ± 80 метров. В настоящее время расчетный посадочный на Луну эллипс равен 9×13 км. Поэтому использование теоретической имитационной цифровой модели орбитальной привязки оптических наблюдений лунных объектов позволит уменьшить размеры посадочного эллипса на несколько порядков. Полученные результаты будут использоваться для определения селенографических параметров для лунных баз и для подготовки и осуществления лунных космических миссий. Создание стационарных лунных баз является перспективной задачей не только для роботизированного освоения Луны, но также как стартовая площадка для подготовки пилотируемых полетов на Марс [4]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Williams J., Konopliv A. S., and Boggs D. H., et al. Lunar interior properties from the GRAIL mission// J. Geophys. Res. Planets 119, 2014, pp. 1546-1578.
2. Konopliv A., Park R., Yuan D.-N., Asmar S., et al. The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission// J. Geophys. Res. Planets, 2013, 118, pp. 1415-1434.
3. Nefedyev, Y., Valeev, S., Mikeev, R., Varaksina, N., Andreev, A. Analysis of data of «Clementine» and «Kaguya» missions and «ULCN» and "KSC-1162" catalogues // Advanced in Space Research.- 2012.- №50, P. 1564 – 1569.
4. Archinal, B., Rosiek, M., & Redding, B., Unified Lunar Control Network 2005 and Topographic Model// Lunar Planetary Sci., XXXVI, Lunar and Planetary Institute. Houston, 2005, abstract no. 2106.

Исследование околоземных объектов и метеорных потоков

Сергиенко М. В.¹, Соколова М.Г.¹, Андреев А.О.¹, Нefeldьев Ю.А.¹,

¹КФУ

e-mail: star1955@mail.ru

В работе исследованы физические параметры околоземных объектов (near Earth objects NEO), то есть малых небесных тел, пересекающих орбиту Земли. Эти объекты имеют вытянутые эллиптические орбиты (highly elliptical orbit НEO) с расстояниями в перигее меньше 1,3 а.е [1]. В первую очередь изучение NEO, которых обнаружено более 15000, важно с точки зрения астероидной безопасности. Основная масса околоземных объектов образовалась в главном поясе малых планет [2] и они являются в основном железными или каменными, но могут быть и ядрами комет, которые под действием солнечного излучения потеряли ледяную составляющую и стали глинистыми телами. В результате анализа 14800 околоземных астероидов, входящих в группы Atira, Apollo, Athen, Amor, в настоящей работе определены генетически близкие к существующим метеорным потокам околоземные объекты. Для метеорного потока k-Cygnids по орбитальным параметрам наиболее близки 2002LV и 2001MG1, (Apollo group), 2012QH49, 2002GJ8 и 2010QA5 (Amor group). Для метеорного потока d-Cancrids по орбитальным параметрам наиболее близки 2014RS17, 2212 Hephaistos 1978SB, 2011SR12, 1991AQ, 2015PC, 2006BF56. (Apollo group). Для метеорного потока d-Cancrids по орбитальным параметрам наиболее близки 2006BF56, 2003RW11, 2014RS17, 2001YB5, 1991AQ. Для метеорного потока Virginids по орбитальным параметрам наиболее близки 2008VL14, 2006UF17, 2010VF. При анализе использовался метод D-критерия [3]. Изучение генетических связей метеорных потоков и околоземных объектов позволяет уточнять физические, химические и динамические параметры NEO для оценки вероятности их падения на Землю и создания систем защиты от таких объектов [4]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 18-32-00895 mol_a.

Список литературы

1. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I., Near-earth objects in the Taurid complex// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 386 (3), pp. 1436–1442, (2008);
2. Jenniskens P., Mostly dormant comets and their disintegration into meteoroid streams: a review// Earth Moon Planet, 102 (1–4), pp. 505–520, (2008);
3. Kholshchevnikov, K. V. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin// Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 462, Issue 2, pp. 2275 – 2283, (2016).
4. Sokolova M., Sergienko M., Nefedyev Y., Andreev A., Nefedyev L., Genetic analysis of parameters of near earth asteroids for determining parent bodies of meteoroid streams// Advances in Space Research, Vol. 62, Issue 8, pp. 2355-2363, (2018).

Анализ аналитических и численных динамических лунных эфемерид

Загидуллин А. А.¹, Усанин В.С.¹, Петрова Н.К.², Андреев А.О.¹, Нefeldьев Ю.А.¹

¹КФУ

²КГЭУ

e-mail: arhtur.zagidullin@yandex.ru

Настоящая работа посвящена анализу либрационной динамики естественных спутников планет. Для изучения таких процессов необходимо использовать методы исследования сложных систем, так как необходимо учитывать возмущения близлежащих небесных тел на спин-орбитальное движение естественного спутника. Это в полной мере относится и к вращению Луны вокруг оси. Построение современных теорий физической либрации Луны (ФЛЛ) основано на гравиметрических, сейсмических, спутниковых наблюдениях и лунной лазерной локации, что в свою очередь позволило повысить точность на несколько порядков относительно теорий ФЛЛ конца XX века. Одними из самых точных на сегодняшний день являются эфемериды DE (Jet Propulsion Laboratory Development Ephemeris), созданные в лаборатории JPL NASA [1]. Эфемериды DE основаны на коэффициентах полинома Чебышева, полученных путем интегрирования уравнений движения тел Солнечной системы, при этом физическая либрация Луны, а также нутация Земли учитываются в процессе интегрирования [2]. Для получения параметров ФЛЛ из эфемерид DE необходимо использовать сложный алгоритм определения необходимых данных [3]. На основе применения планетных эфемерид можно учитывать тонкие эффекты в лунной вращательной динамике и выполнять точную редукцию современных спутниковых и наземных наблюдений. С целью дальнейшего развития теории либрации в настоящей работе был выполнен сравнительный анализ авторской полуэмперической теории ФЛЛ с данными, полученными из планетных эфемерид. При этом, в стандартной системе координат определены либрационные углы в зависимости от временной шкалы. Рассмотрена возможность применения полученных в настоящей работе результатов: 1) при построении гамилтониана и соответствующих дифференциальных уравнений с учетом введения дополнительных потенциалов, учитывающих вязкоупругие свойства лунного тела и его двухслойную структуру, 2) для приведения уравнений вращения Луны в форму, адаптированную к высокоточному числовому интегрированию, обеспечивающему точность решения 0,1 миллисекунды на временном интервале 3 года и более. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50108\19 мол_нр.

Список литературы

1. Williams J.G., Boggs D.H., and Folkner W.M., DE430 Lunar Orbit, Physical Librations and Surface Coordinates// Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum IOM 335-JW,DB,WF-20130722-016 pp.1-19, (2013);
2. Williams J.G. and Boggs D.H. Tides on the Moon: Theory and determination of dissipation// Journal of Geophysical Research E: Planets Vol. 120 Issue 4 pp. 689-724, (2015);
3. Petrova N., Zagidullin A., Nefedyev Y., Kosulin V., Andreev A., The analytical and numerical approaches to the theory of the Moon's librations: Modern analysis and results// Advances in Space Research, 60, pp. 2303–2313, (2017).

Исследование эффектов синхронизации во взаимной динамике ежедневных чисел Вольфа и корональных выбросов солнечной массы

Демин С.А.¹, Панищев О.Ю.¹, Тимашев С.Ф.²

¹КФУ

²НИФХИ им. Л.Я.Карпова

e-mail: serge_demin@mail.ru

На Международной конференции «Физика.СПб/2019», проводимой на базе ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург, Россия), нами были представлены результаты анализа эффектов нестационарности, выявляемых в динамике солнечной активности [1]. В рамках фликкер-шумовой спектроскопии проводилось исследование цюрихского ряда ежедневных чисел Вольфа. Обзор современной литературы позволил установить тот факт, что изучение самоорганизации намагниченной плазмы и формирование устойчивых магнитных солнечных структур являются сложными задачами современной астрофизики, решение которых должно включать учёт эффектов синхронизации, выявляемых в динамике различных показателей солнечной активности. В настоящей работе мы проводим анализ перекрестных корреляций в динамике цюрихского ряда [2] и ежедневных значений суммарной энергии, излучаемой короной Солнца на длине волны 330.3 нм (данные, регистрируемые на пике Ломники в Словакии) [3, 4].

В эволюции термодинамически открытых сложных систем (например, Солнца) наряду с «неспецифической» корреляционной динамикой в последовательностях информационно значащих нерегулярностей, как правило, проявляются относительно низкочастотные резонансные частоты, совокупность которых может перестраиваться. Особенностью фликкер-шумовой спектроскопии [5, 6], отличающей её от других методов анализа временных сигналов, является введение информационных параметров, характеризующих динамику солнечной активности в разных диапазонах частот. Нерегулярности-скачки, как проявление менее высокочастотных областей частот и нерегулярности-всплески – более кратковременных резких изменений динамической переменной, описываются с помощью спектров мощности и разностных моментов второго порядка. В рамках ФШС удаётся последовательно разделить вклады резонансных и хаотических составляющих с параметризацией исследуемых сигналов. Кроме того, применение фликкер-шумовой спектроскопии позволяет выявить информацию о динамике корреляционных связей между одновременно фиксируемыми сигналами – динамическими переменными, измеряемыми в пространственно разнесенных точках исследуемой системы, или сигналами разной природы. В частности, трехмерные представления (3D отображения) кросс-корреляторов, а также их плоские сечения, построенные для минимумов и максимумов, а также временных интервалов между экстремумами солнечной активности, позволили установить периодические закономерности эволюции Солнца.

Ранее Цзоу и др. [7] из анализа корреляций положительной энтропии солнечных филаментов по отношению к солнечному динамо и динамике солнечных пятен определили что, корональная активность высоких слоев Солнца, описываемая числами солнечных филаментов, является хаотичной и имеет очень сложное поведение, но связь между филаментами и солнечными пятнами установлена не была. Тем не менее, согласно результатам настоящего исследования, можно обнаружить корреляционные зависимости между числами Вольфа и выбросами солнечной энергии. Отмечено, что ключевая роль в причинно-следственных связях рассматриваемых сигналов (цюрихский ряд и суммарная энергия

солнечной короны на определенной длине волны) принадлежит числам Вольфа. Таким образом, сложные по своей природе процессы, определяющие механизмы выброса солнечной энергии: эволюция чисел Вольфа, которая основана на образовании солнечных пятен в результате неустойчивости магнитного давления, крупномасштабное магнитное поле в конвективной зоне, которое подвержено сильной турбулентной диффузии, корональные выбросы массы и солнечные вспышки, должны анализироваться как единый многопараметрический корреляционный процесс.

Благодарности. Отдельные результаты настоящего исследования были получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 15-02-01638 а, 16-02-00496 а. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Список литературы

1. Demin S.A., Panishev O.Y., Latypov R.R., Timashev S.F., FNS-parameterization of non-stationarity effects in the solar activity dynamics, *Journal of Physics: Conference Series*, V. 1400, No. 2, art. no. 022020, 2019.
2. Solar Influences Data Analysis Center (SIDC). <http://sidc.oma.be/sunspot-data/dailyssn.php>.
3. Rušin V., Rybanský M., The green corona and magnetic fields, *Solar Physics*, V. 207, 47-61, 2002.
4. Rušin V., Rybanský M., Minarovjeh M., The 530.3 nm corona irradiance from 1939 to 2001, *Advances in Space Research*, V. 34, 251-255, 2004.
5. Тимашев С.Ф., Фликкер-шумовая спектроскопия: Информация в хаотических сигналах, М.: Физматлит, 2007, 248 с.
6. Timashev S.F., Polyakov Yu.S., Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry, *Fluctuation and Noise Letters*, V. 7, No. 2, R15-R47, 2007.
7. Zou P., Li Q.X., Wu N., Non-linear analysis of the long-term behaviour of solar filaments, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V. 437, 38-45, 2014.

Номер проекта РФФИ: 15-02-01638 а, 16-02-00496 а

Анализ наблюдений лазерной локации Луны с использованием аддитивного регрессионного моделирования

Демина Н. Ю.¹, Андреев А.О.¹, Нефедьев Ю.А.¹, Багров А.В.², Гудец Р.³

¹КФУ

²Институт астрономии РАН (ИНАСАН)

³Чешский технический университет

e-mail: vnu_357@mail.ru

Работа посвящена анализу наблюдений лазерной локации Луны (LLR). Кроме решения задач по созданию точных теорий динамики и кинематики Луны с использованием LLR, также могут быть рассмотрены вопросы современной астрофизики и гравитационной физики: создание новых гравитационных эволюционных теорий, проблемы общей теории относительности и космологии, поисковые исследования новой физики за пределами стандартной модели и динамических эффектов темной материи. Однако, решение

таких задач требует и повышение точности как самих наблюдений LLR, так и методов их обработки. Одной из наиболее важных вычислительных процедур при обработке наблюдений является этап определения (оценки) параметров моделей, используемых в астрофизике [1]. При описании процессов или явлений наряду с проблемой выбора формальной (аппроксимирующей) или геометрической (причинно-следственной) модели возникает также важная задача определения правильности математической обработки, когда выборка принятых данных для редукции и используемые методы прикладной математической статистики не будут противоречить требованиям к точности и достоверности полученных данных [2]. К сожалению, традиционный подход к оценке параметров при обработке астрофизических наблюдений, при котором используются жестко фиксированные модель и метод наименьших квадратов (MLS), не соответствует современным требованиям практики и методологии, основанной на компьютерном регрессионном моделировании [3, 4]. В настоящей работе был создан специальный автоматизированный комплекс для аддитивного регрессионного моделирования, который позволяет проверять соответствие предположениям между параметрами регрессионного анализа и оценки методом наименьших квадратов и выполнять адаптацию в случае нарушений. Разработан метод совместного решения оценки методом наименьших квадратов для случая нарушения линейности распределения ошибок и отсутствия мультиколлинеарности. Это позволило повысить точность оценки параметров модели и прогноза при наличии выбросов и мультиколлинеарности с использованием метода учета гребневой регрессии. Исходя из поставленных целей, были решены три задачи: 1) разработан алгоритм синтеза метода устойчивой оценки гребня, адаптированный совместно к отмеченным возмущениям; 2) выполнена программная реализация нового метода; 3) проведена редукция наблюдений лазерной локации Луны. В результате при анализе качества построенной модели по внешнему методу Сигма-Дельта стабильная регрессия гребня обеспечила высокую точность прогнозирования. Таким образом, на основе аддитивного моделирования получены оценки стандартных ошибок аппроксимации, коэффициенты множественной корреляции, значения регрессии гребня, помехоустойчивые оценки искомых параметров с использованием функции Хьюбера, параметры множественной регрессии. Основным выводом по совокупности выполненных исследований состоит в том, что точности оценки параметров модели и прогноза регрессионной модели LLR наблюдений при наличии выбросов и мультиколлинеарности с использованием оценок регрессии гребня имеют разные значения при использовании различных подходов. Наиболее перспективными подходами для оценивания и прогнозирования динамики искомых параметров оказалось применение помехоустойчивого метода Хьюбера и метода численной устойчивости и регрессии гребня. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-90024 Аспирант.

Список литературы

1. Valeev S.G., Regression modeling at data processing, Kazan: FAN, 1-296, (2001);
2. Friedman J.H. and Stuetzle W., Projection Pursuit Regression, Journal of the American Statistical Association, 76, 817–823, (1981);
3. Cheng M.-Y. and Fan J., Peter Hall's contributions to nonparametric function estimation and modeling, Annals of Statistics, Vol. 44/ Issue 5, 1837-1853, (2016);
4. Yuan M., On the identifiability of additive index models, Statistica Sinica, Vol. 21/ Issue 4, 1901-1911, (2011).

Разработка метода проективных метрик для анализа звездных положений

Костина Е. Ю.¹, Андреев А.О.^{1,2}

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

²КФУ

e-mail: kostina_elena_1955@mail.ru

Основная цель миссии Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (GAIA) [1], продолжателя проекта Hipparcos и системы Hipparcos Celestial Reference Frame (HCRF) [2], создание точной карты распределения звёзд в Галактике Млечный Путь. Система сканирования GAIA позволяет получать положения звезд с точностью 10 mas [3]. Однако, при этом, проблема определения собственных движений звезд в полном объеме остается не решенной задачей [4]. Настоящая работа сфокусирована на использовании методов проективных метрик [5, 6] для определения звездных положений и собственных движений, полученных на основе позиционных наблюдений. Новизна метода заключается в том, что данный метод позволяет осуществлять анализ изображений множественных систем опорных звездных положений, имеющих независимые друг от друга собственные движения. Применение данного аппарата проективной геометрии может иметь широкое применение для исследования многопараметрических динамических координатных систем и построения моделей рассматриваемых кластеров [7]. В настоящей работе описанный метод был использован для анализа изображений звездных кластеров. При выполнении вычислительных процедур считалось, что измеренные координаты звезд предварительно очищены от нелинейных искажающих факторов. Определение собственных движений звезд имеет важное практическое значение, поскольку инерциальная система координат опирается на каталоги звездных положений и необходимо знать смещение звездных реперов во времени. В практической части работы выполнено макетное моделирование использования предлагаемого метода для определения собственных движений звезд. При этом предполагается, что при масштабе макетных изображений 90"/мм собственные движения по модулю не превышают значения 0,050" за временной период 50 лет. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Prusti T., et al. 2016 The Gaia mission// *Astronomy & Astrophysics* 595, A1 1-36.
2. Malkin Z. 2016 Using radio stars to link the Gaia and VLBI reference frames// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 2 1937–1942.
3. Brown A. G. A., et al. 2018 Gaia Data Release 2// *Astronomy & Astrophysics* 616, A1 1-22.
4. Zacharias N., Finch C., and Frouard J. 2017 UCAC5: New Proper Motions Using Gaia DR1// *The Astronomical Journal*, 153:166 1-9.
5. Guo R., Shi X. and Wang Z. 2019 Super-resolution from unregistered aliased astronomical images// *Journal of Electronic Imaging* 28(2) 023032.
6. Lynchenko A., Sheshkus A., and Arlazarov V. 2018 Document image recognition algorithm based on similarity metric robust to projective distortions for mobile devices// *Proc. SPIE 11041 Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018)* 110411K.
7. Struve H., Struve R. 2010 Non-euclidean geometries: the Cayley-Klein approach// *Journal of Geometry* 98 151–170.

Анализ магнитогидродинамической солнечной активности с использованием адаптивного регрессионного моделирования

Шарафутдинова А. А.¹, Андреев А.О.², Нефедьев Ю.А.¹

¹КФУ

²МГУ им. М.В.Ломоносова

e-mail: sharafutdinova_270796@mail.ru

Целью данной работы является анализ магнитогидродинамической (MGD) [1] солнечной активности на основе моделирования и прогнозирования динамики чисел Вольфа. В данном исследовании используется метод адаптивного регрессионного моделирования, реализованного в программном комплексе ARDM. Предварительные данные были изучены с помощью фрактального анализа на наличие стабильности динамического тренда. В настоящее время эксперты в области физики Солнца указывают на влияние солнечной активности на многие происходящие в природе процессы. Солнечная активность характеризуется количеством пятен на его поверхности. Вариации солнечной активности являются циклическими и имеют минимумы и максимумы. Таким образом, эффекты влияния MGD разные. С помощью программного пакета ASPRM моделируется и строится прогноз MGD. В качестве исходных наблюдательных данных (чисел Вольфа) были взяты два временных ряда за период между 2000 и 2011 гг. (усредненные ежемесячно 124 наблюдения), и числа Вольфа за тот же период, усредненные еженедельно (484 наблюдения). В результате было подтверждено, что основным механизмом солнечного цикла является гидромагнитное динамо, работающее в конвективной зоне [2]. Наличие магнитного поля в конвективной зоне означает наличие его и во внутренней зоне лучистого равновесия. Учитывая тот факт, что Солнце образовалось в результате сжатия газопылевого облака, содержащего магнитное поле, считается, что в зоне радиационного равновесия может существовать некоторое остаточное магнитное поле космогонического происхождения, независимое от динамо. В этом отношении дифференциальное вращение радиационной зоны может быть нестационарным переходным явлением, связанным с внутренним распределением возмущений в конвективной зоне из-за магнитного напряжения [3]. Таким образом, формирование солнечного динамического магнитного поля основано на эволюции мелкомасштабной магнитной спиральности и сложной нелинейной структуры [4]. С другой стороны, выброс корональной массы (СМЕ) тесно связан с процессами преобразования магнитной энергии в кинетическую и тепловую энергии (магнитное пересоединение) в солнечной короне и при солнечных вспышках. Это подтверждается результатами настоящей работы. В частности, это следует из структуры временной зависимости фактора нестационарности как предвестника моментов увеличения динамической солнечной активности, а также корреляции между числами Вольфа и количеством выброшенной солнечной энергии [5]. Корреляции и антикорреляции, обнаруженные в кросс-корреляциях, зависят от 27-дневного периода вращательной динамики Солнца. Это является подтверждением периодических динамических процессов в конвективной и радиационной зонах равновесия. Peng Zou, и др. (2014) [6] определили из анализа корреляционных измерений положительной энтропии солнечных нитей относительно солнечного динамо и динамики солнечных пятен, что корональная активность верхнего слоя Солнца, описываемая числом солнечных нитей (солнечные нити представляют собой облака заряженных частиц, которые поднимаются над поверхностью Солнца, однако остаются привязанными к нему из-за влияния магнитного излучения), является хаотичной и имеет очень сложное поведение. При этом, связь между солнечными нитями и солнечными пятнами остается неясной.

Тем не менее, согласно настоящей работе, найдены определенные корреляции между числами Вольфа и выбросом энергии Солнца. И если численное моделирование, проведенное Peng Zou, et. и др., не может напрямую служить инструментом прогнозирования активности Солнца, то такой метод может быть разработан на основе регрессионного анализа. В заключение следует отметить, что изучение самоорганизации намагниченной плазмы и формирование устойчивых к солнечному излучению магнитных структур по-прежнему являются одними из наиболее сложных проблем современной астрофизики. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ РФФИ 18-32-00895 mol_a.

Список литературы

1. Kitiashvili I.N., 2016 Data assimilation approach for forecast of solar activity cycles// *Astrophysical Journal* 831 1, Article number 15.
2. Weiss N.O., Tobias, S.M. 2000 Physical Causes of Solar Activity.. *Space Science Reviews* 94(1) 99-112.
3. Mansour N.N. 2016 Understanding solar torsional oscillations from global dynamo models// *Astrophysical Journal Letters* 828, 1 Article number L3.
4. Kitiashvili I.N. 2012 Mechanisms of formation of solar pores and sunspots// *Proceedings IAU Symposium (Solar and Astrophysical Dynamos and Magnetic Activity)* 8/ S294 269-282.
5. Subramanian K. and Brandenburg A. 2006 Magnetic helicity density and its flux in weakly inhomogeneous turbulence// *The Astrophysical Journal Letters* 648 L71–L74.
6. Zou Peng, Li Qi-Xiu, Wu Nan 2014 Non-linear analysis of the long-term behaviour of solar filaments// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, 1, 38–45.

Номер проекта РФФИ: 18-32-00895 mol_a

Анализ аномальной астрономической рефракции при позиционных наблюдениях небесных тел

Сабитова Э. И.¹, Андреев А.О.^{1,2}, Демина Н.Ю.¹, Нефедьев Ю.А.¹

¹КФУ

²МГУ им. М.В.Ломоносова

e-mail: sabitova_190397@mail.ru

Настоящая работа посвящена анализу влияния аномальной астрономической рефракции [1], учет которой необходим при выполнении редукции наземных позиционных астрономических наблюдений [2]. Считается, что атмосферные слои одинаковой плотности расположены параллельно относительно поверхности Земли. Но анализ широтных наблюдений с телескопов Бамберга и ZTL-180 показал [3], что имеются существенные систематические ошибки в зависимости от зенитного расстояния небесного объекта, и это предполагает, что такие ошибки зависят от наклона воздушных слоев одинаковой плотности, и не зависят от наклона земной поверхности [4]. На основе аэрологических данных был разработан метод расчета наклонов атмосферных слоев одинаковой плотности. С этой целью были взяты изобарические поверхности (поверхности одинакового атмосферного давления) во многих точках земной поверхности. Были проанализированы параметры каждой изобарической поверхности относительно геоида. Было обнаружено, что

влияние наклона верхних слоев воздуха одинаковой плотности на преломление луча света от небесного объекта не полностью компенсирует влияние наклона нижних атмосферных пограничных слоев [5]. Если наклон верхних слоев воздуха начинается с небольшой высоты, то влияние наклона нижних пограничных слоев атмосферы на значение рефракции компенсирует примерно 50% влияния на рефракцию наклона верхних атмосферных пограничных слоев. Поэтому необходимо вносить поправки в наблюдения аномалий рефракции за наклон атмосферных слоев одинаковой плотности; эти поправки особенно важны для наблюдения современными высокочувствительными телескопами [6]. Таким образом, если пара звезд на разных сторонах зенита наблюдается, например, на зенитном расстоянии 70° , то ошибка широты для аномальной рефракции из-за наклона пограничных слоев атмосферы составляет около $0,1'$, что является достаточно значимой величиной. Результаты настоящей работы позволили объяснить систематические различия между данными наблюдений космической миссии Hipparcos и современными звездными каталогами, так как Hipparcos производил наблюдения вне атмосферы Земли и поэтому на них не оказывали влияния ошибки, вызванные наклонами атмосферных слоев. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Bétrémieux Y., Kaltenecker L. 2015 Refraction in planetary atmospheres: Improved analytical expressions and comparison with a new ray-tracing algorithm // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 451/ 2 1268-1283.
2. Nefedjev Yu.A., Nefedjeva A.I. 2005 Determination of refraction anomalies made by classical method taking into account global inclinations of airmasses of identical density // Astronomische Nachrichten AN 326 773-776.
3. Taylor M.S., McGraw J.T., Zimmer P.C., Pier J.R. 2013 On the source of astrometric anomalous refraction// Astronomical Journal 145/ 3 Article number 82.
4. Fritz T.K., Kallivayalil N. 2015 The Proper Motion Of Palomar 5// Astrophysical Journal, 811/ 2 Article number 123.
5. Robinson T.D. A 2017 Theory of Exoplanet Transits with Light Scattering// Astrophysical Journal 836/ 2 Article number 236.
6. Peng H.-W., Wang N., Peng Q.-Y. 2016 Preliminary results of CCD observations targeting Himalia acquired at Yunnan Observatories in 2015// Research in Astronomy and Astrophysics, 16/ 12, Article number 186.

Номер проекта РФФИ: 19-32-50071 мол_нр

Сигнатура геомагнитной супербури в скорости вращения земли

Трофимов Д. А.¹, Петров С.Д.¹

¹СПбГУ

e-mail: dm.trofimov@gmail.com

Исследование долгопериодических нерегулярных вариаций вращения Земли является актуальной научной задачей. В настоящее время полноценная теория, описывающая

причины их вызывающие, отсутствует, имеются лишь две гипотезы. Первая из них предполагает источником данных вариаций жидкое ядро Земли, вторая считает источником долгопериодических вариаций продолжительности суток, или Length of Day (LOD), солнечную активность. Вторая гипотеза предполагает, что между Солнечным ветром и мантией Земли существует механизм электромагнитного сцепления, аналогичный механизму, предложенному ранее для системы ядро-мантия. Проблемы, связанные с низкой проводимостью мантии Земли, могут быть скомпенсированы тем, что переменность внешнего магнитного поля Земли имеет гораздо более быстропеременную природу, соответственно, согласно закону Фарадея, токи, генерируемые в мантии во время геомагнитных бурь, могут быть сильнее, чем токи, генерируемые при переменности главного магнитного поля Земли. Согласно данной гипотезе наблюдаемые нами изменения LOD являются накопленным эффектом от многочисленных геомагнитных бурь. Наблюдаемым конкретным примером изменения угловой скорости вращения Земли является замедление вращения Земли во время геомагнитной бури, происходившей с 29 октября по 1 ноября 2003 г.

На временных интервалах от суточного до сезонного, изменения LOD практически полностью описываются атмосферной циркуляцией. Корреляция между рядом LOD и рядом углового момента атмосферы (УМА), полученным на основе метеорологических данных, на этих временных интервалах превышает 95%. Нами были построены ряды разности LOD и УМА, анализ которых показывает, что разность меняется в пределах 0.01 миллисекунды за исключением промежутка времени с 29 октября по 1 ноября. Начиная с 29 октября отмечен резкий спад скорости вращения Земли на величину 0.15 миллисекунды за три дня, очевидно не связанный с циркуляцией атмосферы. Далее разность LOD-УМА продолжает снова колебаться в пределах 0.01 миллисекунды. Исследование разности LOD-УМА на годовом временном интервале показывает уникальность подобного поведения, более таких событий не обнаружено. Данное изменение угловой скорости вращения Земли по времени полностью совпадает с геомагнитной бурей, самой мощной начиная с 1989 года, скорость солнечного ветра в ходе бури достигала значений 1200 км/с, максимум значения скорости солнечного ветра как раз приходится на время наблюдаемого нами торможения вращения Земли.

Поверхностная энергия ядерной материи до и после точки нейтронизации с эффективным взаимодействием типа Скирма

Щечилин Н. Н.¹, Чугунов А. И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nicknicklas@mail.ru

В коре нейтронной звезды существуют сильно нейтронно-избыточные ядра, недоступные для прямого экспериментального исследования. В наиболее глубоких слоях (внутренняя кора) происходит нейтронизация и атомные ядра оказываются окруженными свободными нейтронами. Для исследования состава и уравнения состояния такого вещества необходимо полагаться на теоретические массовые модели. В частности, удобно использовать феноменологическую капельную модель, одним из параметров которой является поверхностное натяжение ядерной материи. При этом, термодинамически

согласованное описание должно учитывать зависимость поверхностного натяжения от химического потенциала нуклонов, а также абсорбцию нейтронов на поверхность ядра (так называемая нейтронная шуба) [1]. Следуя работам [2, 3], мы провели расчет поверхностной энергии ядерной материи с помощью расширенного метода Томаса-Ферми, позволяющего получить зависимость плотности кинетической энергии и спиновой плотности от плотности вещества. Для поиска профиля плотности двухфазной системы использовалась функция типа Ферми-Дирака с 5-ю параметрами, которые минимизировались для нахождения термодинамически равновесного профиля плотности нуклонов. Мы использовали ядерные потенциалы типа Скирма в параметризациях [4], удовлетворяющим экспериментальным данным об атомных ядрах, наблюдательным ограничениям на массы нейтронных звезд, а также теоретическим расчетам вещества, состоящего из одних нейтронов.

Список литературы

1. J.M. Lattimer, C.J. Pethick, D.G. Ravenhall, 1985, Nucl. Phys. A, 432, 646
2. M. Centelles, M. Del Estal, X. Vinas, 1998 Nucl. Phys. A, 635, 193
3. Douchin, F., Haensel, P., & Meyer, J. 2000, Nucl. Phys. A, 665, 419
4. S. Goriely, N. Chamel, J.M. Pearson, 2013, Phys. Rev. C, 88, 024308

Оценка физических параметров в молекулярных HD/H₂ облаках

Косенко Д. Н.¹, Балашев С.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kosenkodn@yandex.ru

Молекула H₂ – самая распространенная молекула во Вселенной. Её изотоп, HD, – также одна из самых распространенных молекул во Вселенной. Относительная распространенность HD/H₂ сильно зависит от физических параметров среды, таких как скорость ионизации космическими лучами, интенсивность ультрафиолетового фона, объемная концентрация в среде и распространенность тяжёлых элементов. Причем зависимость отношения лучевых концентраций N(HD)/N(H₂) от этих параметров можно описать простым способом, используя уравнение баланса между процессами формирования и разрушения молекулы HD. Среди этих параметров особый интерес представляет скорость ионизации космическими лучами, так как оценки, полученные для нашей Галактики разными методами, отличаются более чем на 2 порядка. В то же время остальные параметры можно оценить другими способами, например, металличность – по абсорбционным линиям металлов, интенсивность УФ фона и объемную концентрацию – из относительной населенности уровней тонкой структуры нейтрального углерода, C I, и вращательных уровней H₂.

Мы использовали недавно полученное нами полуаналитическое описание отношения N(HD)/N(H₂) для оценки скорости ионизации космическими лучами в межзвёздной среде удалённых галактик, которая исследуется посредством наблюдения абсорбционных систем с большими красными смещениями, идентифицируемых в спектрах далёких квазаров. Мы получили, что скорость ионизации сильно варьируется от системы к системе и находится в диапазонах от 10⁻¹⁸ до 10⁻¹⁷ с⁻¹.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-12-00301

Список литературы

1. Balashev S.A., Kosenko D.N., HD/H₂ ratio in the diffuse interstellar medium, MNRAS: Letters, vol.495, L45-L49, 2020
2. Kosenko D.N., Balashev S.A., Molecular clouds HD/H₂ in the early Universe, J.Phys.: Conf.Ser., vol.1400, 022012, 2019
3. Balashev S.A. et al., X-shooter observations of strong H₂-bearing DLAs at high redshifts, MNRAS, vol.490, 2668-2678, 2019

О возможном влиянии солнечных и астрономических факторов на климат северной Фенноскандии

Огурцов М. Г.¹, Хелама С.², Линдхольм М.², Ялканен Р.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт природных ресурсов (LUKE), Рованиеми, Финляндия

e-mail: maxim.ogurtsov@mail.ioffe.ru

Исследованы девять реконструкций климата северной Фенноскандии. Показано, что значимая и стабильная корреляция между летней температурой в данном регионе и квази-двадцатидвухлетним циклом солнечной активности существует на протяжении 1700-2000 гг. Значимой корреляции между климатическими характеристиками и квази-двадцатилетним астрономическим циклом, связанным с перемещениями Солнца вокруг барицентра солнечной системы, не обнаружено. Отмечено, что выявленная солнечно-климатическая связь, скорее всего, имеет локальный характер и не распространяется на весь североатлантический регион. Обсуждены возможные физические механизмы влияния солнечной активности на климат Земли.

Измерение эффективности пофотонной регистрации ультрафиолетового излучения на длине волны 277 nm с помощью кремниевого фотоумножителя

Богданов А. А.¹, Тубольцев Ю.В., Чичагов Ю.В., Лосев С.Н., Соколовский Г.С.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Alexander.A.Bogdanov@mail.ioffe.ru

В настоящее время в России в Тункинской долине разворачивается черенковская гамма-обсерватория TAIGA [1], в состав которой входят черенковские телескопы TAIGA-IACT, построенные на базе вакуумных фотоумножителей. Развитие кремниевых фотоумножителей позволяет создавать системы, превосходящие вакуумные фотоумножители по ряду важных параметров [2]. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся разработки детекторного кластера для камеры черенковского гамма-телескопа TAIGA-IACT на базе кремниевых фотоумножителей (SiPM), чувствительных к излучению как в видимом (250-600 nm), так и в ультрафиолетовом (250-300 nm) диапазонах.

С целью тестирования и калибровки создаваемой детектирующей аппаратуры создан испытательный стенд, включающий в себя источник низкоинтенсивных импульсов (от единиц до тысяч фотонов в импульсе) в ультрафиолетовом диапазоне (около 277 nm) и систему аттенюации излучения. В работе описана схема устройства и принцип работы испытательного стенда, а также способ калибровки эффективности регистрации слабых импульсов и калибровка мощности источника импульсов.

В результате проведённых измерений источник импульсов был откалиброван по мощности и диаграмме направленности, получена зависимость количества фотонов от расстояния между источником и детектором. Показано, что поглощение воздухом ультрафиолетового излучения с длиной волны 277 nm на расстояниях меньше 1 m незначительно, а количество зарегистрированных фотонов убывает по обратно-квадратичному закону при использовании как измерителя мощности, так и детектора на базе SiPM. Измерена эффективность регистрации этого детектора на длине волны 277 nm, равная приблизительно 6%, которая сопоставлена со значениями, заявленными производителями. Получена калибровочная трёхмерная поверхность зависимости количества фотонов от расстояния до детектора и мощности источника, которая необходима для последующих измерений.

Список литературы

1. N. M. Budnev et. al. TAIGA: A Complex of Hybrid Systems of Cooperating Detectors for Gamma Astronomy and Cosmic Ray Physics in the Tunka Valley. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, Vol. 83, No. 8, pp. 951–954
<https://doi.org/10.3103/S1062873819080100>
2. S. Sakurai, D. Depaoli, R. López-Coto. The calibration of the first Large-Sized Telescope of the Cherenkov Telescope Array. 36th International Cosmic Ray Conference - ICRC2019.
<https://arxiv.org/abs/1907.09357>

Рентгеновский поляриметр солнечных вспышек для миссии «Интергелио-Зонд»: экспериментальное определение отклика физического макета на поляризованное рентгеновское излучение

Савченко М. И.¹, Круглов Е.М.^{1,2}, Лазутков В.П.¹, Скородумов Д.В.¹, Шишов И.И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Радиевый институт им. В.Г. Хлопина

e-mail: Mikhail.Savchenko@mail.ioffe.ru

Работа посвящена исследованию характеристик поляриметра жесткого рентгеновского излучения ПИНГ-М [1] на физическом макете ФМ ПИНГ-П. Прибор ПИНГ-М создаётся совместно НИЯУ МИФИ и ФТИ им. А.Ф. Иоффе для миссии «Интергелио-Зонд» [2]. Работа прибора основана на комптоновском рассеянии. Степень и направление линейной поляризации определяются путём измерения асимметрии поля рассеянного излучения. В приборе применены активные рассеиватели, регистрирующие комптоновский электрон отдачи. Полезным событием является случай совпадения сигнала в детекторе-рассеивателе и детекторе-приемнике рассеянного излучения. Физический макет

представляет из себя детекторную часть поляриметра и содержит три рассеивателя и шесть приемников рассеянного излучения – всего 18 пар детекторов, ориентированных под различными азимутальными углами. В результате проведенных измерений были экспериментально определены зависимости скоростей счёта в парах детекторов от позиционного угла плоскости поляризации падающего на прибор излучения. Глубина модуляции этой зависимости определяет чувствительность прибора к поляризации. Приведена оценка чувствительности прибора.

Список литературы

1. Kotov Y., Yurov V.N., Glyanenko A.S. et al. Solar X-ray polarimetry and spectrometry instrument PING-M for the Interhelioprobe mission // *Adv. Space Res.*, v.58, 4, pp: 635-643, 2016.
2. Kuznetsov V.D., Zelenyi L.M., Zimovets I.V. et al. The Sun and Heliosphere Explorer – the Interhelioprobe Mission // *Geomagn. Aeron.*, v.56, 7, pp: 781-841, 2016.

Создание регрессионной модели движения полюса Земли с возможностью динамического прогнозирования

Хайрутдинова А. Н.¹, Мубаракшина Р.Р.¹, Андреев А.О.², Нефедьев Ю.А.¹

¹КФУ

²МГУ им. М.В.Ломоносова

e-mail: ade_14_06_1997@mail.ru

Работа посвящена современной и востребованной задаче по прогнозированию движения земного полюса [1, 2]. Для обработки наблюдений динамики полюса Земли использовался подход регрессионного динамического моделирования (ARM) [3]. С помощью программного пакета ARM были построены модели, описывающие динамику земных полярных координат. Этот подход обеспечивает точные комбинированные модели наблюдений, которые в некоторой степени описывают причинно-следственную и детерминистическую связь и обеспечивают прогнозные значения параметров. В отличие от детерминированных моделей, регрессионные модели не остаются постоянными по структуре и значениям параметров в течение всего периода использования [4]. После получения прогноза на шаг или несколько шагов дискретности во времени модель «обновляется» в соответствии с текущими значениями координат. Регрессионное динамическое моделирование (ARM-подход) является частным случаем адаптивного регрессионного моделирования (ARM-подход) [5]. С его применением формируется сложная модель, состоящая из набора оптимальных математических структур, каждая из которых описывает зависимость «остатков» своего шага от времени. Сравнение полученных в настоящей работе результатов с работами других исследователей динамики Северного полюса показало, что полученные модели с использованием ARM-подхода позволяют более точно прогнозировать координату Y при сохранении точности координаты X. Наши результаты подтверждают перспективность использования так называемых адаптивных динамических регрессий, впервые предложенных в [6] и разрабатываемых в настоящее время, для описания динамики положения полюса Земли. ARM-подход по сравнению с традиционными методами анализа временных рядов, в частности, анализа изменчивости географической широты, имеет следующие преимущества: 1) может выполняться расширение концепции

структуры математической модели, описывающей определенную динамику, 2) производится изоляция устойчивых ко времени гармоник колебаний, 3) в несколько раз повышается точность прогнозирования изменений на определенном временном интервале вперед во времени, что имеет важное практическое значение [7]. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Adhikaria S., Carona L., Steinbergerbc B., Reagera J., Kjeldsende K., Marzeionf B., Laroura E., Ivinsa E. 2018 What drives 20th century polar motion?// *Earth and Planetary Science Letters* 502/15 126-132.
2. Tserklevych, A.L., Zayats, O.S. & Shylo, Y.O. 2017 Dynamics of the Earth shape transformation// *Kinemat. Phys. Celest. Bodies* 33, 130–141.
3. El-Mowafy A. and Lo J. 2014 Dynamic modeling of GNSS troposphere wet delay for estimation of Precipitable Water Vapour// *Journal of Applied Geodesy* 8/1 31–42.
4. Matsui H. 2014 Variable and boundary selection for functional data via multiclass logistic regression modeling// *Computational Statistics & Data Analysis* 78 176-185
5. Hannart A., Ribes A. and Naveau P. 2014 Optimal fingerprinting under multiple sources of uncertainty// *Geophysical Research Letters* 41/4 1261-1268
6. Clausel M. and Grégoire G. 2014 Practical Session: Simple Linear Regression// *European Astronomical Society Publications Series* 66 41-44
7. Michael Bevis & Abel Brown 2014 Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy// *Journal of Geodesy* 88 283–311

Номер проекта РФФИ: РФФИ 19-32-50071 мол_нр

Исследование влияния законов межзвездного поглощения на параметры фотометрических систем с использованием астрофизических наблюдений АОЭ

Куандыкова Д. М.¹, Андреев А.О.², Нефедьев Ю.А.¹, Гудец Р.³

¹КФУ

²МГУ им. М.В.Ломоносова

³Чешский технический университет

e-mail: kuandykova_dm@mail.ru

Как известно, в настоящее время не существует фотометрических приемников, способных регистрировать излучение во всех возможных диапазонах волн [1]. Также на достоверность наблюдений оказывает влияние поглощение света при распространении в межзвездной среде [2]. Как хорошо известно, в направлении центра нашей Галактики поглощение очень велико [3]. Сильно поглощается свет звезд, расположенных внутри или за плотными газовыми облаками и туманностями [4]. Основную роль в поглощении света играет пыль (на втором месте – поглощение в линиях водорода) [5]. При исследовании межзвездного поглощения всегда ставились две проблемы. Первая – построение карты поглощения. Вторая задача определение общего закона поглощения в достаточно большой области, но при этом очень точного и детального для многих длин волн. Решение

такой задачи очень важно для изучения свойств межзвездной пыли. Поскольку межзвездное поглощение в синей части видимой области спектра больше, чем в красной, оно приводит к покраснению источников света [6]. Сравнивая показатели цвета покрасневшей и непокрасневшей звёзд одного и того же спектрального класса и класса светимости, находят так называемый избыток цвета звезды. В зависимости от участков спектра покрываемых кривой спектральной чувствительности приемника излучения различают разные фотометрические системы для звёздных величин. Наиболее распространенной является трехполосная фотометрическая система UBV [7]. В настоящей работе на основе цифровой базы данных астрофизических наблюдений Астрономической обсерватории им.В.П.Энгельгардта (АОЭ) с использованием специального программного пакета анализа яркостных характеристик были рассчитаны связи фотометрических систем UBV (PSC UBV) для различных законов межзвездного поглощения. В результате получено, что: 1) При использовании разных законов межзвездного поглощения SDSS, 2MASS и WISE величина отклонения в положении кривых реакции пропорциональна отклонению в зависимостях UBV и показателей цвета. 2) Определенное влияние на положение кривых реакции и кривых связи UBV и показателей цвета имеют спектральные характеристики используемых при наблюдениях фильтров. 3) То же самое можно сказать и о преобразовании звездных величин из одной стандартной системы в другую, поскольку кривые отклика, как правило, существенно различаются. 4) Еще один полученный в работе вывод, что для любой отдельной модели межзвездного поглощения различия в цветах между фотометрическими системами не зависят от спектрального класса и класса светимости. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Krelowski J. and Strobel A. 2012 Limited diversity of the interstellar extinction law // *Astron. Nachr.* AN 333 No. 1 60 – 70
2. Das H. K., Voshchinnikov N. V. and Il'in V. B. 2010 Interstellar extinction and polarization – a spheroidal dust grain approach perspective// *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 404, 265–274.
3. Fitzpatrick E. L. and Massa D. 2005 An analysis of the shapes of ultraviolet extinction curves. iv. Extinction without standards // *The Astronomical Journal* 130:1127–1140.
4. Nefedjev J. and Rizvanov N. 2005 Photographic observations of Solar System bodies at the Engelhardt astronomical observatory // *Astronomy and Astrophysics* N 444 625 – 627.
5. Budding E. and Demircan O. 2007 Introduction to Astronomical Photometry // Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York 1-452.
6. Hasenberger, B., Forbrich, J., Alves, J., Wolk, S.J., Meingast, S., Getman, K.V., Pillitteri, I. 2016 Gas absorption and dust extinction towards the Orion Nebula Cluster// *Astronomy and Astrophysics* 593 N A7
7. Yadav R.K.S. and Sagar, R. 2001 Non-uniform extinction in young open star clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 328/ 21 370-380.

Анализ физической поверхности Венеры с использованием методов фрактальной геометрии

*De La Morena C.*¹, Нефедьев Ю.А.¹, Андреев А.О.², Ахмедшина Е.Н.¹

¹КФУ

²МГУ им. М.В.Ломоносова

e-mail: delamorenacoco.carlos@gmail.com

На сегодняшний день основным подходом к исследованию процессов в сложных планетофизических системах являются статистические и фрактальные методы их описания. В частности, робастный подход позволяет изучать структуру сложных объектов с учетом их качественной специфики, а фрактальная геометрия объектов позволяет не только изучать их структуру, но и связь между структурой и процессами ее образования [1]. В связи с этим является актуальной проблема разработки методов распознавания фрактальных структур планетных объектов. Соответственно, так как вариации физической поверхности Венеры представляют собой сложную многопараметрическую систему [2], ее анализ необходимо осуществлять с использованием методов физики сложных систем, одним из направлений которых является фрактальный анализ [3]. В настоящей работе была выполнена работа по изучению фрактальных структур на Венере на основе данных наблюдений космической миссии НАСА «Магеллан» [4]. Оборудование этого искусственного спутника позволило осуществить сканирование почти всей поверхности Венеры с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой S-диапазона (12 см) и микроволнового радиометра и исследовать топографию на основе измерений специального радара – высотомера [5]. Неточности некоторых данных, полученных от «Магеллана», были восполнены ранее полученной информацией от космических миссий «Венеры 15», «Венеры 16» и «Пионер-Венера». Необходимо отметить, что выбор основной уровневой поверхности на Венере задается определенной величиной потенциала или точкой на их поверхности, через которую проходит геоид. Как результат данной работы, топоцентрические данные наблюдений были проанализированы с использованием фрактального анализа и были получены следующие значения средних фрактальных размерностей для физической поверхности Венеры: по венерианским широтам $D_{ср.φ_R} = 1,003$ и по венерианским долготам $D_{ср.φ_λ} = 0,98$. Согласно этим значениям можно заключить, что топографическая модель физической поверхности Венеры близка к сферической фигуре. В процессе выполнения работы была построена цифровая карта поверхности Венеры и создана ее пространственная модель. Сопоставление полученных фрактальных параметров с результатами фрактального анализа земной поверхности показали хорошее согласие, что подтверждает выводы, сделанные в работе [6], где был выполнен сравнительный анализ геологической эволюция Венеры и Земли. Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому Фонду Фундаментальных Исследований: грант РФФИ 19-32-50071 мол_нр.

Список литературы

1. Tibor S. Balint Julian P. Melchiorri 2014 Making the Venus Concept Watch 1.0// Acta Astronautica 101 138-150.
2. Ikegawa S. and Horinouchia T. 2016 Improved automatic estimation of winds at the cloud top of Venus using superposition of cross-correlation surfaces// Icarus 271 98-119.
3. Turcotte D.L. 1987 A fractal interpretation of topography and geoid spectra on the earth, moon, Venus, and Mars// Journal of Geophysical Research 92/B4 597-601.
4. Hensley S., Mitchell K., Nunes D., Shaffer S., Deen R., Parcheta C., Rusert M. 2016 Systematic processing of high resolution topography of Venus from Magellan radar stereo

- data and science applications// Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2016, Article number 7559360.
5. Ferrari A. 1979 Planetary geodesy// Revs. of Geophys. and Space Phys. 17/7 1663-1677.
 6. Head James W. 2014 The geologic evolution of Venus: Insights into Earth history// Geology 42 (1) 95–96.

Номер проекта РФФИ: РФФИ 19-32-50071 мол_нр

Мониторинг ПЭС ионосферы вблизи Южного геомагнитного полюса по ГНСС-наблюдениям

Желтова К. В.¹, Петров С.Д., Трофимов Д.А., Чекунов И.В., Серов Ю.А., Трошичев А.А.

¹СПбГУ, ААНИИ

e-mail: kseniyazhel@mail.ru

Полное электронное содержание (ПЭС) является одной из наиболее важных характеристик земной ионосферы. Данный параметр характеризует степень ионизации и определяет дисперсионные свойства ионосферы, как среды распространения радиоволн. В настоящее время наиболее доступным способом определения ПЭС является измерение радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и BDS. На сегодняшний день глобальные сети приемного оборудования ГНСС обеспечивают надежное определение ПЭС над поверхностью Земли практически везде, кроме полюсов. С другой стороны, характеристики ионосферы вблизи геомагнитных полюсов представляют особый интерес в силу их малой изученности. С целью мониторинга ПЭС вблизи Южного геомагнитного полюса сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) совместно с представителями Арктического и Антарктического Научно-исследовательского института (ААНИИ) был оборудован пункт ГНСС-наблюдений на территории Антарктической станции «Восток», расположенной в непосредственной близости от Южного геомагнитного полюса. Для организации ГНСС-пункта на станции «Восток» был установлен прецизионный двухчастотный геодезический ГНСС-приемник Javad Triumph-1 с возможностью фазовых измерений. Наблюдения были начаты в 2016 году и продолжаются с небольшими перерывами по сегодняшний день. Приемник постоянно регистрирует кодовые и фазовые навигационные сигналы от систем ГЛОНАСС и GPS на обеих несущих частотах. Наблюдения обрабатываются посредством программных пакетов RTKLIB и GeNeSiS (производства Группы компаний «Геоскан»). Полное электронное содержание ионосферы вычисляется на основе как кодовых, так и фазовых измерений исходя из линейной комбинации псевдодалейностей и псевдофаз, полученных на двух частотах (L1 и L2) для каждого спутника в поле зрения. Таким образом, определяется наклонное ПЭС в ионосфере вдоль луча зрения, после чего вычисляется вертикальное содержание электронов на основе картирующей функции. Полученные временные ряды ПЭС были проанализированы и сопоставлены с глобальной картой ПЭС, определяемой Международной ГНСС-службой. В целом наши вычисления соответствуют глобальной карте, но также имеются отличия, прослеживается более детальная во времени структура вариаций ПЭС и меньшие формальные ошибки определяемых величин. Также выявлено преимущество системы ГЛОНАСС перед GPS в высоких широтах, связанное с большим орбитальным наклоном российских навигационных аппаратов.

Столь длительные и однородные временные ряды ПЭС вблизи Южного геомагнитного полюса получены впервые и представляют собой ценный материал для ионосферных исследований.

Солнечная активность, реконструированная на основе радиоуглеродных данных, и климатические изменения с 17000 до 5000 лет до нашей эры

Кудрявцев И. В.¹, Дергачёв В.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru

Установлено, что космогенные изотопы (напр., ^{14}C , ^{10}Be и др.) образуются в земной атмосфере под действием высокоэнергичных частиц космических лучей (КЛ). Основной вклад в генерацию космогенного изотопа ^{14}C вносят частицы Галактических Космических Лучей (ГКЛ). Гораздо меньший вклад в образования радиоуглерода дают протоны высоких энергий, ускоряемых в ряде солнечных вспышек. Последнее приводит к появлению редких и непродолжительных всплесков содержания изотопа ^{14}C в атмосфере Земли. Поэтому считается, что на длительных временных шкалах изменение содержания радиоуглерода в атмосфере определяется интенсивностью ГКЛ, проникающих в земную атмосферу. Однако изменение земного климата во времени, влияющего на обменные резервуары углеродного цикла (атмосфера, биосфера, океан, гумус) приводит к перераспределению изотопа ^{14}C между этими резервуарами и это надо учитывать при реконструкции активности Солнца в прошлом на основе радиоуглеродных данных ($\Delta^{14}\text{C}$), полученных из природных архивов, которые содержат информацию об отношении концентраций изотопов ^{14}C и ^{12}C . В данном докладе рассматривается реконструкция солнечной активности на основе радиоуглеродных данных на интервале 17000-5000 лет до нашей эры. Этот временной интервал характеризуется переходом от Ледникового Периода к Голоцену. В результате роста температуры происходит таяние ледников, повышается содержание CO_2 в атмосфере Земли. Повышение глобальной температуры, в свою очередь, приводит к перераспределению радиоуглерода между природными резервуарами. Получена реконструкция чисел Вольфа, которая указывает, что на временных интервалах 13600-13000, 9300-9000, 8300-8000 гг. до н.э. Солнце находилось в состоянии глубоких минимумов активности. Отметим и минимумы активности в ≈ 10700 и 7500 гг. до н.э. Выделены и периоды чрезвычайно высокой активности Солнца, так в максимумах ≈ 12350 и 6715 гг. до н.э. значения чисел Вольфа могли превышать величину 200. Длительность первого из этого периода составляла несколько сотен лет, и в это время на Земле происходило Майендорфское потепление (≈ 12500 - 11850 гг до н.э.). Возникает вопрос: являются ли эти события связанными?

Сравнение различных источников гамма-излучения, доступных в лабораторных условиях

Рачков К. И.^{1,2}, Попов А. Н.², Бобашёв С. В.², Безверхний Н. О.², Сорокин А. А.^{2,3}

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³DESY, Гамбург, Германия

e-mail: Alexander.Popov@mail.ioffe.ru

Исследование спектра излучения в гамма-диапазоне занимает ключевое место в разработке знаний о физических условиях и составе вещества во Вселенной на различных этапах ее эволюции. Источниками подобных высокоэнергетических электромагнитных волн являются ядра активных галактик, например, блазаров, а также гамма-всплески, которые порождаются в результате ярчайших событий во вселенной – вспышек сверхновых. Так в работах группы Н. Е. S. S. (High Energy Stereoscopic System) с помощью черенковского телескопа изучаются далёкие блазары. Исследование далёких объектов в спектре гамма-излучения приводит к необходимости учитывать искажение излучения, вызванное его взаимодействием с межгалактическим пространством. Значительный вклад в искажение даёт Процесс Брейта – Уилера ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$) который имеет решающее значение в природе, управляет выделением энергии: в гамма-всплесках, активных ядрах галактик, черных дырах [1, 2]. Интересующий нас процесс рассмотрен в статьях [3, 4]. В них рассчитано, что ослабление гамма-потока далёких источников заметно при рождении пары от столкновения гамма-квантов с тепловыми фотонами. Следующее по порядку малости искажение вносит процесс поглощения, когда гамма-квант сталкивается с фотонами тормозного рентгеновского излучения в скоплениях галактик, этот случай разобран в работе [5].

В настоящее время существует новое поколение лазеров, таких как Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах (XFEL), который генерирует синхротронное излучение высокой интенсивности в рентгеновской области спектра. При наличии интенсивных лабораторных источников гамма-квантов можно планировать экспериментальное наблюдение процесса Брейта-Уилера на Европейском лазере на свободных электронах.

Источники гамма-излучения, доступные в лабораторных условиях:

1. Излучение ядер испускается при переходах ядра из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Энергия испускаемого гамма-кванта с точностью до незначительной энергии отдачи ядра, равна разности энергий этих состояний ядра. Как следствие, спектр дискретный и достигает нескольких МэВ.

2. При распадах частиц испускаются гамма-кванты с большими энергиями порядка МэВ. Наиболее интенсивное гамма-излучение и по энергии, и по количеству фотонов, возникает при бета-распаде естественных и искусственных радионуклидов.

3. Монохроматические гамма-кванты можно получить, используя ядерные реакции, которые приводят к сильному возбуждению конечного ядра. При радиационном захвате медленных нейтронов обычно образуются γ -кванты с энергиями от 4 до 11 МэВ (энергии связи нейтронов в различных ядрах). Энергетический спектр гамма-квантов такого источника содержит одну или несколько линий. Создание достаточно интенсивных источников гамма-квантов путем радиационного захвата нейтронов предполагает использование мощных ядерных реакторов. Современные ядерные реакторы позволяют получать интенсивности гамма-квантов радиационного захвата до 10^8 квант/с.

4. Гамма-излучение, образующееся при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество, вызывается их торможением в кулоновском поле ядер вещества. Тормозное гамма-излучение имеет сплошной, спадающий с ростом энергии спектр, верхняя граница которого совпадает с кинетической энергией заряженной частицы.

5. Обратное комптоновское рассеяние лазерных фотонов на электронах Монохроматические γ -кванты высокой энергии можно получить, используя обратный Комптон-эффект. Комптон-эффект на электроне обладает важной особенностью – в процессе рассеяния возникают фотоны значительно более жесткие, чем до рассеяния.

Список литературы

1. R. Ruffini et al., *Physics Reports* 487, 1 (2010).
2. T. Piran, *Rev. Mod Phys.* 76, 1143 (2004)
3. A. I. Nikishov, *Sov. Phys. JETP* 14, 393 (1962).
4. Ruffini, R.; Vereshchagin, G. V.; Xue, S. -S. Cosmic absorption of ultra-high energy particles. *Ap&SS.* 361, 11 (2016)
5. А. Н. Попов, Д. П. Барсуков, А. В. Иванчик. *Письма в астрон. журн.* 44, 633 (2018)

Влияние изменения энтропии на первичный нуклеосинтез

Юрченко В. Ю.¹, Иванчик А.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: yurchvld@gmail.com

Результат первичного нуклеосинтеза (распространённости ядер лёгких атомов) в значительной степени зависит от суммарной плотности энергии всех компонент вещества, заполняющего Вселенную в ту эпоху (порядка [1 – 1000] секунд после Большого взрыва), а также от температуры, которая для различных компонент может быть различной (см. подробно о первичном нуклеосинтезе [1-3]). Температура определяет скорости ядерных реакций, протекающих в плазме, а плотность энергии вещества – скорость расширения Вселенной. Принято считать, что в эпоху первичного нуклеосинтеза вещество включает две невзаимодействующие компоненты: электромагнитную (частицы, принимающие участие в процессах электромагнитного взаимодействия) и нейтринную (частицы нейтрино, участвующие только в процессах слабого взаимодействия). Скорость электромагнитных процессов в это время существенно превышает скорость расширения Вселенной, что обеспечивает тепловое равновесие частиц электромагнитной компоненты, позволяя применять для описания их макроскопических характеристик равновесную термодинамику. При этом скорость слабых процессов недостаточна для того, чтобы нейтрино находилось в тепловом контакте с остальным веществом. В этой связи закон сохранения энтропии в сопутствующем объёме в расширяющейся Вселенной можно применять по отдельности к каждой из двух невзаимодействующих компонент. Это приводит к тому, что в эпоху электрон-позитронной аннигиляции, в результате которой концентрация электронов падает приблизительно на девять порядков, энтропия аннигилирующих электрон-позитронных пар почти полностью переходит в энтропию фотонов, повышая их температуру относительно нейтринной температуры примерно на 40%. Это различие существенным образом сказывается на результатах первичного нуклеосинтеза, что говорит о важности изучения возможных процессов, которые могли приводить к дополнительному изменению

энтропии компонент космической плазмы. В настоящей работе исследуются различные модели изменения энтропии и его влияние на выход лёгких элементов в этих моделях.

Список литературы

1. S. Weinberg, *Cosmology*, Oxford University Press (2008).
2. D.S. Gorbunov, V.A. Rubakov, *Introduction to the theory of the early universe: hot big bang theory*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2018).
3. C. Pitrou, A. Coc, J.-P. Uzan and E. Vangioni, *Precision big bang nucleosynthesis with improved Helium-4 predictions*, Phys. Rept. 754 (2018) 1.

Явные изометрические вложения геометрий черных дыр с несингулярным распределением материи

Капустин А. Д.¹, Пастон С.А.

¹СПбГУ

e-mail: sashakapusta96@gmail.com

Изометрическое вложение в плоское пространство — это интуитивный и чрезвычайно наглядный способ описания искривленной геометрии. В таком подходе многообразие описывается с помощью набора функций вложения, задающих зависимость координат объемлющего пространства от координат на многообразии. Если метрику на многообразии считать индуцированной, то в этих терминах можно переформулировать общую теорию относительности. При этом 4-х мерное пространство-время является искривленной поверхностью, изометрически вложенной в пространство большего числа измерений, число которых равно в случае общего положения 10, среди которых есть хотя бы 1 временноподобное направление и 3 пространственно подобных. Такое описание теории гравитации, впервые предложенное Редже и Тейтельбоймом, называется теорией вложения [1]. Она не вполне эквивалентна общей теории относительности, и может рассматриваться как ее плодотворная модификация, как на классическом уровне, так и в вопросах квантования. Тот факт, что вариация по функции вложения, как независимой переменной, приводит к более общим, чем уравнения Эйнштейна, уравнениям Редже-Тейтельбойма может использоваться для объяснения эффектов темной материи, а наличие одного выделенного времени плоского объемлющего пространства является шагом к упрощению построения квантовой теории.

Настоящая работа посвящена построению явных изометрических вложений для решений уравнений Эйнштейна (являющихся также и решениями уравнений Редже-Тейтельбойма), называемых черными дырами. Тогда как вложения вечных черных дыр, для которых распределение материи сингулярно, являются хорошо изученными (существует классификация минимальных вложений геометрии Шварцшильда [2], работы по изучению вложений черных дыр Рейснера-Нордстрема [3] и Керра-Ньюмана [4]), вложения черных дыр с несингулярно распределенной материей активно не изучались. Явные вложения таких метрик могут быть полезными для визуализации и изучения геометрии пространств, соответствующих, например, регулярным черным дырам или процессу коллапса звезды с возникновением черной дыры. Построение таких явных вложений также может помочь дальнейшему развитию теории вложения, являясь ее точными решениями.

Работу можно разделить на две части. Первая часть содержит несколько вариантов построения вложения для коллапса однородного шара пылевидной материи. Для одного из вариантов преимуществом является наличие динамически формирующегося горизонта событий, однако вложение оказывается не минимально возможным. В другом присутствии горизонта оказывается постоянным, однако вложение оказывается минимальным и содержащим одно времениподобное направление.

Вторая часть работы посвящена вложениям регулярных черных дыр. Классификация вложений метрики Шварцшильда оказывается применима для геометрий регулярных черных дыр [5], так как пространства обладают той же симметрией. Обсуждается модификация всех, согласно этой классификации, вариантов вложения метрики Шварцшильда, переводящая их во вложение геометрии регулярной черной дыры с заданной метрикой.

Список литературы

1. T. Regge, C. Teitelboim, “General relativity `a la string: a progress report”, in Proceedings of the First Marcel Grossmann Meeting, Trieste, Italy, 1975, edited by R. Ruffini, 77–88, North Holland, Amsterdam, 1977, arXiv:1612.05256.
2. S. A. Paston, A. A. Sheykin, *Class. Quant. Grav.*, 29 (2012), 095022, arXiv:1202.1204.
3. A. A. Sheykin, S. A. Paston, *Theor. Math. Phys.*, 185: 1 (2015), 1547–1556, arXiv:1512.08280.
4. Р. Р. Кузеев, *Гравитация и Теория Относительности*, 18 (1981), 75.
5. Irina Dymnikova, Maxim Khlopov, *International Journal of Modern Physics D*, 24:11, arXiv:1510.01351

Номер проекта РФФИ: 20-01-00081

Pulse pile-up corrections for energy spectra in Konus-Wind experiment

Лысенко А. Л.¹, Фредерикс Д. Д.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru

Pulse pile-up occurs in radiation spectroscopic systems at high counting rates and represents an overlay of two or more pulses from registered particles in the detector electrical circuit. This effect results in distortions of both spectral shape and intensity information, which is particularly crucial for X-ray and gamma-ray telescopes during extremely intense solar flares, gamma-ray bursts and giant flares from soft gamma-repeaters. We present a method based on Monte-Carlo modeling of the behavior of Konus-Wind spectrometer circuits at high count rates, which allows us to partially reduce the influence of the pile-up distortions on spectroscopic measurements, performed by the instrument in the ~ 10 keV—10 MeV energy band. We illustrate our approach by the recovery of observational spectra for some very intense astrophysical events.

Влияние темпа фотоионизации позитрониев на нагрев полярной шапки радиопульсара J0250+5854

Барсуков Д. П.¹, Воронцов М.В.², Морозов И.К.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: bars.astro@mail.ioffe.ru

Пульсар J0250+5854 имеет период вращения $P = 23.5$ сек и является наиболее медленно вращающимся среди одиночных радиопульсаров. Мы рассматриваем влияние темпа фотоионизации позитрониев и величины мелкомасштабного магнитного поля на обратный ток позитронов во внутреннем зоре и связанный с ним нагрев полярной шапки пульсара. Пульсар рассматривается в модели "внутреннего зора" со свободным истечением частиц с поверхности нейтронной звезды. Учитывается только рождение электрон-позитронных пар при поглощении квантов изгибного излучения в магнитном поле. При этом предполагается, что часть пар может рождаться в связанном состоянии -- в виде позитрониев, которые затем фотоионизируются тепловыми фотонами с поверхности звезды.

Природы штормовой активности на северо-западе Атлантики во время голоцена и ее возможная связь с вариациями магнитного поля Земли

Васильев С. С.¹, Дергачев В. А.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: sergey.vasiliev@mail.ioffe.ru

Ранее было показано [1], что концентрации анионов и катионов в ледяных ядрах гренландского льда флуктуируют во времени в течение голоцена (последние 10 тыс. лет). Временной масштаб изменений порядка нескольких тысяч лет. Механизм временных изменений концентрации химических составляющих определяется переносом вещества с поверхности океана. Чтобы найти причину штормовой активности в северо-западной части Атлантического океана во время голоцена были проанализированы данные о концентрации ионов в ядре Гренландского ледового щита (GISP2). Было показано, что существует временная цикличность переноса ионных компонентов с периодом ~ 2700 лет за счет изменения штормовой активности. В качестве одной из возможных причин штормовых изменений были рассмотрены вековые вариации положения геомагнитного полюса за последние несколько тысяч лет [2]. В частности, сравнивалась периодичность колебаний долготы северного геомагнитного полюса с частотой усиления штормовой активности. Показано, что спектры этих вариаций схожи, из чего делается вывод, что вековые вариации магнитного поля могут являться основой процессов, определяющих изменчивость штормовой активности и климата в северо-западной Атлантике в течение голоцена.

Список литературы

1. Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G. (2001). Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294, 2130-2136.
2. Korte, M., Manda, M. (2008). Magnetic poles and dipole tilt variation over the past decades to millennia. *Earth Planets Space* 60, 937-948.

Powerful Solar Proton Events of January 2005 and their impact on intensity of the stratospheric polar vortex

Веретененко С. В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru

In January 2005, a series of powerful Solar Proton Events associated with an increase of flare activity on the Sun was observed. Considerable increases of solar proton fluxes with energies 165-500 MeV allowing particles to reach stratospheric heights (~30 km and below) were registered during the events starting on 15, 16 and 17 January. The strongest event, with particle energies exceeding 500 MeV, took place on 20 January and was accompanied by an increase of the neutron monitor counting rate (Ground Level Enhancement). The events under study resulted in a considerable increase of stratospheric ionization. In this work an impact of these events on the middle atmosphere characteristics and intensity of the stratospheric polar vortex which plays an important part in solar-climatic links is studied. A noticeable intensification of the vortex (an increase of western wind velocities) was revealed at all the stratospheric levels. It was shown that auroral activity (precipitations of auroral electrons generating bremsstrahlung X-rays) may be another possible factor of the vortex intensification. The obtained results provide evidence that ionization changes associated with powerful Solar Proton Events and auroral activity may influence the state of the stratospheric polar vortex on the day-to-day timescale. A possible reason of the vortex intensification seems to be temperature variations associated with changes of chemical composition of the polar atmosphere caused by ionization changes.

Диффузия как диссипативный механизм в вырожденном *пре-веществе*

Краав К. Ю.¹, Гусаков М. Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kirill-kraav@yandex.ru

В данной работе изучается влияние диффузии на распространение акустических волн в вырожденном многокомпонентном веществе. Рассматриваются два сценария: в первом предполагается, что все компоненты вещества являются нормальными, а во втором изучается вещество, в котором одна компонента является полностью сверхтекучей.

Показано, что влияние диффузии на распространение акустических волн в таком веществе приводит к появлению у них характерного времени затухания, для расчета которого были выведены аналитические формулы в каждом из описанных сценариев. Применение полученных результатов к вырожденному *пре*-веществу показало, что диффузионная диссипация в нормальном веществе является крайне слабой и может не рассматриваться в присутствии более сильных механизмов диссипации, таких как вязкость. Если же рассматривать *пре*-вещество, в котором протоны являются полностью сверхтекучими, то, наоборот, именно диффузия оказывается доминирующим диссипативным механизмом.

The Sobolev approximation for radiative transfer with line overlap and continuous opacity

Нестерёнок А. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alex-n10@yandex.ru

The Sobolev approximation is considered for radiative transfer in moving media. The line overlap and continuous absorption are taken into account. The loss probability functions for photons are calculated using the Doppler line profile. A comparison is made with the calculations where the rectangular line profile is adopted. The results are important for evaluation of the radiation intensity of OH molecule in shock waves.

Солнечная активность и глубинный ход изотопа ¹⁴C в лунном грунте

Фролов Д. А.¹, Дергачев В.А.², Константинов А.Н.¹, Кудрявцев И.В.², Остряков В.М.¹, Павлов А.К.², Васильев Г.И.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: frolov2.da@edu.spbstu.ru

Галактические космические лучи (ГКЛ) вызывают ядерные каскады в атмосфере Земли и лунном грунте. При этом образуются долгоживущие радиоактивные изотопы, в частности, ¹⁴C с периодом полураспада 5700 лет. На основе изотопного анализа зерна лунного грунта, доставленного экспедицией Apollo-15, получен глубинный ход концентрации радиоуглерода [1]. С помощью пакета GEANT4 нами выполнены расчеты распределения по глубине радиоактивных изотопов, образованных в лунном грунте ГКЛ, включая изотоп радиоуглерода. Для расчетов мы использовали экспериментально измеренные в периоды с разной солнечной модуляции спектры протонов и альфа-частиц. Ни для одного спектра расчетные глубинные распределения радиоуглерода не совпадают с экспериментом. Это можно объяснить тем, что лунный грунт является интегральным детектором, и спектры ГКЛ в различные временные интервалы не совпадают с измеренными в 2006-

2015 гг. в ходе миссии PAMELA [2]. Регистрируемая в образцах грунта активность изотопов накапливается в течение нескольких периодов полураспада, и существенный вклад в современное содержание радиоуглерода оказывают ГКЛ, приходящие к Луне в более ранние периоды с другими видами спектра, а также неточности определения функции выхода ^{14}C при расчете по GEANT4. Наилучшее согласие результатов расчетов с данными изменений достигается при учёте вклада периодов с различными гелиосферными модуляционными потенциалами, восстановленными из данных по содержанию изотопа ^{14}C в земной атмосфере [3] за длительный промежуток времени с учетом изменений климата и геомагнитного поля, и уменьшении функции выхода ^{14}C на $\sim 40\%$ вне зависимости от начальной энергии падающих частиц. Обсуждаются возможные приложения полученных результатов для восстановления солнечной активности и других астро и геофизических процессов в прошлом.

Список литературы

1. Jull A.J. et al. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62, p. 3025, 1998.
2. Adriani O. et al. *Rivista Nuovo Cimento* 40, p. 473, 2017.
3. Kudryavtsev I.V., Dergachev V.A. *Geomagnetism and Aeronomy* 59, p. 1099, 2019

Entrainment matrix for Brussels-Montreal BSk24 energy-density functional

Кантор Е. М.¹, Гусаков М.Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kantor.elena.m@gmail.com

At not too high temperatures baryons in neutron star interiors become superfluid/superconducting, forming mixture of superfluid/superconducting liquids. Thus to describe dynamic processes in superfluid neutrons stars, such as stellar oscillations or glitches, one needs to know densities of superfluid components in this mixture. They are characterized by so-called entrainment matrix, generalization of superfluid density notion to mixtures. We calculate entrainment matrix elements for one of the latest Brussels-Montreal energy-density functionals, BSk24. We analyze various limits and check that stability criteria related to entrainment matrix elements hold for this functional. Our calculation allows to model dynamic processes in neutron stars self consistently, using one and the same energy-density functional for calculations of equation of state and entrainment matrix.

Quasi-periodic oscillations of the gamma-ray burst GRB190114C light curve

Драниевич В. А.¹, Соавтор Дмитриев П.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.dranevich@mail.ioffe.ru

Гамма- всплеск GRB190114C – один из самых ярких гамма- всплесков, обнаруженных к настоящему времени. Это событие интересно тем, что были зарегистрированы фотоны в диапазоне энергий от единиц кэВ до сотен ГэВ. Для объяснения всплеска Руффини и др. [1] предложили сценарий, согласно которому источником была двойная система, располагающаяся на расстоянии, соответствующем красному смещению $z = 0.425$, и состоящая из массивной звезды с углерод-кислородным ядром, и нейтронной звезды. При взрыве массивной звезды, как сверхновой, гипераккреция вещества ее оболочки на нейтронную звезду вызвала коллапс последней с образованием черной дыры. В работе Руффини и др. [2] было показано, что каждой стадии предложенного сценария соответствует свой эпизод световой кривой гамма-всплеска.

Для выяснения динамики процессов мы выполнили поиск скрытых квазипериодических осцилляций во временной структуре световой кривой гамма-всплеска. Использовались данные, полученные гамма- телескопом «BAT» на борту спутника «SWIFT» в диапазоне энергий 15-350 кэВ с временным разрешением 64 мс и данные детекторов NaI и BGO аппарата «FERMI», которые были преобразованы к временному разрешению 64 мс для сопоставимости результатов с наблюдениями гамма- телескопа «BAT».

В результате анализа были обнаружены квазипериодические колебания на стадии процесса, соответствующей аккреции вещества на образовавшуюся черную дыру. Рассмотрено поведение квазипериодических компонентов в зависимости от энергии гамма-квантов.

Список литературы

1. Ruffini R. et.al. On the role of a cavity in the hypernova ejecta of GRB190114C. *Ap.J.* 2019, v. 883. p. 191.
2. Ruffini R. et.al. Self- similarity and power- laws in GRB190114C. arXiv: 1904.04162 [astro-ph.HE] 8 Apr 2019

Аналитическое описание двухзонной диффузии позитронов и электронов при распространении от пульсаров

Осипов С. М.¹, Быков А. М.¹, Петров А. Е.¹, Романский В. И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: osm2004@mail.ru

Наблюдения состава космических лучей с помощью обсерваторий PAMELA и AMS-2 показали избыточные потоки позитронов на энергиях выше 10 ГэВ по сравнению с ожидаемыми потоками позитронов – продуктов реакций первичных космических лучей при их распространении в Галактике от источников. Одним из возможных объяснений

избыточного потока позитронов вблизи Земли является наличие источников, ускоряющих позитроны до энергий порядка десятков ТэВ. Наиболее вероятными кандидатами в такие источники являются пульсары. Современные теории и наблюдения пульсаров показывают, что пульсарный ветер состоит из электрон-позитронной плазмы; часть частиц в пульсарном ветре ускорены до энергий порядка десятков ТэВ, и их распределение может содержать в себе значительную долю теряемой вращательной энергии замедляющегося пульсара. Основной вклад в наблюдаемый поток позитронов может давать близкий к Земле пульсар, обладающий значительной скоростью потери вращательной энергии. Во многих работах предполагается, что таким источником может быть пульсар Geminga. В работе [1] на основе наблюдений в гамма-диапазоне обсерватории HAWC был сделан вывод, что коэффициент диффузии позитронов в окрестности нескольких десятков пк вблизи пульсара Geminga имеет значение на несколько порядков ниже среднего межзвездного. Предположение [1], что этот малый коэффициент диффузии позитронов одинаков во всей области между пульсаром Geminga и Землей, приводит к малому значению вблизи Земли потока позитронов от пульсара Geminga. Это объясняется тем, что диффузионное время становится больше возраста пульсара для частиц с энергиями сотни ГэВ и ниже и, соответственно, они не успевают дойти до Земли, а также больше времени потерь энергии на комптоновское и синхротронное излучение частиц с энергией выше ТэВ. Решение данной проблемы было предложено в работе [2], где было предположено, что значение коэффициента диффузии меняется при удалении от пульсара Geminga и на расстоянии нескольких десятков пк увеличивается до среднего межзвездного. В работе [2] приведено численное решение диффузионных уравнений с потерями для двухзонной модели коэффициента диффузии. Получено, что, если коэффициент диффузии меняется с малого значения (примерно на два порядка меньше конечного) на средний межзвездный на расстоянии порядка 40 пк от пульсара Geminga, то спектральные потоки позитронов, создаваемые пульсаром Geminga, сравнимы с наблюдаемыми, и рассчитанное гамма-излучение вблизи пульсара также согласуется с наблюдениями обсерватории HAWC. Модель распространения частиц, имеющая две зоны значений коэффициента диффузии в зависимости от расстояния до источника, допускает аналитические решения с учетом потерь энергии [3]. Аналитические решения по сравнению с численными позволяют гораздо проще рассчитывать модельные спектры. В данной работе мы получили аналитическую функцию Грина в двухзонной модели коэффициента диффузии с учетом потерь энергии частиц на комптоновское и синхротронное излучение. Приводится сравнение результатов данной работы и работы [3]. Также показано, к каким различиям в модельных спектрах позитронов вблизи Земли приводит различие решений данной работы и работы [3].

Список литературы

1. A.U. Abeysekara et al., Extended gamma-ray sources around pulsars constrain the origin of the positron flux at Earth, *Science*, Vol. 358, 911-914, 2017
2. K. Fang, X.-J. Bi, P.-F. Yin, and Q. Yuan, Two-zone Diffusion of Electrons and Positrons from Geminga Explains the Positron Anomaly, *The Astrophysical Journal*, Vol. 863, 30-35, 2018
3. X. Tang and T. Piran, Positron flux and γ -ray emission from Geminga pulsar and pulsar wind nebula, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Vol. 484, 3491–3501, 2019

Структура кристаллической коры нейтронной звезды при учёте поляризации электронного фона

Кожберов А. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kozhberov@gmail.com

Как известно, кора старых нейтронных звёзд состоит из вырожденного релятивистского электронного газа и голых атомных ядер, упорядоченных в кристаллическую решётку. Тип решётки, который образуют ионы, может зависеть от многих параметров, например, от внешнего магнитного поля, температуры (T) и концентрации ионов (n). В данной работе рассматривается влияние поляризации электронного фона на тип решётки при нулевой температуре (при $T=0$ образуется тот кристалл, электростатическая энергия которого меньше), используется несколько приближений для описания фона. Так, если фон описывается простейшей моделью Томаса-Ферми, влияние поляризации определяется только параметром $\kappa_{TF}a$, где κ_{TF} — волновое число Томаса-Ферми, $a = \left(4\pi \frac{n}{3}\right)^{-1/3}$ — радиус ионной сферы. В случае слабого экранирования ($\kappa_{TF}a < 1$) минимальной энергией обладает ОЦК решётка, а в случае сильного экранирования при $\kappa_{TF}a > 1.066$ уже ГЦК решётка. Это хорошо согласуется с результатами молекулярно-динамических симуляций [1]. Электростатические энергии других решёток всегда больше, чем у ГЦК, и их образование маловероятно. В модели Янковичи энергия статической решётки зависит не только от $\kappa_{TF}a$, но и от релятивистского параметра электрона x . В этом случае множество типов решёток, образование которых возможно в коре нейтронной звезды, более разнообразно.

Список литературы

1. Hamaguchi S., Farouki R.T., Dubin D.H.E., Triple point of Yukawa systems, Phys. Lett. E., vol. 56, P. 4671–4682, 1997

Номер проекта РФФИ: 18-32-20170

Поиск гамма-излучения от гравитационно-волновых событий по данным Конус-Винд

Ридная А. В.¹, Свинкин Д. С.¹, Фредерикс Д. Д.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ridnaia@mail.ioffe.ru

В ходе трёх периодов наблюдений гравитационных волн (GW) обсерваториями LIGO и Virgo проводившихся с сентября 2015 по настоящее время (февраль 2020) было детектировано 62 события, среди которых только два надёжно отождествлены со слиянием нейтронных звёзд GW170817/GRB~170817A и S190425z, а остальные являются слияниями двойных чёрных дыр [1, 2].

Единственным событием, сопровождавшимся детектированием электромагнитного излучения, было GW170817. Отождествление GW событий в электромагнитном, в

частности, гамма-диапазоне является важной задачей, так как позволяет изучить процессы, происходящие в течение (или сразу после) события, в непосредственной близости от образовавшегося компактного объекта.

Области локализаций GW событий имеют площади от десятков до тысяч угловых градусов, что осложняет поиск сопутствующего гамма-транзientа, например, для околоземных космических обсерваторий Fermi и Swift часть локализации GW события может быть затенена Землёй.

Эксперимент Конус-Винд (KW) [3] представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр с двумя детекторами NaI(Tl), разработанными в ФТИ и установленными на КА Wind (NASA), который в настоящее время находится на орбите вокруг точки Лагранжа L1 системы Земля-Солнце и непрерывно наблюдает всю небесную сферу в диапазоне энергий квантов 20 кэВ-15 МэВ.

В данной работе представлены методика и результаты поиска гамма-транзientов вблизи GW событий по данным KW. Проведен анализ чувствительности детекторов KW в зависимости от местоположения источника всплеска и его спектра и получены значения верхних пределов на гамма-излучение для отдельных GW событий, в том числе для S190425z, локализация которого была частично затенена для Fermi [4]. Обсуждаются возможности KW по детектированию слабых всплесков схожих с GRB~170817A.

Список литературы

1. Abbott et al. GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs // Physical Review X 9, 031040, 2019
2. GraceDB – Gravitational-Wave Candidate Event Database
<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O3/>
3. Aptekar, Frederiks, Golenetskii et al. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft // Space Sci. Rev. 71, 265, 1995
4. Fletcher LIGO/Virgo S190425z: Fermi GBM Observations 24185 // GCN circ. 24185
<https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/24185.gcn3>

Сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon – статус и перспективы

Монхоев Р. Д. от коллаборации TAIGA

НИИПФ ИГУ

e-mail: makaay08@rambler.ru

Сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon входят в состав единого экспериментального комплекса, который также включает в себя широкоугольные черенковские установки Тунка-133 [1] и TAIGA-HiSCORE [2, 3], атмосферные черенковские телескопы установки TAIGA-IACT [3] и радиополотенки установки Tunka-Rex [4]. Данный комплекс располагается в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), в 50 км от озера Байкал и нацелен на изучение энергетического спектра и массового состава заряженных космических лучей, поиск диффузного гамма-излучения и исследование локальных источников гамма-квантов с энергиями более 30 ТэВ.

В докладе приведено описание сцинтилляционных установок Tunka-Grande и TAIGA-Muon, представлены предварительные результаты ограничения на поток диффузного гамма-излучения с энергией свыше 50 ПэВ по данным установки Tunka-Grande, а также указаны перспективы поиска диффузных гамма-квантов с энергией более 100 ТэВ на установке TAIGA-Muon.

Список литературы

1. Berezhnev S. F., Besson D., Budnev N.M., Chiavassa A., Chvalaev O. A., Gress O. A., Dyachok A. N., Epimakhov S. N., Haungs A., Karpov N. I. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. 692. P. 98.
2. Tluczykont M., Hampf D., Horns D., Spitschan D., Kuzmichev L., Prosin V., Spiering C., Wischnewski R. // Astroparticle Physics. 2014. 56. P. 42.
3. Yashin I. I., Astapov I. I., Barbashina N. S., Bogdanov A. G., Boreyko V., Budnev N. M. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. 675. 032037
4. Fedorov O., Bezyazeev P. A., Budnev N. M., Chernykh D., Gress O. A., Haungs A., Hiller R., Huege T., Kazarina Y., Kleifges M. et al. // PoS. (ICRC 2017). P. 387.

Номер проекта РФФИ: 19-52-44002

Анализ временной структуры потока мягкого рентгеновского излучения Солнца на протяжении 24-го цикла солнечной активности

Дмитриев П. Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: paul.d@mail.ioffe.ru

При помощи космических аппаратов за последние десятилетия были получены многочисленные изображения Солнца в диапазоне мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Благодаря этим наблюдениям было установлено, что МРИ исходит от «ярких» (горячих) петель магнитных активных областей, основы которых уходят под фотосферу, а вершины расположены в короне. Горячая плазма, заполняющая магнитные петли, является источником «квазитеплого» рентгеновского излучения, которое формирует медленно меняющуюся (десять дней) «фоновую» составляющую МРИ Солнца, а происходящие в этих структурах скоротечные во времени (минуты, часы) солнечные вспышки дают резкое увеличение потока МРИ, которое на несколько порядков превышает «фоновое». Следовательно, МРИ можно использовать в качестве индикатора солнечной активности (СА): «фоновая» составляющая отражает интенсивность образования в атмосфере Солнца активных магнитных областей, а «вспышечная» – их эволюцию. Поэтому для изучения вариаций проявления СА на уровне солнечной короны, как основного источника излучения Солнца в диапазоне МРИ, на протяжении последнего 24-го цикла СА в настоящей работе используются данные спутников серии GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellites) [1], которые осуществляют патрульное измерение МРИ Солнца на протяжении последних трех одиннадцатилетних циклов СА в диапазонах длин волн 1-8 Å и 0.5-4 Å.

На основе разработанного метода объединения многочисленных разрозненных во времени однотипных рядов измерений в единый средневзвешенный ряд [2] по данным

спутников серии GOES был синтезирован единый ряд посуточных данных МРИ Солнца на протяжении 24-го цикла СА, а затем из него были выделены «вспышечная» и «фоновая» составляющие.

Затем обе эти составляющие при помощи метода построения комбинированной спектральной периодограммы (КСП) [3] были исследованы на предмет наличия квазипериодических осцилляций на различных стадиях солнечного цикла. Часть значений выявленных квазипериодов может быть объяснена как синодическим, так и сидерическим вращением Солнца, а остальные значения отражают средние времена «жизни» активных образований солнечной фотосферы и короны (групп солнечных пятен, факельных площадок, взаимодействующих корональных петель).

Особое внимание было уделено изучению временного изменения параметров выявленных квазипериодических компонентов на протяжении стадий роста и спада солнечного цикла путем построения выборочной оценки нормированной спектральной плотности исследуемых данных в скользящем временном окне величиной до года.

Список литературы

1. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/xray/>
2. Raspopov O.M., Lopatin E.V., Kolstrom T., Dergachev V.A., Dmitriev P.B., Kahle H.P., Spiecker H., Spatial Structure of Periodicity in the Conifer Tree Radial Increment in the Republic of Komi, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, V.49, No.8, 799–811, 2013
3. Dranevich V.A., Dmitriev P.B, and Gnedin Yu.N., Quasiperiodic oscitation of brilliancy curvature GRB 080319B, *Astrophysics*, V.52, No.4, P. 534-544. 2009

Субсекундные пульсации в жёстком рентгеновском излучении солнечных вспышек по данным КОНУС-ВИНД и BATSE

Глобина В. И.¹, СклярOVA Е.М.¹, Чариков Ю.Е.¹, Шабалин А.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: sklyarova.mhd@mail.ioffe.ru

Выявление квазипериодических субсекундных пульсаций в жёстком рентгеновском излучении солнечных вспышек дает полезную информацию о процессах ускорения электронов во вспышечных областях. Для поиска таких пульсаций мы использовали аппараты, регистрирующие ЖР излучение с высоким временным разрешением (0.016 с, 0.064 с), – КОНУС-ВИНД и BATSE – в режиме триггера. Оба аппарата регистрируют излучение с разрешением 0.016 с. в первые 32.8 с., затем – 0.064 с. Спектрометр КОНУС регистрирует кванты в 2-х энергетических каналах в интересующей нас области энергий – (20.7–78.8) кэВ и (78.8–315.2) кэВ, BATSE – в 10-ти каналах в диапазоне (25–313) кэВ. Сопоставляя данные обоих приборов, можно получать более достоверные результаты, а также, используя многоканальность BATSE, энергетическую зависимость выявленных пульсаций. Исследовались солнечные вспышки X-класса, произошедшие в период совместной работы КОНУС-ВИНД и BATSE (1996 – 2002 гг.). Одним из наиболее удачных событий для совместного анализа является вспышка 24.11.1998г. (02:11:31UT) класса X1.0, во время которой триггеры КОНУС-ВИНД и BATSE включились практически одновременно. Для анализа высокочастотных (субсекундных) колебаний прежде всего необходимо вычистить

медленно меняющуюся компоненту, полученную сглаживанием исходной кривой. Далее для спектрального анализа высокочастотных рядов применялись методы БПФ, максимальной энтропии (метод Берга) и вейвлет-анализ. Первоначально проводился спектральный анализ рентгеновского излучения с наибольшим временным разрешением (0.016с). Данные, получаемые КОНУС-ВИНД, имеют особенность: каждые 3 с спектрометр попадает в тень космического аппарата, что вызывает провалы на временных кривых. Поэтому исследовались интервалы между этими провалами. Результаты, полученные методами БПФ и ММЕ, показывают наличие пульсаций $\sim 0.18 - 0.2$ с в первые 32.8с после включения триггера. Данные BATSE анализировались для пяти энергетических каналов 25, 33, 41, 55 и 95 кэВ и подтвердили наличие таких пульсаций.

Особенности спектров и поляризации тормозного излучения электронов, ускоренных во время солнечных вспышек электронов, при развитии пучковой неустойчивости

Чариков Ю. Е.¹, Кудрявцев И.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: y.charikov@yandex.ru

Жесткое рентгеновское излучение (ЖРИ) солнечных вспышек является тормозным излучением высокоэнергичных электронов. Традиционно энергетический спектр ускоренных электронов аппроксимируется степенной зависимостью $E^{-\delta}$. При этом спектр ЖРИ также остается степенным $\varepsilon^{-\gamma}$, где $\gamma = \delta - 1$ и $\gamma = \delta + 1$ в моделях толстой или тонкой мишени. Однако при решении обратной задачи реконструкции энергетических распределений электронов по измеренным спектрам ЖРИ в спектре электронов возможны особенности типа ступенек и инверсий. Платообразные функции распределения в импульсном пространстве возникают в процессе квазилинейной релаксации электронных пучков при их взаимодействии с плазменной турбулентностью, с резким спадом (обрывом) при некоторой граничной скорости. В докладе рассматриваются особенности энергетических спектров и поляризации ЖРИ в области 20 - 150 кэВ, генерируемого электронами с подобными энергетическими распределениями, в моделях тонкой и толстой мишени. При расчетах в рамках толстой мишени учитывается не только энергетические потери электронов при их столкновении с частицами плазмы, но и изменение их углового распределения. При расчете излучения используется релятивистское сечение тормозного излучения. Показано, что обрыв (излом) спектра электронов приводит к изменениям спектров ЖРИ и степени линейной поляризации. Появляется характерное укрупнение спектра ЖРИ около энергии излома. На графике линейной поляризации появляется инверсный участок, на котором поляризация растет, степень поляризации может достигать десятков процентов. Такие значения степени поляризации могут быть измерены, что указывает на необходимость поляриметрических измерений с целью выявления особенностей распределений ускоренных электронов.

Изотопы углерода в космических лучах из данных космического эксперимента PAMELA 2006-2014 гг.

Богомолов Э. А.¹, Васильев Г.И.¹, Менн В.²,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет Зиген, Германия

e-mail: Edward.Bogomolov@gmail.com

Анализ изотопного состава ядер в галактических космических лучах (ГКЛ) в орбитальном эксперименте коллаборации PAMELA позволяет исследовать проблемы происхождения и распространения космических лучей в Галактике. Данные магнитного спектрометра PAMELA, благодаря высокой статистической и методической точности, обеспечили значительный прогресс в исследовании изотопного состава лёгких ядер от H до Be в ГКЛ в энергетической области ~ 0.1 - 1 ГэВ/нуклон и впервые позволили оценить вклад в ГКЛ локальных источников от близких (~ 100 пс) недавних (\sim млн. лет) взрывов сверхновых. Изотопный анализ ядер углерода в ГКЛ к настоящему времени проведен только для $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -отношения в энергетической области ~ 0.05 - 0.13 ГэВ/нуклон в космических экспериментах Voyager 1,2 в 1977-1993 гг. В настоящей работе с использованием полётных данных PAMELA 2006-2014 гг. о жёсткости регистрируемых ядер и их скорости (времяпролётный анализ и ионизационные потери в многослойном калориметре прибора) предпринята попытка определить впервые изотопный состав ядер углерода в области энергий ~ 0.1 - 0.9 ГэВ/нуклон. Неожиданным результатом анализа явилось обнаружение в ГКЛ нестабильных ядер ^{14}C . Период полураспада ядер ^{14}C – 5730 лет и они могли возникнуть при взрыве сверхновой в последние ~ 10 тыс. лет на расстоянии до ~ 1 -2 кпс, т.е. иметь локальную природу. Анализ энергетической зависимости $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -отношения вероятно позволит уточнить эти оценки. В экспериментах Voyager 1,2 ядра ^{14}C не могли наблюдаться при малых энергиях из-за их распада по пути от источника. Результаты изотопного анализа ядер углерода в ГКЛ (спектры ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C и $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ - отношение в зависимости от жёсткости и энергии ядер) в сравнении с существующими данными измерений и расчётами будут представлены.

Список литературы

1. Adriani O., Barbarino G.C., Bogomolov E.A. et al., Ten Years of PAMELA in Space, Rivista del Nuova Cimento, V.40, Issue 10, P.473-522, 2017;
2. Webber W.R., Lukasiak A., McDonald F.B., Ferrando P., New High-Statistical-High-Resolution Measurements of the Cosmic-Ray CNO Isotopes from a 17 year Study using the VOYAGER 1 and 2 Spacecraft, Astrophys. J., V.457, P.435-439, 1996;
3. Богомолов Э.А., Васильев Г.И. от коллаборации PAMELA, Изотопы Li и Be в эксперименте PAMELA из полётных данных 2006-2014 гг., Изв. РАН, сер. физ., Т.83, №8, С.1068-1071, 2019.

Динамика распространяющихся во вспышечной плазме быстрых электронов с учетом их взаимодействия с плазменной турбулентностью

Ватагин П. В.¹, Кудрявцев И.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: pavelvat@gmail.com

Изучению распространения ускоренных во время солнечных вспышек электронов посвящено множество работ. Главное внимание в этих работах уделяется кулоновским столкновениям этих частиц с частицами фоновой плазмы, часто учитывается пространственное изменение концентрации плазмы и величины магнитного поля. Это позволяет рассчитать функцию распределения быстрых электронов во вспышечной плазме и получить характеристики генерируемого этими электронами жесткого рентгеновского и радиоизлучений. Характеристики этих излучений измеряются с помощью космических аппаратов и радиотелескопов. Последующее сравнение этих характеристик с результатами модельных расчётов помогает диагностировать характеристики функции распределения ускоренных электронов. Меньшее внимание уделяется изучению распространения быстрых электронов во вспышечной плазме с учетом их взаимодействия с плазменными волнами. Известно, что быстрые электроны могут взаимодействовать с плазменными волнами, вызывая резонансную раскачку этих волн с уровня тепловых флуктуаций и приводя к появлению плазменной турбулентности. Радиоизлучение, порождаемое этой турбулентностью, регистрируется радиотелескопами. Кроме этого, при взаимодействии быстрых электронов с плазменными волнами изменяется и сама функция их распределения, что надо учитывать при интерпретации результатов наблюдений солнечных вспышек.

В данном докладе рассматривается задача о распространении быстрых электронов во вспышечной плазме при учете их взаимодействия с плазменными (ленгмюровскими) волнами. Рассматривается система из двух нестационарных дифференциальных уравнений для функции распределения электронов и спектральной плотности энергии волн в одномерном приближении. Система уравнений решалась с использованием метода суммарной аппроксимации. В результате численного моделирования получены решения для различных моментов времени на различных расстояниях от места инжекции (ускорения) электронов во вспышечную петлю. В частности, для случая импульсной инжекции (длительностью ~ 1 мс) быстрых электронов со скоростью 10^{10} см/с во вспышечную петлю происходит быстрая потеря их энергии из-за возбуждения ленгмюровских колебаний. При этом, за время $\sim 10^{-4}$ с происходит формирование турбулентного слоя в солнечной плазме протяженностью до 10^6 см с высоким уровнем турбулентности, радиоизлучение от которого может регистрироваться радиотелескопами.

Межзвёздное вещество в галактиках на больших красных смещениях

Теликова К. Н.¹, Балашев С.А.¹, Нотердам П.², Крогагер Д.К.², Ранжан А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Institut d'Astrophysique de Paris

e-mail: ks.telikova@mail.ru

Один из наиболее эффективных методов изучения межзвёздного вещества галактик на больших красных смещениях – это анализ абсорбционных линий в спектрах далёких квазаров. Излучение квазара частично поглощается при прохождении через межзвёздные облака удалённой галактики, и в спектре квазара образуются Дэмпфированные Лайман-Альфа (ДЛА) системы – абсорбционные системы, в которых, помимо линий нейтрального водорода, идентифицируются линии металлов различной степени ионизации, а в некоторых случаях и молекулы H_2 , HD , CO . В последнее время было показано, что подкласс так называемых сверхнасыщенных ДЛА систем – ДЛА систем с максимальными лучевыми концентрациями нейтрального водорода ($> 10^{21.7} \text{ см}^{-2}$), ассоциируется с галактиками, просечёнными с малым прицельным параметром (< 8 кпк), в отличие от обычных ДЛА систем, которые в большинстве известных случаев имеют значительный прицельный параметр ($= 20 - 100$ кпк). Таким образом, анализ сверхнасыщенных ДЛА систем позволяет изучать центральные части удалённых галактик.

В работе представлен анализ 7 сверхнасыщенных ДЛА систем с красными смещениями $z = 2 - 3$, спектры которых были получены при помощи спектрографа среднего разрешения X-shooter, установленного на телескопе VLT. В результате анализа для каждой системы нами получены оценки на лучевую концентрацию нейтрального водорода, химический и ионизационный состав вещества, распространённости тяжёлых элементов, а также верхний предел на содержание молекулярного водорода и излучение в эмиссионных линиях OIII и H β .

Номер проекта РФФИ: 18-02-00596

Субсекундные пульсации в жёстком рентгеновском излучении солнечных вспышек по данным КОНУС-ВИНД и BATSE

Шувалова В. И.^{1,2}, Склярова Е.М.², Чариков Ю.Е.², Шабалин А.Н.²

¹ГАО РАН, ²ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: gvi1109@gmail.com

Выявление квазипериодических субсекундных пульсаций в жестком рентгеновском излучении солнечных вспышек дает полезную информацию о процессах ускорения электронов во вспышечных областях. Для поиска таких пульсаций мы использовали аппараты, регистрирующие ЖР излучение с высоким временным разрешением (0.016 с, 0.064 с), – КОНУС-ВИНД и BATSE – в режиме триггера. Оба аппарата регистрируют излучение с разрешением 0.016 с в первые 32.8 с., затем – 0.064 с. Спектрометр КОНУС регистрирует кванты в 2-х энергетических каналах в интересующей нас области энергий – (20.7–78.8)

кэВ и (78.8–315.2) кэВ, BATSE – в 10-ти каналах в диапазоне (25—313) кэВ. Сопоставляя данные обоих приборов, можно получать более достоверные результаты, а также, используя многоканальность BATSE, энергетическую зависимость выявленных пульсаций. Исследовались солнечные вспышки X-класса, произошедшие в период совместной работы КОНУС-ВИНД и BATSE (1996 – 2002 гг.). Одним из наиболее удачных событий для совместного анализа является вспышка 24.11.1998г. (02:11:31UT) класса X1.0, во время которой триггеры КОНУС-ВИНД и BATSE включились практически одновременно. Для анализа высокочастотных (субсекундных) колебаний прежде всего необходимо вычлест медленно меняющуюся компоненту, полученную сглаживанием исходной кривой. Далее для спектрального анализа высокочастотных рядов применялись методы БПФ, максимальной энтропии (метод Берга) и вейвлет-анализ. Первоначально проводился спектральный анализ рентгеновского излучения с наибольшим временным разрешением (0.016с). Данные, получаемые КОНУС-ВИНД, имеют особенность: каждые 3 с спектрометр попадает в тень космического аппарата, что вызывает провалы на временных кривых. Поэтому исследовались интервалы между этими провалами. Результаты, полученные методами БПФ и ММЕ, показывают наличие пульсаций ~0.18 – 0.2 с в первые 32.8с после включения триггера. Данные BATSE анализировались для пяти энергетических каналов 25, 33, 41, 55 и 95 кэВ и подтвердили наличие таких пульсаций.

Остывание нейтронных звёзд со сверхтекучими недрами: универсальные характеристики и их приложения

Офенгейм Д. Д.¹, Штернин П. С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ddofengeim@gmail.com

Считается, что нуклоны в ядрах нейтронных звёзд (НЗ) могут находиться в сверхтекучем состоянии. Различные теоретические модели предсказывают разные значения критических температур и различные профили их зависимости от плотности среды. Сверхтекучесть нуклонов сильно влияет на излучение нейтрино из недр НЗ, ответственное за их остывание. В ядре НЗ сверхтекучесть протонов должна возникать по синглетному каналу спаривания, а сверхтекучесть нейтронов – по триплетному каналу. Когда в ходе остывания НЗ в её ядре появляется слой с нейтронной сверхтекучестью, в нём включается мощный процесс излучения нейтрино при образовании куперовских пар нейтронов (CPF-процесс). Это приводит к заметному ускорению остывания звезды. Весьма вероятно, что такое остывание в реальном времени наблюдается у НЗ в остатке сверхновой Cas A [1].

В данной работе верхний предел нейтринной светимости за счёт CPF-процесса для НЗ с нуклонными ядрами аппроксимирован аналитическим выражением, универсальным относительно модели уравнения состояния вещества НЗ и зависящим только от её массы, радиуса и максимальной критической температуры нейтронной сверхтекучести в её ядре. С помощью этой аппроксимации установлены ограничения на феноменологические коэффициенты в соотношениях самоподобия [2], которыми описывается остывание НЗ после включения в её недрах CPF-процесса. Применение этих соотношений к анализу новейших данных наблюдений остывания НЗ в остатке сверхновой Cas A [3] позволило

оценить максимальную критическую температуру триплетной сверхтекучести нейтронов в ядре этой звезды.

Список литературы

1. P.S. Shternin et al. 2011, MNRAS, 412, L108; D. Page et al. 2011, PRL, 106, 08101
2. P.S. Shternin & D.G. Yakovlev 2015, MNRAS, 446, 3621
3. M. Wijngaarden et al. 2019, MNRAS, 484, 974

On the possibility of the measurement of CMBR temperature at high redshift with the use of populations of rotational levels of H₂ and fine-structure levels of CI

Клименко В. В.¹, Ivanchik A.V.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: slava.klimenko@gmail.com

A consistent analysis of populations of rotational levels of H₂ and fine-structure levels of CI in diffuse molecular clouds allows to well constrain the main physical conditions of the interstellar medium (ISM), namely the kinetic temperature, number density and intensity of UV field. It is well known that CI fine-structure levels populate by collisions and UV pumping as well as direct excitation by the Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR). If we can independently constrain the number density and UV intensity, for example, with the analysis of H₂ rotational population, we are able to estimate the temperature of the CMBR.

Моделирование структуры течений и ускорения частиц в пульсарной туманности с головной ударной волной

Петров А. Е.¹, Быков А. М.¹, Осипов С. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.e.petrov@mail.ioffe.ru

Наблюдения указывают на эффективное ускорение электронов и позитронов пульсарного ветра в пульсарных туманностях с формированием протяженных степенных или кусочно-степенных спектров. Для корректной интерпретации наблюдательных данных и понимания природы ускорительных механизмов необходимо кинетическое моделирование распространения ускоренных частиц в сложной структуре течений фоновой плазмы туманности. Для рассмотрения адвективного переноса относительно низкоэнергичных частиц, процессов ускорения Ферми I рода, интерпретации наблюдаемых ярких структур, обусловленных эффектом Доплера, необходима адекватная модель структуры течений туманности. В докладе будут представлены результаты численного магнитогидродинамического моделирования структуры течений пульсарной туманности с головной ударной

волной, кинетическая модель переноса частиц пульсарного ветра в полученной структуре течений и результаты моделирования нетеплового излучения туманности.

Список литературы

1. Bykov A. M., Amato E., Petrov A. E., Krassilchikov A. M. and Levenfish K. P. Pulsar Wind Nebulae with Bow Shocks: Non-thermal Radiation and Cosmic Ray Leptons, *Space Sci. Rev.*, Vol. 207, Issue 1-4, P. 235-290, 2017
2. Buehler R. and Giomi M., The imprint of pulsar parameters on the morphology of Pulsar Wind Nebulae, *MNRAS*, Vol. 462, Issue 3, P. 2762-2776, 2016
3. Porth O., Komissarov S. S. and Keppens R., Three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of the Crab nebula, *MNRAS*, Vol. 438, Issue 1, P. 278-306, 2014

О стабильности тороидальных структур в пульсарных туманностях

Пономарёв Г. А.^{1,2}, Левенфиш К.П.¹, Петров А.Е.¹

¹ФТИ

²СПБПУ

e-mail: georgy.ponomaryov@gmail.com

Пульсарная туманность Вела взаимодействует с натекающим потоком плазмы, вызванным прохождением через туманность обратной ударной волны от взрыва сверхновой, породившей пульсар. Мы исследовали взаимодействие структур туманности с натекающей плазмой при помощи численного МГД моделирования. Показано, что это взаимодействие способствует усилению турбулентности за фронтом ударной волны остановки пульсарного ветра и, тем самым, разрушению стабильных структур в туманности. Несмотря на это, пульсарная туманность Вела поддерживает стабильность своей структуры в течение, как минимум, 10 лет, что указывает на наличие эффективной диссипации магнитной турбулентной энергии во внешних частях туманности.

Спектральная эволюция длинных гамма-всплесков по наблюдениям в эксперименте Конус-Винд

Свинкин Д. С.¹, Уланов М.В.¹, Темираев Ю.Р.², Фредерикс Д.Д.¹, Цветкова А.Е.¹, Дёмин А.Г.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ²СПБПУ

e-mail: svinkin@mail.ioffe.ru

Наблюдаемые спектры гамма-излучения основной фазы гамма-всплесков (prompt emission) существенно нетепловые и, вероятно, сформированы излучением частиц, ускоренных в источнике гамма-всплеска, синхротронным механизмом.

Одним из возможных путей ограничения параметров моделей излучения является исследование временной эволюции спектральных параметров, в том числе, соотношения жесткость-интенсивность в ходе всплеска. Было показано, что для некоторой части гамма-

всплесков выполняется соотношение $E_p \sim F^{0.5}$ (где E_p – пиковая энергия $E_F(E)$ спектра и F – энергетический поток), которое согласуется со стандартной синхротронной моделью излучения.

Существующие исследования спектральной эволюции проводились на относительно небольших наборах, включающих несколько десятков гамма-всплесков, в частности по данным Fermi-GBM в широком энергетическом диапазоне 10 кэВ–40 МэВ [1-3].

За более 25 лет наблюдений с 1994 Конус-Винд зарегистрировал более 3000 гамма-всплесков, для ~10% наиболее ярких событий возможно выполнить детальный анализ спектральной эволюции, что существенно дополнит результаты, полученные по данным других инструментов.

В этой работе представлен предварительный анализ спектральной эволюции длинных гамма-всплесков по данным Конус-Винд. В частности, проводится сравнительный анализ спектральной эволюции излучения отдельных импульсов многоэпизодных событий. В заключение полученные результаты обсуждаются в контексте моделей излучения гамма-всплесков.

Список литературы

1. Yu et al., Bayesian Time-resolved Spectroscopy of GRB Pulses, *Astrophys. J.* 886, 1, 20, 2019
2. Liang, Multipulse Fermi Gamma-Ray Bursts. I. Evidence of the Transition from Fireball to Poynting-flux-dominated Outflow, *Astrophys. J.* 242, 2, 16, 2019
3. Lu et al., A Comprehensive Analysis of Fermi Gamma-Ray Burst Data. II. E_p Evolution Patterns and Implications for the Observed Spectrum-Luminosity Relations, *Astrophys. J.* 756, 112, 2012

Modelling of electron acceleration in relativistic turbulent plasma flow

Романский В. И.¹, Быков А.М.¹, Осипов С. М.¹,

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: romanskyvadim@gmail.com

Недавно открытый новый класс сверхновых [1-3] показывает наличие в них релятивистских течений. Для объяснения наблюдаемых спектров нетеплового излучения этих объектов необходима модель ускорения электронов субрелятивистской ударной волной. Предшествующие численные симуляции методом Particle-in-Cell показали, что для объяснения наблюдаемых спектров необходимо наличие сильной турбулентности перед фронтом ударной волны [4, 5]. В данной работе получены характеристики турбулентности ветра взорвавшейся звезды, необходимые для объяснения наблюдаемых спектров.

Список литературы

1. Soderberg A. M. et al. «A relativistic type Ibc supernova without a detected γ -ray burst» *Nature*, 463, 513-515 2010
2. Margutti R et al. «Relativistic supernovae have shorter-lived central engines or more extended progenitors: the case of sn 2012ap» *Astrophysical. Journal.* 797 107 2014

3. Быков А. М. «Астрофизические объекты с экстремальным энерговыделением: наблюдения и теория» *УФН* 188 894–908 2018
4. Sironi L., Spitkovsky A., Arons J. «The maximum energy of accelerated particles in relativistic collisionless shocks» *The Astrophysical Journal*, Volume 771, Issue 1, article id. 54, 22 pp. 2013
5. Romansky V. I., Bykov A. M. and Osipov S. M. «Modelling of electron acceleration in relativistic supernovae» *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1400, Issue 2, article id. 022005 2019.

Механизмы нейтронного взаимодействия стабильных изотопов, имеющих ковалентную связь

Джимак С. С.^{1,2}, Басов А. А.^{1,3}, Моисеев А. В.⁴

¹КубГУ

²Южный научный центр РАН

³КубГМУ

⁴КубГАУ

e-mail: jimack@mail.ru

Известно, что возникающие колебания концентраций стабильных изотопов биогенных элементов с различным количеством нейтронов являются основой для возникновения термодинамических, кинетических и туннельных изотопных эффектов [1, 2], сопровождающихся замедлением или ускорением химических процессов, а также изменением функциональной активности биологически активных веществ [2, 3]. При этом даже незначительное колебание изотопных соотношений в ряде клеточных структур характеризуется достоверной модификацией физико-химических взаимодействий на различных уровнях организации гетерогенных систем, что ведет к изменению в работе их протективных факторов [4, 5].

Поэтому целью настоящего исследования являлось описание ключевых механизмов возникновения изотопных эффектов на основании подхода, позволяющего получить более полное представление о последствиях накопления определенных фракций стабильных изотопов.

При сравнительном анализе ряда данных экспериментальных исследований была выявлена определенная закономерность (BADz-эффект [2]), характеризующая возникновение «изотопного шока» при образовании связей между атомами с нечетным количеством нейтронов или наличии отдельного химического элемента, у которого наблюдается преобладание нейтронов над протонами, описываемое следующим уравнением: $n - p = 2k + 1$, где $k \in \mathbb{Z}$, n – нейтрон, p – протон, которое требует физического обоснования.

Для описания влияния изотопного состава молекул на скорость биохимических реакций нами выдвигается гипотеза, что стимулирующее либо подавляющее их влияние связано с деформацией химической связи, вызванное изменением изотопного состава и связанному с этой деформацией изменению энергии соответствующей валентной связи. Изменение энергии химической связи обусловлено несколькими факторами, рассмотренными ниже.

Равновесное положение электрона определяет химическую активность соединения, которую можно оценить, вычислив энергию взаимодействия электрона с атомными остовами. Химическая активность валентной связи определяется не только взаимным расположением атомов 1 и 2, но и взаимодействием атомных остовов с валентным электроном. Чем ниже энергия, тем менее активна химическая связь, поэтому тем больше внешняя энергия требуется для активации ковалентной химической связи. На расстояние между атомами и энергию химической связи влияет несколько факторов, причем, в отличие от кулоновского взаимодействия и магнитных моментов валентных электронов, которые,

вероятно, слабо зависят от изотопного состава химических элементов (и в настоящей статье не рассматриваются), взаимодействие магнитных моментов валентных электронов с магнитными моментами ядер атомов; взаимодействие магнитных моментов ядер атомов, приводящее к изменению расстояния между ними; эффект влияния размеров ядра на энергию валентного электрона; тепловые колебания атомов – могут оказывать существенное влияние.

Таким образом, изменение интенсивности изотопного воздействия на естественные гетерогенные системы, происходит не только в зависимости от концентрации отдельных нерадиоактивных изотопов (^{25}Mg , ^{29}Si , ^{67}Zn), но также их способности формировать определенные пары (например, ^{17}O – ^2H , ^{18}O – ^1H , ^{13}C – ^{18}O , ^{12}C – ^{15}N , ^{13}C – ^2H , ^{15}N – ^{18}O), через химические связи которых реализуется, помимо термодинамических и кинетических изотопных эффектов, нейтронное туннелирование, приводящее к появлению парадоксального изотопного эффекта, обусловленного, вероятно нейтронным BADz-эффектом, что в совокупности с термодинамической и кинетической составляющими изотопного влияния на гетерогенную систему, обеспечивает существенные колебания ее функциональной активности при возникновении фракционирования ряда стабильных изотопов. Поэтому косвенным подтверждением реализации нейтронного эффекта могут служить имеющиеся факты селективного накопления отдельных изотопов и их комбинаций в гетерогенных системах по сравнению с окружающей средой, что может быть обусловлено их взаимодействием между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (19-44-233005).

Список литературы

1. Howie R. T., Scheler T., Guillaume C., Gregoryanz E., Proton tunneling in phase IV of hydrogen and deuterium, *Phys. Rev. B.*, V. 86, 214104, 2012.
2. Basov A., Fedulova L., Vasilevskaya E., Dzhimak S., Possible mechanisms of biological effects observed in living systems during $^2\text{H}/^1\text{H}$ isotope fractionation and deuterium interactions with other biogenic isotopes, *Molecules*, V. 24(22), 4101, 2019.
3. Letuta U. G., Berdinskiy V. L., Magnetosensitivity of bacteria *E. coli*: magnetic isotope and magnetic field effects, *Bioelectromagnetics*, V. 38(8), 581-591, 2017.
4. Xie X., Zubarev R. A., Isotopic resonance hypothesis: experimental verification by *Escherichia coli* growth measurements, *Scientific reports*, V. 5, 9215, 2015.
5. Basov A., Fedulova L., Baryshev M., Dzhimak S., Deuterium-depleted water influence on the isotope $^2\text{H}/^1\text{H}$ regulation in body and individual adaptation, *Nutrients*, V. 11(8), 1903, 2019.

Рэлеевское и мандельштам-бриллюэновское рассеяние света в растворах бычьего сывороточного альбумина при различных концентрациях в окрестности тепловой денатурации

Дмитриев А. В., Федосеев А.И., Лушников С.Г.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: dmitrievav@mail.ioffe.ru

Фазовые превращения в ДНК, белках и других биополимерах активно исследуются в последнее десятилетие. Изменения внешних условий, таких как повышение температуры, давления, изменение параметров растворителя или концентрации белков, приводит к изменению пространственной организации вплоть до потери нативного состояния белка. Потеря нативного состояния белка может приводить к возникновению ряда нейродегенеративных заболеваний. Одним из наименее изученных вопросов фазовых превращений биополимеров является взаимосвязь колебательного спектра макромолекул с трансформацией ее пространственной организацией при изменении внешних условий (температура, давление, концентрация и т.д.). В настоящей работе методами рэлеевского и мандельштам-бриллюэновского рассеяния света (МБР), в сочетании с калориметрическими исследованиями, изучалось влияние концентрации белка на последовательность его фазовых превращений. Метод МБР света хорошо себя зарекомендовал и при исследовании температурной денатурации лизоцима и бычьего сывороточного альбумина (БСА) [1, 2], плавления ДНК [3], поскольку структурные изменения биополимеров, находят свое отражение в поведении низкочастотной области колебательного спектра. Так, например, в работе [2], на основе данных по МБР и рэлеевскому рассеянию света была восстановлена вся фазовая диаграмма, показывающая превращений бычьего сывороточного альбумина (БСА) в растворе. Дополнительно к известным состояниям, в концентрированном растворе БСА (концентрация 100 мг/мл) в 0.1 М натрий-фосфатном буфере в области денатурации ($T_m(335\text{ K}) < T < 347\text{ K}$) обнаружена фаза с ориентированными фибрильными структурами. При дальнейшем повышении температуры это состояние преобразуется в гелеобразную фазу, состоящую из двух различных состояний.

Объектом настоящих исследования служил белок БСА (Sigma, O40M 1649) с молекулярной массой 69 kDa. Белок растворялся в натрий-фосфатном буфере с ионной силой 0.1 М. Концентрация растворенного белка в буфере составляла 5 мг/мл. Для анализа рассеянного света применялся 3х проходной интерферометр Фабри-Перо. В качестве источника света выступал аргоновый лазер с длиной волны 488 нм. Температура в ходе эксперимента изменялась от 290 до 363 К. Полученные экспериментальные спектры (для каждой температуры) обрабатывались и строились температурные зависимости таких параметров рассеянного света, как сдвиг частоты, полуширина и интенсивность дублетов Мандельштама-Бриллюэна, а также интенсивность рэлеевского рассеяния. Это позволило восстановить фазовую диаграмму, отражающую всю последовательность фазовых превращений при тепловой денатурации БСА в слабо концентрированном растворе и сопоставить ее с известной диаграммой сильно концентрированного белкового раствора. Показано, что уменьшение концентрации приводит к существенной модификации последовательности фазовых превращений БСА, исчезновению упорядоченной фазы и образованию гелеобразной фазы, отличающейся по свойствам от подобной фазы в концентрированном растворе белка. Результаты работы по влиянию концентрации на последовательность фазовых превращений БСА в растворе обсуждаются в рамках современных представлений о динамике биополимеров.

Список литературы

1. А. В. Сванидзе, В. П. Романов, С. Г. Лушников, “Аномальное поведение мандельштам-бриллюэновского рассеяния света при тепловой денатурации лизоцима”, *Письма в ЖЭТФ*, 93:7 (2011), 453–458
2. A.V. Dmitriev, V.E. Vashchenkov, A.I. Fedoseev, S.G. Lushnikov “Phase transformations of bovine serum albumin: Evidences from Rayleigh-Brillouin light scattering”, *J. Raman Spectrosc*, 50:4 (2019), 537-547
3. S. G. Lushnikov, A. V. Dmitriev, A. I. Fedoseev, G. A. Zakharov, A. V. Zhuravlev, A. V. Medvedeva, B. F. Schegolev, E. V. Savvateeva-Popova, “Low-frequency dynamics of DNA in Brillouin light scattering spectra”, *Письма в ЖЭТФ*, 98:11 (2013), 830–836

Модель генерации флуоресцентного сигнала интеркаляционным красителем в ходе полимеразной цепной реакции

Федоров А. А.¹

¹ИАП РАН

e-mail: f_aa@mail.ru

Полимеразная цепная реакция в реальном времени (ПЦР-РВ) является ключевым молекулярно-генетическим методом, применяемым для решения широкого круга научных и практических задач выявления и количественного анализа специфических последовательностей ДНК. В основе метода лежит термоуправляемое циклическое копирование определенного фрагмента ДНК, выделяемого специфическими одноцепочечными ДНК – праймерами. На каждом цикле реакции происходит удвоение количества фрагментов исходной ДНК вплоть до исчерпания ресурсов реакционной смеси. Использование флуоресцентных репортеров позволяет проявить кумулятивную кривую накопления копий исходного фрагмента ДНК (кривую ПЦР-РВ) в виде дискретной функции в координатах «номер цикла» – «уровень флуоресценции». Одним из наиболее распространенных флуоресцентных репортеров являются т.н. интеркаляционные красители (ИК). ИК представляют собой органические молекулы, способные в десятки раз усилить свой флуоресцентный отклик, при обратимом связывании с двойными цепями ДНК.

На данный момент предложен ряд моделей ПЦР [1-5], однако все они претендуют в лучшем случае на полуколичественное описание тех или иных аспектов реакции. Одним из важных вопросов моделирования является вопрос о возможности отождествления кумулятивной кривой накопления копий фрагмента ДНК и флуоресцентного сигнала репортера, в частности, ИК. При моделировании авторы либо отождествляют эти функции, либо используют простую линейную зависимость для их взаимного пересчета [4, 5].

В данной работе предлагается модель ПЦР-РВ, позволяющая исследовать как кинетику накопления копий фрагмента ДНК, так и сигнала ИК. Модель основывается на уравнениях массообмена химической кинетики. Модель рассматривает следующую схему реакции ПЦР-РВ. На первой стадии цикла ПЦР реакционная смесь нагревается, в результате чего происходит денатурация двухцепочной ДНК на две комплементарные одноцепочные молекулы. Далее смесь охлаждается, наступает стадия отжига, на которой праймеры взаимодействуют с одноцепочечными цепями. В случае комплементарности

последовательностей праймера и ДНК они образуют комплекс. Далее наступает черед стадии элонгации, на которой фермент, начиная с места посадки праймера. В результате образуется двухцепочечная копия исходного фрагмента ДНК. Молекулы ИК, связываясь со всеми двойными цепями, присутствующими в реакции, инициируют флуоресцентный отклик системы, прямо пропорциональный их концентрации. Для описания работы ИК в модели была предложена линейная функция, аргументом которой выступало отношение концентрации свободного ИК к концентрации связанного ИК.

Реализация предложенной модели была выполнена в виде программы на языке на C++. Программа позволяла повторять численные модельные вычисления заданное количество раз, имитируя необходимое количество последовательных циклов реакции, что позволяло получить модельные дискретные кривые ПЦР-РВ. Сопоставление экспериментальных и модельных данных продемонстрировало адекватность предложенной модели. С помощью модели был проведен сравнительный анализ кумулятивных кривых сигнала ИК и копий исходной ДНК. В результате было показано, что кинетика этих кривых существенно различается. Кроме того, кривая флуоресцентного сигнала "отстает" от кривой накопления копий почти на 1 цикл. Если использовать аппроксимацию флуоресцентного сигнала модельной кривой для анализа концентрации фрагментов в образце, то концентрация, полученная на основе модели, учитывающей только количество фрагментов, будет почти в два раза отличаться от реальной.

Таким образом, с помощью предложенной модели впервые было показано, что кривые накопления ДНК и сигнала связанного ИК не совпадают и не могут быть получены простым линейным пересчетом для всего диапазона ПЦР-РВ кривой.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания № 075-01073-20-00 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Gevertz J.L., Dunn S.M., Roth C.M., Mathematical Model of Real-Time PCR Kinetics, *Biotechnology and bioengineering*, vol 92, 346–355, 2005.
2. Lee J.Y., Lim H.W., Yoo S.I., Zhang B.T., Park T.H., Simulation and real-time monitoring of polymerase chain reaction for its higher efficiency, *Biochemical Engineering Journal*, vol 29, 109–118, 2006.
3. Cobbs G., Stepwise kinetic equilibrium models of quantitative polymerase chain reaction, *BMC bioinformatics*, vol 13, 203–226, 2012.
4. Rutledge R.G., Stewart D., Assessing the Performance Capabilities of LRE-Based Assays for Absolute Quantitative Real-Time PCR, *PLoS One*, vol 3, e9731, 2010.
5. Liu W., Saint D.A., A new quantitative method of real time reverse transcription polymerase chain reaction assay based on simulation of polymerase chain reaction kinetics, *Anal. Biochem.*, vol 302, 52–59, 2002.

Разработка методов количественного описания гистологических образцов на основе их фазовых изображений, полученных с помощью цифровой голографической микроскопии

Белаиов А. В.¹, Жихорева А. А.

¹ФТИ

e-mail: belashov.andrey.93@gmail.com

В настоящее время цифровая голографическая микроскопия активно используется для решения множества задач оптики, биологии и метрологии [1]. Данный метод часто применяется для исследования биологических образцов, в основном для определения морфологических и оптических характеристик микроорганизмов, живых клеток и исследования изменений этих параметров при воздействии различных внешних факторов [2].

В рамках данной работы были разработаны методы подробного описания гистологических образцов различных тканей при использовании методов голографической микроскопии. Вследствие сложной структуры таких объектов, состоящих из нескольких слоев разупорядоченных клеток, точное описание данных образцов с точки зрения морфологических характеристик отдельных клеток оказывается весьма затруднительным. Поэтому вычисление любых характеристик тканей сопряжено с накоплением большого количества статистических данных и обработкой нескольких сотен фазовых изображений гистологических срезов. Дальнейшая обработка в предлагаемом нами алгоритме направлена на вычисление нескольких типов характеристик. На первом этапе обработки все фазовые распределения нормируются на значение, соответствующее области отсутствия гистологических тканей. Затем происходит построение статистического распределения среднего фазового набега, внесенного образцом в проходящий волновой фронт. После чего для распределения измеряются значения основных статистических моментов. Данные величины характеризуют как средний фазовый набег, индуцированный гистологическими тканями, так и плотность тканей в исследуемом образце. Обычно в медицине для исследования гистологических образцов проводят окрашивания тканей. Однако, в связи с тем, что гистологические ткани обладают большим показателем преломления, чем окружающая среда, используемая для приготовления образцов, цифровая голографическая микроскопия позволяет легко детектировать и разделять различные области и структуры тканей на фазовых изображениях.

Для получения дополнительной информации о типичном размере гистологических структур проводился анализ статистических распределений среднего фазового набега. Определялся параметр, который использовался для отсекания областей соединительно-тканной прослойки, которые вносят меньший фазовый набег, от других типов тканей на фазовом изображении. Впоследствии с учетом этой величины производится автоматическая сегментация отдельных областей ткани, и определяют их типичные размеры. Дополнительная информация о гистологических срезах может быть получена путем анализа Фурье образов полученных фазовых изображений. Этот метод может быть использован как для определения типичных оптических характеристик тканей, так и для детектирования определенной ориентации клеток или волокон ткани в образце. Так, например, Фурье образ фазового изображения гистологического среза гладких мышц демонстрирует определенную «направленность» структур объекта, что объясняется преимущественным направлением мышечных волокон в ткани.

В рамках апробации разработанного подхода для анализа гистологических образцов с использованием метода цифровой голографической микроскопии было показано, что многие количественные параметры, определенные указанным образом, различаются для гистологических образцов тканей почки, поперечнополосатой мышцы, эластического хряща и кожи. Так, например, для гистологических срезов кожи гистограммы распределения фазового набега в среднем характеризуются модой равной 0,29 рад и стандартным отклонением 0,37 рад. С другой стороны, гистограммы распределения для ткани эластического хряща – модой равной 0,49 рад и стандартным отклонением 0,34 рад.

Таким образом, в ходе проведения работы был разработан алгоритм получения морфологических и оптических параметров гистологических срезов тканей методами голографической микроскопии. Проведенное исследование может быть использовано для улучшения анализа гистологических образцов. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект №18-32-00364.

Список литературы

1. Kim M. K., Yu L., Mann C. J. Interference techniques in digital holography //Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2006. – Т. 8. – №. 7. – С. S518.
2. Belashov A. V. et al. Quantitative assessment of changes in cellular morphology at photodynamic treatment in vitro by means of digital holographic microscopy //Biomedical optics express. – 2019. – Т. 10. – №. 10. – С. 4975-4986.

Номер проекта РФФИ: 18-32-00364

Исследование динамики накопления протопорфирина IX в клеточных линиях A549, HeLa и 3T3

Горбенко Д. А.^{1,3}, Белашов А.В.¹, Семёнова И.В.¹, Васютинский О.С.¹, Литвинов И.К.²,
Беляева Т.Н.², Корнилова Е.С.²

¹ФТИ

²Институт цитологии, РАН

³Университет ИТМО

e-mail: daryarogova7@gmail.com

Фотодинамическая терапия (ФДТ) широко применяется в современной онкологии для лечения злокачественных опухолей. Этот метод лечения подразумевает использование определенных химических агентов, фотосенсибилизаторов (ФС), способных при облучении светом генерировать активные формы кислорода, которые приводят к гибели раковых клеток. Благодаря преимущественному накоплению ФС в злокачественных тканях они также применяются для диагностики локализации опухоли и оценки ее морфологии [1]. Одним из ФС, одобренных для применения в клинической практике является 5-аминолевулиновая кислота (5-АЛК). Как известно, 5-АЛК является предшественником эндогенно образующегося протопорфирина IX (PpIX), который, в свою очередь, является важным предшественником миоглобина, цитохрома и гема [2]. Было показано, что PpIX проявляет свойства фотосенсибилизатора, и подробная информация о его генерации в злокачественных клетках опухолей различных локализаций имеет большое значение для применений в ФДТ.

В данном исследовании мы изучали динамику 5-АЛК-индуцированного накопления PpIX в клетках трех клеточных линий: онкологических, HeLa и A549, и нормальных, 3Т3. Образцы культивировали в чашках Петри в среде DMEM, содержащей 10% эмбриональной бычьей сыворотки и 1% пенициллина/стрептомицина, в атмосфере 5% CO₂, 50% влажности при 37 °С. Перед экспериментами в культуральную среду добавляли 5-АЛК и клетки дополнительно инкубировали в этом растворе.

В первой серии экспериментов клетки HeLa, A549 и 3Т3 инкубировали в течение 1, 2, 3 и 4 часов при четырех концентрациях 5-АЛА в культуральной среде: 0, 50, 100 и 200 мкг/мл. После этого клетки промывали в буфере PBS и исследовали на конфокальном флуоресцентном микроскопе Olympus FV3000. Флуоресценция PpIX возбуждалась на длине волны 405 нм и детектировалась в диапазоне длин волн 610-650 нм. Трехмерные распределения интенсивности флуоресценции PpIX были зарегистрированы в нескольких полях в каждом образце. Анализ общей интенсивности флуоресценции в клетках проводили с использованием программного обеспечения ImageJ [3]. Общая интенсивность флуоресценции была проанализирована как функция времени инкубации и концентрации 5-АЛК. Было показано, что максимальное накопление PpIX происходит во всех трех клеточных линиях после 3-часовой инкубации в растворе, содержащем 5-АЛК в концентрации 100 мкг/мл. Дальнейшее увеличение концентрации 5-АЛА со 100 до 200 мкг/мл не вызывало какого-либо увеличения флуоресценции PpIX.

Во второй серии экспериментов клетки HeLa, A549 и 3Т3 инкубировали в течение 3 часов при концентрациях 5-АЛК в культуральной среде, варьируемой с меньшим шагом: 0, 50, 75, 100, 125, 150 и 175 мкг/мл. В результате экспериментов было продемонстрировано, что концентрации 5-АЛК выше 100 мкг/мл не приводили к увеличению накопления PpIX.

Таким образом, мы продемонстрировали, что максимальное накопление PpIX во всех трех клеточных линиях достигается при 3-часовой инкубации с 5-АЛК в концентрации 100 мкг/мл. Это приводит к 43%-ному увеличению сигнала флуоресценции PpIX в раковых клетках (HeLa и A549) и только 17,4%-ному в незлокачественных клетках (3Т3).

Список литературы

1. H. Abrahamse, M.R. Hamblin. "New photosensitizers for photodynamic therapy", *Biochem J.*, 473(4), 347–364, 2016.
2. M. Wachowska, A. Muchowicz, M. Firczuk, M. Gabrysiak, M. Winiarska, M. Wańczyk, K. Wojarczuk, J. Golab. "Aminolevulinic Acid (ALA) as a Prodrug in Photodynamic Therapy of Cancer", *Molecules*, 16, 4140-4164, 2011.
3. "Analyzing fluorescence microscopy images with ImageJ", Queen's University Belfast, manual by P Bankhead, 2014.

Численное исследование движения створок и структуры течения в модели венозного клапана с упругими створками

Тихомолова Л. Г.¹, Я.А. Гатаулин^{1,2}, А.Д. Юхнев^{1,2}, Росуховский Д.А.²

¹СПбПУ

²ФГБНУ «Институт экспериментальной медицины»

e-mail: ludmila060495@mail.ru

Изучение венозной гемодинамики продиктовано необходимостью совершенствования методов диагностики и лечения заболеваний вен и угрожающих жизни тромботических осложнений [1-4]. Известно, что с возрастом створки венозного клапана становятся более жесткими, тем самым препятствуя нормальной работе клапана. С помощью численного моделирования можно установить влияние упругости створок на застойные области за клапаном, являющиеся местами образования тромба. Целью настоящей работы является исследовать влияние упругости створки на застойную зону в модели здорового венозного клапана подколенной вены в режиме покоя, а также сравнить расчетные данные с данными ультразвуковой диагностики, полученными из собственного клинического исследования.

В настоящей работе исследована двумерная симметричная модель здорового венозного клапана подколенной вены в режиме покоя, построенная по данным собственных клинических измерений. На входной границе задавалось изменение среднерасходной скорости во времени цикла, полученное из доплеровских измерений, на выходной – постоянный уровень давления. Для жидкости выбрана ньютоновская модель. Число Рейнольдса 350. Течение является ламинарным. Использовано приближение жестких стенок ввиду малости их перемещений для подколенной вены. Модуль Юнга створок клапана варьировался от 0,6 до 20 МПа.

Проведен расчет течения жидкости с помощью технологии fluid-structure interaction (FSI), которая реализована в виде совместного решения уравнений жидкости (Навье-Стокса) и твердого тела (створок клапана) с помощью лагранжево-эйлеровского подхода. Гидродинамические расчеты выполнялись в программном комплексе Ansys Fluent, механические – в Ansys Mechanical. Расчетные размер и положение застойной зоны сопоставлялись с советующими клиническими значениями, измеренными в В-режиме ультразвукового сканера.

Застойная зона расположена между створкой клапана и стенкой синуса (расширения за клапаном). При увеличении модуля Юнга створки от 0,6 МПа до 8 МПа амплитуда колебаний створки уменьшается примерно на 50%, что приводит к увеличению длины застойной зоны на 80%. Под жесткой створкой застойная зона максимальна и занимает всю область под створкой.

Результаты расчета течения в симметричной двумерной модели здорового венозного клапана подколенной вены дали хорошее качественное совпадение с клиническими ультразвуковыми данными по положению и размерам застойной зоны при значении модуля упругости створки 1,2 – 2 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания "Гемодинамические реакции при сложных поструральных воздействиях и при тромбозах артериальных и венозных сосудов".

Список литературы

1. Lurie F., Kistner R.L., Eklof B., Kessler D. Mechanism of venous valve closure and role of the valve in circulation: a new concept // *Journal of Vascular Surgery* 2003. V. 38. P. 955–961.
2. Soifer E., Weiss D., Marom G., Einav S. The effect of pathologic venous valve on neighboring valves: fluid–structure interactions modeling // *Med Biol Eng Comput.* 2017. V. 55, No. 6. P. 991–999.
3. Wijeratne N.S., Hoo K.A. Numerical studies on the hemodynamics in the human vein and venous valve // *American control conference, Washington.* 2008. P.1-6.
4. Simão M., Ferreira J.M., Mora-Rodriguez J., Ramos H.M. Identification of DVT diseases using numerical simulations // *Med Biol Eng Comput.* 2016. V. 54. P. 1591–1609.

Масс-спектрометрическое определение изотопного состава углерода в листьях растений при газификации пробы окислением дрожжами

Кулешова Т. Э.¹, Павлова Е.С.¹, Титов Ю.А.², Кузьмин А.Г.², Галль Н.Р.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИАП

e-mail: www.piter.ru@bk.ru

В ряде ключевых метаболических реакций в растительных организмах возникают кинетические изотопные эффекты и наблюдается фракционирование изотопов углерода, что приводит к межкомпонентной и внутримолекулярной изотопной гетерогенности биомассы [1]. При фотосинтезе распределение изотопов между воздухом и продуктами фотосинтеза определяется реакционной способностью молекул различного изотопного состава, причем, в продуктах реакции – простых сахарах будет накапливаться изотоп, с участием которого реакция протекает быстрее: большинство растений интенсивнее накапливают ¹²C.

Для проведения масс-спектрометрического анализа изотопного отношения ¹³C/¹²C необходимо углеродсодержащее соединение перевести в форму углекислого газа, причем для достижения точностей измерения его концентрация в пробе должна превышать 1%. Наиболее распространенным методом для перевода твердого тела в газообразное состояние является сжигание в избытке кислорода, которое обеспечивает превращение всего углеродного пула в углекислый газ при полном сгорании анализируемого вещества.

При исследовании фотосинтеза наибольший интерес представляет изучение изотопного состава продуктов реакции, образующихся «в реальном времени», а не накапливающихся в течение всей жизни растения, т.е. простых сахаров. Для определения изотопного состава углерода только простых сахаров в тканях растительных организмов нами было предложено использовать реакцию окисления дрожжами с образованием углекислого газа. При этом мы основывались на разработанном методе изучения фракционирования изотопов углерода гетеротрофными микроорганизмами [2].

Методика заключается в помещении в герметичную пробирку измельченной растительной ткани, воды и сухих дрожжей. После 30 минут реакции синтезированный углекислый газ подается на масс-спектрометр «Хеликомасс» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) для

проведения изотопного анализа углерода. Относительно атмосферного воздуха в ходе реакции наблюдается рост интенсивности сигнала с $m/z=44$ (соответствующий CO_2) в ~ 50 раз в течение 15 минут. Для определения хода реакции и выявления возможных изотопных интерференций была проведена верификация методики путем записи полного масс-спектра в диапазоне масс 1-99 а.е.м. на масс-спектрометре МС 7-100 (ИАП РАН) [3]. Полученные пробы свободны от интерферирующих примесей, доля которых не превышала 10^{-5} . В ходе отслеживания динамики значений изотопного состава углерода образца выявлено, что отношение изотопов углерода растительной ткани при окислении дрожжами в течение 3 часов было не измененным и составило $\delta^{13}\text{C} = -30\% \pm 1\%$.

Для апробирования предложенной методики был измерен изотопный состав сахаров, промышленно полученных из растений, различающихся по типу фотосинтеза за счет количества углерода, вовлеченного в метаболизм на этапе фиксации CO_2 : $\delta^{13}\text{C} = -33 \pm 2\%$ при окислении дрожжами свеклольного сахара, выделенного из С3-растений, $\delta^{13}\text{C} = -14 \pm 1,5\%$ для тростникового сахара, синтезированного из С4-растений. Значения согласуются с литературными данными [4] для этих типов фотосинтеза, что позволяет применять предложенную методику для широкого круга объектов.

Впервые с использованием разработанной методики было проведено исследование влияние спектральных характеристик излучения на изотопный состав углерода в листьях овса посевного на ранних стадиях развития (8-14 дней) с помощью предложенной методики. Полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ для углеродных соединений в листьях растения меняются от -24% до -36% в зависимости от спектра излучения. Для изотопного состава листьев в случае освещения красным, синим и красно-синим наблюдается накопление ^{12}C относительно облучения белым светом с различной цветовой температурой. Возможно, это связано с более быстрым протеканием фотосинтетических реакции при поглощении ^{12}CO .

Список литературы

1. Ивлев А. А., Колебательная природа углеродного метаболизма в фотосинтезирующей клетке по данным изотопного состава углерода, Успехи современной биологии, 131, 178, 2011.
2. Зякун А.М., Теоретические основы изотопной масс-спектрометрии в биологии: учебное пособие, Пущино: Фотон-век, 224 с., 2010.
3. Кулешова Т.Э., Павлова Е.С., Титов Ю.А., Кузьмин А.Г., Галль Н.Р. Пробоподготовка для масс-спектрометрического анализа фракционирования изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ из окружающей среды в углеродный пул растений, НТВ СПбГПУ. Физ.-мат. науки, 12, 69, 2019.
4. Schidlowski M., Paleobiological and biogeochemical vestiges of early terrestrial biota: Baseline for evaluation of extraterrestrial evidence, In perspectives in astrology. IOS Press, 146, 2005.

Исследование влияния времени нагрева и мощности микроволнового излучения на микроструктуру формируемого гидроксиапатита кальция

Мараева Е. В.¹, Халугарова К. Н.¹, Заикина А. В.²

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²ООО «Тескан»

e-mail: jenvmar@mail.ru

Активное использование в последнее время синтетически полученных материалов в костной инженерии и хирургии, таких как гидроксиапатит кальция [1-3], предполагает более доступные и дешёвые их методы получения. Одним из таких методов является синтез с использованием микроволнового излучения.

Естественный гидроксиапатит кальция составляет около 50% от общей массы кости и почти 96% эмали человека. Синтетический гидроксиапатит кальция является биосовместимым материалом, обладает схожей структурой с естественным гидроксиапатитом и поэтому используется в качестве материала для замещения дефектов и регенерации костной ткани в хирургии, а также в качестве зубопротезного материала в стоматологии.

Данная работа посвящена изучению особенностей темплатного синтеза и химического осаждения гидроксиапатита кальция с использованием микроволновой печи. В процессе синтеза варьируется время нагрева и мощность используемого микроволнового излучения.

Для темплатного синтеза [1] в качестве прекурсоров кальция и фосфора использовали соответственно тетрагидрат нитрата кальция и ортофосфорную кислоту. В качестве темплата выступала яичная мембрана. Мембрану из яичной скорлупы отделяли от скорлупы путем погружения сломанной скорлупы в раствор соляной кислоты. Затем яичную мембрану очищали дистиллированной водой, пропитывали фосфат-ионами и раствором прекурсора кальция. В таком растворе мембрана выдерживалась 24 часа и сушилась при комнатной температуре в течение суток. Далее образцы мембраны прокаливали в микроволновой печи по 5 минут при мощностях 140, 616 и 700 Вт при нормальной воздушной атмосфере.

При методе химического осаждения для синтеза гидроксиапатита кальция [2] использовали также тетрагидрат нитрата кальция и ортофосфорную кислоту. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода. Растворы смешивались на магнитной мешалке при скорости 500 об/мин с добавлением аммиачной воды для получения осадка. Затем раствор помещался для нагрева в микроволновую печь при мощности 700 Вт. Образцы полученного осадка дополнительно помещали в муфельную печь на 1,5 и 3 часа.

Полученные образцы исследовались методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа TESCAN S9000G (ускоряющее напряжение 5кВ, ток пучка 100пА, детектор SE). Установлено, что частицы гидроксиапатита, формируемые в результате темплатного синтеза, имеют сферическую форму, а при выборе метода химического осаждения формируются преимущественно наностержни. При анализе полученных снимков были получены диапазоны диаметров сферических частиц – 60-340 нм и наностержней – 70-100 нм (длина наностержней от 100 до 500 нм). В докладе обсуждаются особенности влияния режимов микроволнового излучения на морфологию поверхности полученных композиций в сопоставлении с данными мировой литературы.

Список литературы

1. Sabu U. et al. Microwave assisted synthesis of biomorphic hydroxyapatite, *Ceramics International*, vol. 45, №6, 6718-6722, 2019
2. Radha G. et al. Evaluation of hemocompatibility and in vitro immersion on microwave-assisted hydroxyapatite–alumina nanocomposites, *Materials Science and Engineering: C*, vol. 50, 143-150, 2015
3. Khalugarova K. N. et al, Study on the processes of nitrogen adsorption and capillary condensation in the powders of calcium hydroxyapatite, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1400, 033003, 2019

Моделирование процессов образования солей кальция в микроразмерных каналах (капиллярах) в режиме непрерывного потока

Афоничева П. К.¹, Буляница А.Л.¹, Евстапов А.А.¹

¹ИАП РАН

e-mail: polina.afonicheva@gmail.com

Кальцинирующий аортальный стеноз (КАС) является распространенным заболеванием аортального клапана [1, 2]. Кальциноз встречается в сосудистой сети в нескольких формах фосфата кальция, включая гидроксипатит кальция. Идеология «орган-на-чипе» позволяет моделировать различные процессы, протекающие в живом организме, в частности, химические реакции и массоперенос веществ. Благодаря этому возможно выявить механизм образования солей, определить факторы, влияющие на этот процесс и управлять им. В перспективе это позволит определить стратегии лечения и выявить условия, препятствующие образованию солей и развитию КАС.

Для имитации отложения солей кальция в сосудах использовались растворы натрия фосфатного буфера (PBS) и хлорида кальция CaCl_2 . Моделирование этого процесса проводилось в микрофлюидном чипе (МФЧ) из полидиметилсилоксана, изготовленном методом «мягкой» литографии. Чип представляет собой два резервуара, разделенные тонко-слоистой мембраной, в которой сделан разрез для соединения каналов.

На экспериментальной установке, состоящей из микропробирок с реагентами, перистальтического насоса ВТ100-2J и МФЧ был проведен ряд экспериментов, в котором варьировалась концентрация CaCl_2 от 0,2% до 0,8% с шагом 0,2%. С помощью перистальтического насоса в один канал непрерывно подавался водный раствор CaCl_2 , во второй PBS. Из-за разницы давлений возникало движение жидкости через разрез в мембране, происходило смешивание реагентов и образование нерастворимого продукта – солей кальция. Эксперимент проводился в течение 25 минут. Регистрация процесса образования фосфатов кальция осуществлялась с помощью оптического микроскопа и ПЗС-камеры с прогрессивной разверткой Pike F421b (Германия). Расход CaCl_2 во всех экспериментах составил 19,5 мкл/сек, а PBS – 10 мкл/мин.

По результатам эксперимента было проведено математическое моделирование. Заданными параметрами являлись концентрации и величины потоков реагентов, геометрические характеристики каналов и камеры. Граничные условия традиционны: непроницаемость стенок для вещества. Предполагается, что основная химическая реакция имеет

второй порядок. Молекула хлорида кальция моделируется совокупностью деформируемых октаэдров с расстояниями между атомами порядка 0,27 нм [3]. Для сферической частицы такого радиуса по формуле Стокса-Эйнштейна коэффициент диффузии в воде при 25 °С примерно равен $8 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Время достижения дна канала (при глубине 30 мкм) около 1 сек.

Наблюдаемая в экспериментах область формирования продукта реакции ограничена линиями, качественно соответствующими движениям двух встречных потоков: огибающего угол с жесткими непроницаемыми стенками и затопленной струи. Оба этих движения допускают нахождение профиля скорости аналитическими методами [4]. При этом первая задача решена в приближении идеальной жидкости, вторая – без необходимости учета вертикального среза струи. Параметры, определяющие форму струи и угол раствора соответствующего конуса, вычисляются по заданным величинам расхода реагентов, среднему градиенту давления и размерам сечения канала. Эти параметры позволяют рассчитать радиальную составляющую тензора потока импульса, а относительная удаленность стенок оправдывает гипотезу о постоянстве полного потока импульса. Учет вертикального среза струи можно провести в соответствии с методикой [5].

Из полученных результатов следует, что для малых концентраций CaCl₂ наблюдаемое пространственное распределение продукта реакции (фосфатов кальция) качественно соответствует линиям тока при истечении жидкости через щель. При этом, с ростом концентрации CaCl₂ формируются дендридные структуры с увеличивающимся характерным размером самоподобных элементов. Можно предположить, что подобный механизм образования солей кальция наблюдается и в живом организме при развитии КАС.

Работа выполнена в рамках Государственного Задания № 075-01073-20-00.

Список литературы

1. O'Brien K.D. Pathogenesis of calcific aortic valve disease: a disease process comes of age // *ArteriosclerThrombVasc Biol.* –2006. – No. 26. – P.1721-1728.
2. Pibarot P, Dumesnil J.G. New concepts in valvular hemodynamics: implications for diagnosis and treatment of aortic stenosis // *Can J Cardiol.* – 2007. – No. 23. –P. 40-47.
3. Реми Г. Курс неорганической химии. Т.1. – М: изд-во иностранной лит-ры, 1963. 922 с.
4. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М., Теоретическая физика: учебное пособие, в 10 т., т. 6, Гидродинамика, М: Наука, 2001
5. A.L. Bulyanitsa, K I Belousov, A A Evstrapov Applicability of submerged jet model to describe the liquid sample load into measuring chamber of micron and submillimeter sizes // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 917 (2017) 042021 (6 p).

Голографическое исследование отклика клеток рака почки, саркомы и меланомы пациентов на фотодинамическое воздействие

Жихорева А. А.¹, Белашов А. В.¹, Авдонкина Н. А.², Балдуева И. А.², Данилова А. Б.²,
Гельфонд М. Л.², Нехаева Т. Л.², Семенова И. В.¹, Васютинский О. С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НМИЦ онкологии им. Н. Н. Петрова

e-mail: anna_zhikhoreva@mail.ru

На данный момент большое внимание уделяется исследованиям, направленным на создание методов диагностики рака. Одной из наиболее серьезных проблем при лечении онкологии является резистивность опухолевых клеток к определенным методикам лечения, поэтому для подбора более точной терапии необходимо проводить дополнительные исследования по оценке резистивности клеток к различным видам терапии [1]. Вместе с другими лабораторными исследованиями подбор терапии может быть усилен за счет анализа ответа клеток *in vitro* на повреждающие воздействия противоопухолевых средств [2].

Одним из перспективных методов исследования живых клеток является цифровая голографическая микроскопия, которая может применяться в медицинской диагностике [3]. Принцип работы голографического микроскопа основан на регистрации интерференционной картины двух когерентных, одна из которых прошла через клеточные структуры. Численная обработка голограмм позволяет получить пространственное распределение фазового набега, индуцированного клеткой, и отследить динамику изменения оптической толщины в ходе внешнего воздействия [4, 5]. Преимущества голографической микроскопии заключаются в возможности получать численные значения морфологических и оптических параметров клеток при использовании малой плотности облучения и без красителей, что делает данный метод неинвазивным.

В данной работе методами цифровой голографии *in vitro* исследовался отклик на фотодинамическое воздействие (ФДВ) живых клеточных линий, полученных из метастазов 12 пациентов с раком почки, меланомой и саркомой. Работа проводилась с помощью инвертированного голографического микроскопа. В ходе проведения экспериментов в питательную среду DMEM, добавлялся фотосенсибилизатор Радахлорин, который накапливался в клетках в течение 2-2.5 часов. Накопление фотосенсибилизатора было подтверждено экспериментами на флуоресцентном микроскопе. Для моделирования процессов фотодинамической терапии (ФДТ) клетки облучались лазером на длине волны, соответствующей максимуму поглощения Радахлорина, 660нм, что приводило к генерации активных форм кислорода и запуску процессов некроза.

В ходе проведения экспериментов для каждого пациента была зарегистрирована динамика изменения оптической толщины клеток при ФДВ. Также по экспериментальным данным проводилась оценка изменения сухой массы клетки [6]. Кроме того, была оценена скорость изменения оптической толщины и сухой массы клеток пациентов с помощью экспоненциального фитирования. Вычисленные характерные времена спада среднего фазового набега значительно отличаются для пациентов. Например, при раке почки для трех пациентов время спада равно 3,95 мин, 47,11 мин и 60,70 мин. Из фитирующей функции находились параметры, позволяющие оценить изменения оптической толщины и сухой массы клеток по сравнению с начальным состоянием. Комплексный анализ полученных данных может быть использован для оценки резистивности клеток. Стоит отметить, что ряд образцов вообще не имеют отклика на используемую дозу воздействия, что может

указывать на устойчивость данных пациентов к ФДТ. Кроме того, были проведены эксперименты по мониторингу некроза при различных плотностях мощности лазерного излучения на длине волны 660 нм, что приводило к варьированию дозы ФДВ на клетки. Для этого использовались клетки рака почки двух пациентов. В ходе этих экспериментов было продемонстрировано, что увеличение плотности мощности лазерного излучения в обоих случаях приводит к увеличению скорости убывания среднего фазового набега клеток и соответственно скорости протекания некротических процессов.

Таким образом, в данной работе методами цифровой голографической микроскопии было проведено исследование отклика первичных клеточных линий пациентов *in vitro* на ФДВ. Проведен анализ скорости некротических процессов и оценена чувствительность клеток к ФДВ.

Белашов А.В. выражает благодарность за финансовую поддержку стипендии президента в рамках проекта СП-2349.2019.4.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 18-32-00364.

Список литературы

1. Ferriss J. S., Rice L. W. The role of *in vitro* directed chemotherapy in epithelial ovarian cancer //Reviews in Obstetrics and Gynecology. – 2010. – Т. 3. – №. 2. – С. 49.
2. Udelnow A. et al. *In vitro* chemo-sensitivity assay guided chemotherapy is associated with prolonged overall survival in cancer patients //Polish Journal of Surgery. – 2013. – Т. 85. – №. 6. – С. 340-347.
3. Majeed H. et al. Quantitative phase imaging for medical diagnosis //Journal of biophotonics. – 2017. – Т. 10. – №. 2. – С. 177-205.
4. Belashov A. V. et al. Quantitative assessment of changes in cellular morphology at photodynamic treatment *in vitro* by means of digital holographic microscopy //Biomedical optics express. – 2019. – Т. 10. – №. 10. – С. 4975-4986.
5. Belashov A. V. et al. *In vitro* monitoring of photoinduced necrosis in HeLa cells using digital holographic microscopy and machine learning //JOSA A. – 2020. – Т. 37. – №. 2. – С. 346-352.
6. Rappaz B. et al. Noninvasive characterization of the fission yeast cell cycle by monitoring dry mass with digital holographic microscopy //Journal of biomedical optics. – 2009. – Т. 14. – No. 3. – С. 034049

Номер проекта РФФИ: 18-32-00364

Комплексная оптическая оценка раннего обнаружения периодонтита

Черный-Ткач К. Б.¹, Тимченко Е.В.¹, Тимченко П.Е.¹, Фролов О.О.¹, Зыбин М.А.², Долгушов Г.Г.²

¹Самарский университет

²Стоматологическая клиника «ДИАМАНТ»

e-mail: chernytkach14@gmail.com

Периодонтит является распространенным стоматологическим заболеванием, с которым по разным источникам сталкивались от 5-15% населения всех стран мира [1]. Несвоевременное лечение может привести к тяжелым формам периодонтита, а в последствии и к потере зубов.

Существующие методы диагностики не всегда позволяют обнаружить периодонтит на ранней стадии его развития, т.к. как очаг воспаления достаточно мал и самые ранние изменения сложно диагностировать [2]. В связи с этим в настоящее время ведутся поиски новых более чувствительных методов диагностики и мониторинга данного заболевания.

В настоящее время среди перспективных методов анализа широкое применение получили оптические методы диагностики.

В качестве объектов исследований были использованы ткани зубов человека, удаленные по причине периодонтита, а также ротовая жидкость пациентов, находящихся на ранней стадии заболевания. Период транспортировки биоматериалов составил не более 1 часа с момента их получения, что гарантировало сохранность их биологических свойств.

Все исследования проводились с помощью комплексного оптического метода исследований, на основе методов спектроскопии комбинационного рассеяния и конфокальной флуоресцентной микроскопии.

Был проведен нелинейный регрессионный анализ спектров комбинационного рассеяния в программной среде MagicPlotPro 2.7.2 с помощью метода подбора спектрального контура и деконволюции функции Гаусса для выделения спектральных линий и более подробного их анализа. Полученные в ходе исследования результаты были проанализированы в программной среде SPSS Statistics 19, а также проведен хеометрический анализ результатов с помощью метода Уилкса (Wilks).

Проведен хеометрический анализ спектров комбинационного рассеяния твердых тканей зубов у здоровых пациентов и больных периодонтитом. Были выявлены спектральные изменения твердых тканей зубов у больных периодонтитом, которые проявляются на линиях 937 см^{-1} , 956 см^{-1} , 1069 см^{-1} , $1230\text{-}1270\text{ см}^{-1}$, 1555 см^{-1} , 1665 см^{-1} и 1739 см^{-1} . Данные изменения свидетельствуют о разрушении твердых тканей зуба: коллагеновых матриц и гидроксиапатита при периодонтите.

Также были установлены биомаркеры раннего обнаружения периодонтита по ротовой жидкости, которые проявляются на линиях 1556 см^{-1} и 1738 см^{-1} , что вероятно связано с усилением функции белков и усилением переокисления липидов при периодонтите.

Результаты исследований, полученные с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, были сопоставлены с микроскопическим анализом исследуемых образцов.

Список литературы

1. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet* 2018; 392: 1789–1858;
2. Лукиных Л.М., Лишвиц Ю.Н. Верхушечный периодонтит: Учебное пособие. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородской государственной медицинской академии, 1999. – 92 с;

Планарное устройство из эластомерного материала для выделения нуклеиновых кислот

Гермаи Н. Н.¹, Есикова Н.А.¹, Афоничева П.К.¹, Антифеев И.Е.¹, Петров Д.Г.¹, Евстрапов А.А.¹

¹ИАП РАН

e-mail: yilatan_nata@mail.ru

Современные методы анализа нуклеиновых кислот предъявляют высокие требования к этапу пробоподготовки, включающему в себя очистку пробы от примесей, лизис, выделение и концентрирование целевого продукта. Важной инженерной задачей в приборостроении является объединение устройства пробоподготовки с устройством (системой) анализа нуклеиновых кислот. Это позволяет минимизировать влияние человеческого фактора на получаемые результаты, повысить надежность анализа и сократить его длительность [1, 2].

В работе представлено автоматизированное устройство, обеспечивающее выделение нуклеиновых кислот и их загрузку в микрофлюидное устройство для последующего анализа методами амплификации (ПЦР-РВ, изотермической амплификации). Устройство выполнено в виде планарной конструкции с системой герметичных серпантинных каналов (для лизиса пробы, выделения и концентрирования нуклеиновых кислот) и портами для соединения с внешними микроячейками (контейнерами) и микрофлюидным устройством. Управление движением жидкости в каналах производится с применением внешнего насоса и клапанов. Выделение нуклеиновых кислот из лизата осуществляется с использованием магнитных частиц. Устройство позволяет работать с большими объемами исходной пробы, поскольку предусматривает подачу пробы и реагентов из внешних контейнеров.

Составные элементы устройства получены методом «мягкой» литографии из эластомера Silastic T4 (Dow Corning). Герметизация устройства осуществлена посредством соединения деталей после активации контактирующих поверхностей аргоновой плазмой. Исследованы механические свойства материала (модуль Юнга) в зависимости от соотношения компонент материала, осуществлена оценка свойств смачиваемости материала после обработки плазмой.

Экспериментальная проверка работоспособности устройства осуществлялась при выделении нуклеиновых кислот из образцов пробы *E.coli* с использованием набора реагентов М-Сорб-ООМ (ООО «Синтол», Москва). Проводились сравнения результатов выделения на планарном устройстве и по стандартной методике, рекомендуемой производителем тест-системы. Регистрация результатов измерений осуществлялась методом ПЦР-РВ на анализаторе АНК-48 (ИАП РАН, Санкт-Петербург). Значения пороговых циклов, полученные для образцов нуклеиновых кислот, выделенных: а) на устройстве и б) в «ручном» режиме по стандартной методике показали хорошее совпадение.

При экспериментах с модельными растворами кДНК гена GAPDH из полученных данных следует, что разница в пороговых циклах для исходной пробы и после ручного выделения мала (десятые доли цикла, на уровне погрешности) и практически отсутствует для концентрации исходной пробы 10^3 коп/мкл. Разница в пороговых циклах при выделении кДНК на планарном устройстве и для исходной пробы составила $1,5 \pm 0,8$, что, по-видимому, связано с осаждением нуклеиновых кислот на стенках каналов устройства и необходимостью оптимизации режимов выделения и концентрирования.

Список литературы

1. Thatcher S.A. DNA/RNA Preparation for molecular detection // Clin. Chem. 2015. Vol. 61, no. 1. P. 89–99;
2. Rantakokko-Jalava K., Jalava J. Optimal DNA isolation method for detection of bacteria in clinical specimens by broad-range PCR // J. Clin. Microbiol. 2002. Vol. 40, no. 11. P. 4211–4217.

Изменение структуры и стабильности двойной спирали ДНК при образовании платиновых аддуктов

Солдатова А. А.¹, Тымченко Е.Е.¹, Глова В.И.¹, Чихиржина Е.В.², Поляничко А.М.^{1,2}

¹СПбГУ

²ИНЦ РАН

e-mail: soldatova-97@mail.ru

В настоящее время, цисплатин (*цис*-диаминодихлорплатина(II), или *цис*-ДДП) и его аналоги являются наиболее известными и широко распространенными противоопухолевыми препаратами. Их биологическая активность обусловлена способностью формировать устойчивый комплекс с молекулой ДНК. Однако при взаимодействии с ДНК в живой клетке препарат способен формировать аддукты нескольких типов, имеющих различную биологическую активность. Часть из них, приводят к изменениям в структуре молекулы ДНК, которые не могут быть исправлены репарационными системами, что в дальнейшем приводит к гибели клетки. Несмотря на то, что молекулярные механизмы противоопухолевой активности препарата изучаются в течение многих лет, окончательного понимания процессов, протекающих в клетке с участием ДДП до сих пор нет.

В данной работе проведено исследование термостабильности и структуры ДНК при связывании с *цис*- и *транс*- изомерами ДДП на основе анализа данных спектрофотометрического плавления и ИК спектроскопии. Установлено, что термостабильность ДНК уменьшается при взаимодействии с *цис*-ДДП и, напротив, увеличивается при взаимодействии с *транс*- ДДП. Выявлено изменение вторичной структуры ДНК при взаимодействии с ДДП, причем эти изменения отличаются для *цис*- и *транс*- изомеров. В спектрах поглощения среднего ИК-диапазона, наблюдаются изменения полос, относящихся к колебаниям групп в составе азотистых оснований и сахарофосфатного остова ДНК. Наиболее отчетливо наблюдаются смещение / изменение интенсивности нескольких полос, таких как 1690 см⁻¹ (C=O тимина), 1578 см⁻¹ (C-N гуанина), 935 см⁻¹ (колебания сахарных колец). Наблюдаемые спектральные изменения свидетельствует о формировании на ДНК аддуктов более чем одного типа, приводящих к нарушениям вторичной структуры ДНК при связывании с ДДП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-01500). Часть работ выполнена с использованием оборудования Научного парка СПбГУ (РЦ Оптические и лазерные методы исследования вещества, Центр диагностики функциональных материалов для медицины, фармакологии и нанозлектроники, Криогенный отдел).

Исследование влияния гидрохлоридных форм аминокислот на формирование биомиметических композитов в присутствии нанокристаллического гидроксиапатита

Голощанов Д. Л.¹, В.М. Кашкаров¹, К.А. Никитков¹, В.Н. Бартнев¹, Ю.А. Ипполитов², И.Ю. Ипполитов², П.В. Середин¹

¹ВГУ

²ВГМУ им. Н.Н. Бурденко

e-mail: goloshchapov@phys.vsu.ru

Анализ физико-химических свойств биомиметических композитов, моделирующих твёрдые ткани скелета человека, является многоуровневой задачей не только фундаментальной медицины, но и биоматериаловедения, с точки зрения воспроизведения фазового состава и молекулярного окружения нанокристаллической твёрдой фазы в органической матрице.

В качестве аналога минеральной составляющей твердых тканей костей и зубов в биокомпозитах часто используют нанокристаллический гидроксиапатит (ГАП) с большим количеством дефектов [1]. В тоже время, актуальные исследования показывают, что для формирования у биомиметических систем – биогенных свойств необходимо использовать не только белковые соединения, но и субъединицы белкового состава – различные аминокислоты. Анализ литературных данных обнаруживает, что в присутствии минеральных комплексов тип взаимодействия ГАП/аминокислота может трансформироваться, что ведёт к изменению типа формируемой связи на поверхности минеральной фазы и физико-химических свойств итогового композита [2]. Поэтому в данной работе было проведено исследование изменения молекулярного окружения гидроксиапатита и гидрохлоридных форм аминокислот, формирующих композиционные системы различного состава.

Формирование биомиметических композитов осуществлялось в водной среде. На первом этапе получали гомогенную взвесь, содержащую нанокристаллический карбонат-замещенный гидроксиапатит (КГАП), воспроизводящий особенности апатита эмали [1]. На втором этапе были получены водные растворы аминокислот с использованием кристаллизованных порошков L-лизина гидрохлорида и L-аргинина гидрохлорида в концентрациях, соответствующих содержанию L-лизина и L-аргинина в зубном матриксе. Перед смешиванием раствор содержащий как взвесь КГАП, так и растворы аминокислоты подвергали ультразвуковому перемешиванию (Q55 Sonica 55Вт) в течении 5 мин. Для исследования зависимости молекулярного окружения КГАП от зарядового состояния аминокислот исследование проводилось в средах с $\text{pH} \geq 11.2$, ≥ 7.55 и ≤ 5 - выше и ниже изоэлектрических точек L-лизина и L-аргинина.

Результаты дифрактометрического анализа композитов показали, что при изменении кислотности среды происходит трансформация конформационного окружения L-лизина гидрохлорида с образованием структуры чистого L-лизина, связанная с выходом ионов хлора как при повышении pH, так и в присутствии нанокристаллов КГАП. В тоже время образцы L-аргинина – сохраняют аморфную структуру, как в нейтральных средах, так и при $\text{pH} > 11$ и $\text{pH} < 5$ и аналогичная тенденция наблюдается в присутствии КГАП. Методом ИК-спектроскопии показано, что при формировании композита, содержащего L-лизин гидрохлорид, происходит перераспределение интенсивности колебательных мод, соответствующих боковым связям L-лизина и ОН-группам гидроксиапатита. А исследование молекулярного окружения образцов содержащих L-аргинин методом микроспектроскопии комбинационного рассеяния показало, что взаимодействие данной аминокислоты с

карбонат-замещенным гидроксиапатитом осуществляется по механизмам молекулярной ориентации с участием группы NH_3^+ . Малая активность данной моды и аморфная стабильная структура L-аргинина, показанная всеми методами, свидетельствует о стабилизации L-аргинина в присутствии атомов хлора и объясняет слабое взаимодействие с КГАП [2]. Обнаруженные отличия в молекулярном окружении аминокислот при взаимодействии с нанокристаллическим гидроксиапатитом гидрохлоридных форм аминокислот являются значимыми для развития технологии интеграции биомиметических композитов с нативными твёрдыми тканями зубов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 18-29-11008 мк) и гранта Президента Российской Федерации №МК-419.2019.2.

Список литературы

1. Goloshchapov D.L., Lenshin A.S., Savchenko D.V., Seredin P.V. Importance of defect nanocrystalline calcium hydroxyapatite characteristics for developing the dental biomimetic composites, Results in Physics, 2019, v. 13., pp. 102158.
2. Hernández B., Pflüger F., Derbel N., De Coninck J., Ghomi M. Vibrational Analysis of Amino Acids and Short Peptides in Hydrated Media. VI. Amino Acids with Positively Charged Side Chains: L-Lysine and L-Arginine The Journal of Physical Chemistry B, 2010, v. 114. (2), pp. 1077–1088.

Номер проекта РФФИ: 18-29-11008 мк

Прецизионное исследование начальных изменений биогенного апатита эмали в случае патологии флюороза методом спектроскопии комбинационного рассеяния

Никитков К. А.¹, Д.Л. Голощанов¹, В.М. Кашкаров¹, В.Н. Бартенев¹, Ю.А. Ипполитов², И.Ю. Ипполитов², М. Савватеев³, А.В. Вахтель³, П.В. Середин¹

¹ВГУ

²ВГМУ им. Н.Н. Бурденко

³АО “Найтек Инструментс” – генеральный дистрибьютор HORIBA Scientific

e-mail: nikitkov.vsu@gmail.com

Известно, что различные патологии развития эмали и сопутствующие заболевания ротовой полости снижает устойчивость эмали к механическому и бактериальному воздействию [1]. Несмотря на положительные профилактические мероприятия, проводимые для установления стабильности эмали, в частности – фторирования эмали, не удастся избежать развития кариеса [2]. В данном аспекте известно достаточное количество работ, по исследованию состава эмали в норме и повышенной концентрации фтора в ротовой полости, обнаруживающие как положительные, так и отрицательные результаты его воздействия. В частности, обнаружено образование фтор апатита эмали и CaF_2 на её поверхности. Фторид кальция свидетельствует о необратимых процессах и ведёт к преждевременному разрушению эмали. Поэтому диагностирование флюороза на ранних этапах и уменьшение концентрации и введение новых агентов реминерализации зубной эмали является важными и актуальными направлениями в терапевтической стоматологии. В аспекте диагностики стоматологических заболеваний спектроскопия комбинационного рассеяния

является одной из наиболее перспективных и чувствительных методик в отношении изменения молекулярного состава как эмали, так и дентина зубов, позволяющим прецизионно оценить состояние локальных участков органов ротовой полости [1,3].

В данной работе были исследованы образцы зубов с интактной эмалью и эмалью зубов подверженных флюорозу. Изучение производилось на образцах зубов, удалённых у пациентов в возрасте 18-45 лет по ортодонтическим показаниям. Образцы зубов во избежание протекания долговременных процессов обызвествления и кальцификации немедленно препарировались с использованием утверждённых стандартов и в соответствии с диагностированной патологией. Принимая во внимание требования методики исследования (микроспектроскопии комбинационного рассеяния) к геометрии образцов, нами были подготовлены плоскопараллельные сегменты образцов зубов, аналогично работам [3, 4]. Для разделения препарированных зубов, содержащих интеграционный слой стоматологический материал – биомиметический композит – твердая ткань зуба, на сегменты использовалась специализированная установка с алмазным диском и водяным охлаждением. Полученные слои твердой ткани подвергали бережному шлифованию с последующей полировкой с использованием алмазного абразива. Целью данной работы являлось исследование микрообластей эмали в норме и на начальных этапах заболевания, вызванном повышенным содержанием фтора в ротовой полости – флюорозе. Определено, что для каждой из выбранных областей эмали зуба в спектрах комбинационного рассеяния происходят изменения в перераспределении интенсивностей мод $580-615\text{ см}^{-1}$ и $1045-1080\text{ см}^{-1}$ относимых к группам PO_4 и CO_3 входящих в состав апатита эмали зуба человека. Наблюдаемые изменения могут свидетельствовать о изменении молекулярного окружения фосфорно-кислородной группы в результате включения фтора в структуру апатита эмали. Обнаруженные особенности могут быть использованы при диагностике наиболее ранних форм патологии эмали.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-15-00003).

Список литературы

1. Zavala-Alonso V., Loyola-Rodríguez J.P., Terrones H., Patiño-Marín N., Martínez-Castañón G.A., Anusavice K. Analysis of the molecular structure of human enamel with fluorosis using micro-Raman spectroscopy, *Journal of Oral Science*, 2012, v. 54. (1), pp. 93–98.
2. Carey C.M. Focus on Fluorides: Update on the Use of Fluoride for the Prevention of Dental Caries, *Journal of Evidence Based Dental Practice*, 2014, v. 14, Supplement., pp. 95–102.
3. Середин П.В., Голощачов Д.Л., Prutskij T., Ипполитов Ю.А., Единовременный анализ микрообластей кариозного дентина методами лазерно-индуцированной флуоресценции и рамановской спектроскопии, *Оптика И Спектроскопия*, 2018, v. 125. (11), pp. 708.
4. Seredin P., Goloshchapov D., Prutskij T., Ippolitov Y., Phase Transformations in a Human Tooth Tissue at the Initial Stage of Caries, *PLoS ONE*, 2015, v. 10. (4), pp. e0124008.

Особенности взаимодействия НМГВ-доменных белков из дифференцированных клеток с ДНК, модифицированной ЦИСПЛАТИНОМ

Старкова Т. Ю.¹, Поляничко А.М.^{1,2}, Чихиржина Е.В.¹

¹ИНЦ РАН

²СПбГУ

e-mail: chikhir@gmail.com

Сегодня в медицинской практике применяется ряд противоопухолевых препаратов, созданных на основе координационных соединений платины(II). Среди них наиболее известным и распространенным является цисплатин (цис-диаминдихлорплатина(II), цис-ДДП). Его биологическая активность основана на способности связываться с ДНК и изменять структуру двойной спирали в месте связывания. Образование устойчивого комплекса с платиновыми препаратами приводит к длительному подавлению экспрессии генов и гибели клетки. В связи с этим, особый интерес представляет изучение функциональной роли белков, способных узнавать и избирательно связываться с участками ДНК, поврежденными цисплатином. Среди подобных белков, основная доля приходится на НМГВ-доменные белки, содержащие структурно-функциональный мотив, известный как НМГВ-домен. Белки НМГВ1 и НМГВ2 являются представителями обширного семейства белков с высокой электрофоретической подвижностью (High Mobility Group) и участвуют в образовании ДНК-белковых комплексов, ответственных за активацию транскрипции генов. На сегодняшний день не вполне понятно влияние цисплатина на структурную организацию хроматина, а также пути его транспорта в клетку. НМГВ-доменные белки могут быть промежуточным субстратом при транспорте цисплатина к ДНК. С одной стороны, они имеют в своем составе необходимые для связывания цисплатина серосодержащие аминокислотные остатки, а с другой стороны, эти белки присутствуют в значительных количествах не только в ядре, но и цитоплазме.

В работе методами УФ и ИК спектроскопии поглощения и кругового дихроизма исследовано влияние цисплатина на структуру ДНК-белковых комплексов. Обнаружено, что цисплатин способен взаимодействовать не только с ДНК, но и со свободными белками НМГВ1 и НМГВ2, вызывая структурные изменения белковых молекул. Выявлены отличия в конформационных изменениях в структуре белков НМГВ1 и НМГВ2 при их взаимодействии с цис-ДДП.

Связывание белка НМГВ1 с ДНК-платиновым аддуктом не приводит к заметному изменению в структуре ДНК. В случае белка НМГВ2 в комплексе происходят существенные возмущения в структуре ДНК, которые могут быть вызваны либо связыванием НМГВ2 и с платиновыми аддуктами, и со свободными участками ДНК, либо связыванием белка только с участком ДНК, поврежденным цисплатином и изменениями структуры ДНК вблизи аддукта. В обоих случаях, можно предположить, что эти спектральные изменения вызваны повышенным сродством белка НМГВ2 к платинированной ДНК в сравнении с белком НМГВ1.

В свою очередь, поведение белковых полос в спектрах КД комплексов с обоими белками, указывает на отсутствие структуризации белковой молекулы, характерной для связывания НМГВ-домена с нативной ДНК.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-01500 – проведение спектральных исследований, и грант № 18-04-01199 – получение и очистка белков НМГВ1 и НМГВ2).

Исследование модификаций коллагена I типа методом ИК-спектроскопии

Старостина А. А.¹, Павлов С.И.², Лихачев А.И.², Нащекина Ю.А.³, Трусова Н.А.^{1,3}, Сироткина М.Ю.³, Нащекин А.В.².

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³Институт цитологии РАН

e-mail: cap.quicksilver@gmail.com

Создание искусственного микроокружения для культивации клеток вне организма является актуальной задачей современной регенеративной медицины. Коллаген – один из компонентов микроокружения в организме находится в фибриллярном виде и окружен различными компонентами внеклеточного матрикса [1]. Управление процессом образования фибрилл *in-vitro* дает возможность создания коллагеновых волокон и тканей, поэтому изучение механизмов их формирования имеет большое значение для широкого применения в медицине и биологии. Однако существует проблема идентификации структуры сформированных биообъектов. Одним из перспективных, но мало используемых методов анализа таких объектов, является ИК Фурье-спектроскопия [2].

Целью настоящей работы являлась идентификация структурных форм и химических групп, формируемых в коллагене при его химической модификации, с помощью метода ИК Фурье-спектроскопии. Образцы представляли собой нанесенные на металлические подложки высушенные растворы молекулярного и фибриллярного коллагена I типа, в том числе после обработки перекисью водорода, и фитиновой кислотой (phytic acid) или глутаровым альдегидом. Перекись водорода являлась прототипом свободных радикалов в организме, участвующих в деградации коллагена. Фитиновая кислота и глутаровый альдегид – сшивающие агенты, увеличивающие прочность связи между фибриллами и молекулами коллагена.

В измеренных ИК-спектрах образцов молекулярного и фибриллярного коллагена выявляли характерные пики, идентификацию которых производили по представленным в литературе спектрах [3-5]. На основе данного анализа были выявлены (реперные) пики, характерные для молекулярного и фибриллярного коллагена, составлена база групп молекул с соответствующими им волновыми числами. Затем, при исследовании модифицированных образцов, наблюдали изменение формы и величины спектральных пиков в зависимости от концентрации модифицирующих агентов. По характерным пикам определяли изменение характера колебаний молекул, их перегруппировку, что позволяло делать выводы о формировании фибриллярной структуры коллагена. Тип сформированной структуры подтверждался с помощью электронно-микроскопических исследований.

Анализ спектров позволил выявить значительные различия между колебательными модами, характерными для молекулярной и фибриллярной структуры коллагена, которые, в частности, характеризовались пиком в области волновых чисел (1074-1087 см⁻¹), что соответствует растягивающим колебанием связи С-О, и изменением формы (более острый у молекулярного коллагена и плато у фибриллярного) пика в диапазоне 3000 – 3690 см⁻¹, соответствующего колебанию ОН-группы. Модификация коллагена путем добавления натрий-фосфатного буфера и глутарового альдегида, которые способствовали ускорению сшивки, приводила к возрастанию амплитуды соответствующих пиков, что свидетельствует об увеличении числа молекулярных колебаний с этими значениями волновых чисел. Показано также, что добавление перекиси водорода и увеличение её

концентрации приводит к разрушению фибриллярной структуры коллагена, проявляющемуся в уменьшении пика 1074-1087 см⁻¹. Напротив, при добавлении фитиновой кислоты, на спектрах наблюдали характерные для шивки коллагеновых молекул пики 1074-1087 см⁻¹. Добавление глутарового альдегида приводило к появлению новых пиков в области так называемого «отпечатка пальцев», а также к увеличению пика, характерного для амидов В с волновым числом 2941 см⁻¹.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования метода инфракрасной Фурье-спектроскопии для идентификации связей коллагена в молекулярной и фибриллярной форме. Были получены ИК-спектры коллагена, модифицированного различными агентами и выявлены специфические различия между ними. Создана база значений волновых чисел колебаний для идентифицированных химических групп, характерных для той или иной модификации коллагена. Подробно описаны спектральные особенности чистого коллагена I типа в молекулярной и фибриллярной форме.

Результаты работы расширяют возможности по проведению контролируемого процесса модификации фибриллярной структуры коллагена, что является важным шагом на пути к созданию сложноорганизованных коллагеновых структур для задач регенеративной медицины и биологии.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-03-00400а.

Список литературы

1. Di Lullo, Gloria A.; Sweeney, Shawn M.; Körkkö, Jarmo; Ala-Kokko, Leena; San Antonio, James D. Mapping the Ligand-binding Sites and Disease-associated Mutations on the Most Abundant Protein in the Human, Type I Collagen // *Journal of Biological Chemistry*. 2002, vol. 277, no. 6. P. 4223—4231.
1. Berthomieu, C., Hienerwadel, R. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy // *Photosynth Res* 101. 2009. P. 157–170.
2. HaiYing Liu; Ding Li; ShiDong Guo. Studies on collagen from the skin of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) // *Food Chemistry*. 2007, vol. 101, no. 2. P. 621-625.
3. Benedictode Campos Vidal; Maria Luiza S.Mello. Collagen type I amide I band infrared spectroscopy // *Micron*. 2011, vol. 42, Issue 3. P. 283-289.
4. Somasundaram Tamilmozhi; Anguchamy Veeruraj; Muthuvel Arumugam. Isolation and characterization of acid and pepsin-solubilized collagen from the skin of sailfish (*Istiophorus platypterus*) // *Food Research International*. 2013, vol. 54, no. 2. P. 1499-1505.

Номер проекта РФФИ: 20-03-00400а

Применение мегагерцового ультразвука для выделения нуклеиновых кислот

Петров Д. Г.¹, Антифеев И.Е.¹, Гермаш Н.Н.¹, Макарова Е.Д.¹

¹ИАП РАН

e-mail: dimoon88@mail.ru

В настоящее время анализ генетического материала становится массовым и повсеместным. Для качественного (достоверного) результата требуется высокий уровень

пробоподготовки анализируемого материала, и в условиях большого потока проб необходимо прежде всего сократить время для подготовки единичной пробы к анализу. В работе предложен альтернативный способ увеличения скорости массопереноса за счёт возникновения гидродинамических эффектов (явлений), при воздействии мегагерцового ультразвука (УЗ), на жидкую пробу, содержащую ДНК/РНК с твёрдофазным сорбентом.

Показано что мегагерцовый ультразвук заметно влияет на скорость массообменных процессов при выделении ДНК/РНК. В более ранних работах, было показано, что основной вклад в эффективность процесса выделения ДНК/РНК вносит стадия сорбции [1].

В работе показано, что эффективность выделения нуклеиновых кислот не линейно зависит от интенсивности УЗ воздействия при сорбции ДНК на магнитных частицах. Проанализирована зависимость эффективности выделения ДНК от интенсивности УЗ воздействия, и от времени воздействия.

Ранее, нашим коллективом проведён сравнительный анализ влияния температурного воздействия, в широком диапазоне, на эффективность выделения нуклеиновых кислот [2]. Сравнение этих зависимостей позволяет предложить ультразвуковое воздействие на жидкую пробу с твердофазным сорбентом, как альтернативу температурному воздействию.

Показано что при подборе оптимальных условий УЗ воздействия удаётся достичь, а в некоторых случаях и превзойти, эффективность выделения ДНК на магнитных частицах при рекомендуемом производителем реагентов температурном воздействии.

Обладая рядом преимуществ ультразвуковое воздействие в перспективе позволяет отказать от манипуляций температурой во время стадии сорбции ДНК, это в свою очередь позволяет сократить время всей процедуры выделения нуклеиновых кислот на 20-30%, без потери качественных характеристик выделенного материала.

Список литературы

1. D G Petrov, I E Antifeev, N N Germash and E D Makarova Analysis of the effectiveness of the stages of the concentration of genetic material. Phys.: Conf. Ser. 1400 033023.
2. Д.Г. Петров, Е.Д. Макарова, Н.А. Корнева, А.С. Альдекеева, Н.Н. Князьков. Воздействие полей разной природы на выход ДНК при выделении из модельных растворов на двуокиси кремния. 1. Влияние температуры. Научное приборостроение. Том 25, № 2 с 91-101. 2015 г.

Воздействие низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления в смеси воздуха и аргона на оптические свойства биотканей

Аиурбеков Н.А.¹, Шахсинов Г. Ш.¹, Гираев К.М.¹, Исрапов Э.Х.^{1,2}, Исаева З.М.¹, Муртазаева А.А.^{1,2}, Рабаданов К.М.¹

¹Дагестанский государственный университет

²Институт физики ДФИЦ РАН

e-mail: gadz@bk.ru

Настоящая работа посвящена исследованию воздействия холодной атмосферной плазмы на биологические ткани, лежащее в основе нового междисциплинарного научного направления, получившее название «плазменная медицина» [1, 2]. Приведены результаты экспериментального исследования воздействия низкотемпературной плазменной струи

атмосферного давления в смеси воздуха и аргона на спектры флуоресценции и диффузного отражения биотканей при температуре плазменной струи около 300 К.

Холодная плазменная струя создавалась барьерным наносекундным разрядом в потоке воздуха с аргоном в кварцевой трубке диаметром 1 мм.

Исследования проводились на образцах нормальной ткани печени птицы *in vitro*. Выбор данного вида биоткани обусловлен тем, что она имеет однородную структуру и возможные изменения оптических характеристик биоткани после ее обработки плазмой, могут быть наиболее выражены.

Исследуемые образцы представляли собой срезы биоткани с средними размерами $10 \times 10 \times 1,0$ мм, фиксированные на кварцевых подложках. С помощью специальной диафрагмы на поверхности биоткани выделялась круглая область площадью 1 см^2 , которая подвергалась облучению различными дозами плазменным факелом. Облучение производилось в течение нескольких фиксированных промежутков времени, на расстоянии 2 см от торца источника плазменной струи. После облучения к обработанному плазменным факелом участку подводился трехканальный оптоволоконный световод с двумя каналами возбуждения и одним каналом для снятия полезного оптического сигнала. Возбуждение производилось последовательно тремя источниками света: эксимерной лампой с широким спектром излучения для снятия спектров диффузного отражения; диодным лазером с длиной волны излучения 400 нм и твердотельным лазером с длиной волны излучения 355 нм для снятия спектров флуоресценции.

Спектры флуоресценции биотканей фиксировались с помощью автоматизированной системы мохроматор-спектрограф MS3504I (SOL Instruments, Минск), который позволял при помощи дифракционной решетки 200 штр/мм регистрировать панорамные спектры флуоресценции и диффузного отражения с исследуемых точек на поверхности срезов биотканей. Отсекание спектра возбуждения источников производилось с помощью фильтров, установленных перед входной щелью спектрографа.

В работе получены зависимости спектров диффузного отражения и флуоресценции биотканей от длительности их облучения плазменным факелом. В частности, установлено, что для образцов биотканей, облученных плазменным факелом в течение 10 минут, наблюдается рост интенсивности как спектров флуоресценции, так и спектров диффузного отражения по сравнению с контрольными образцами, не подвергавшимися облучению.

Обсуждаются механизмы воздействия различных активных частиц плазменной струи на структуру и свойства биоткани.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-90180.

Список литературы

1. Sysolyatina, E., Vasiliev, M., Kurnaeva, M., Kornienko, I., Petrov, O., Fortov, V., Ermolaeva, S. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2016. – 49(29). – P. 294002.
2. Babaeva N.Y., Naidis G.V. Modeling of plasmas for biomedicine // *Trends in biotechnology*. – 2018. – 36 (6). – P. 603-614.

Визуализация внутриклеточных структур бактерий при помощи экспансионной микроскопии

Румянцева Н. А.^{1,2}, А.Д. Ведяйкин^{1,2}, И.Е. Вишняков^{1,2}, М.А. Ходорковский¹

¹СПбПУ

²Институт цитологии РАН

e-mail: rumyanatasha@yandex.ru

Микроскопия играет важную роль в истории развития биологии и медицины. Многие открытия стали возможны лишь благодаря усовершенствованию разрешающей способности микроскопов. Однако дифракционный предел накладывает фундаментальные ограничения на разрешающую способность микроскопов (порядка 0,2 мкм) и не позволяет исследовать малые биологические объекты, например, локализацию белков в клетках. Одним из способов преодоления дифракционного предела являются методы сверхразрешающей микроскопии, которые позволяют достичь разрешения порядка единиц — десятков нанометров [1]. Но большинство таких методик требует наличия сложного оборудования, а также в ряде случаев использования специальных флуоресцентных красителей. В данной работе мы применили альтернативный метод, позволяющий существенно увеличить разрешение без преодоления дифракционного предела — экспансионную микроскопию (англ. expansion microscopy) [2]. Данный метод не требует установки дополнительного оборудования и основан на физическом расширении образца примерно в 4,5 раза в каждом измерении. Образец помещается в полиэлектrolитный гидрогель, который при помещении в очищенную воду расширяется [3].

Для работы был использован штамм *Escherichia coli*, в котором FtsZ (белок бактериального цитоскелета) слит с зеленым флуоресцентным белком mNeonGreen [4], что позволило визуализировать различные структуры в клетке при помощи флуоресценции. Клетки в экспоненциальной фазе роста фиксировались и затем обрабатывались веществом Acryloyl-X SE, благодаря которой к биомолекулам добавляются реакционноспособные группы, которые затем могут включаться в полимеры гидрогеля в процессе его полимеризации. После гелеобразования образец помещался в воду, в которой благодаря взаимодействию заряженных групп гель вместе с клетками расширялся. После данной обработки стало возможно визуализировать клеточные структуры с высоким разрешением (примерно в 4 раза лучше, чем в случае стандартной микроскопии) на обычном флуоресцентном микроскопе без какого-либо дополнительного оборудования.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что данный метод позволяет осуществлять визуализацию с существенно более высоким разрешением, чем стандартный флуоресцентный микроскоп. Благодаря этому можно наблюдать и анализировать локализацию белковых структур в клетке, характерный размер которых не превышает несколько десятков нанометров.

Список литературы

1. Sahl, S.J., S.W. Hell, and S. Jakobs, *Fluorescence nanoscopy in cell biology*. Nat Rev Mol Cell Biol, 2017. 18(11): p. 685-701.
2. Wassie, A.T., Y. Zhao, and E.S. Boyden, *Expansion microscopy: principles and uses in biological research*. Nat Methods, 2019. 16(1): p. 33-41.
3. Asano, S.M., et al., *Expansion Microscopy: Protocols for Imaging Proteins and RNA in Cells and Tissues*. Curr Protoc Cell Biol, 2018. 80(1): p. e56.

4. Moore, D.A., et al., *Probing for Binding Regions of the FtsZ Protein Surface through Site-Directed Insertions: Discovery of Fully Functional FtsZ-Fluorescent Proteins*. J Bacteriol, 2017. 199(1).

Контроль кислородного обеспечения тканей человека с использованием неинвазивной системы на основе многоканального интегрального анализатора оптических спектров

Мазинг М. С.¹, Зайцева А.Ю.², Кисляков Ю.Я.², Давыдов В.В.¹, Кондаков Н.С.³, Авдюшенко С.А.³

¹СПбПУ»,

²ИАП РАН,

³ВМедА

e-mail: mazmari@mail.ru

Здоровье и работоспособность человека во многом определяется процессами кислородного транспорта крови – основополагающего физиологического процесса, характеризующего жизнедеятельность всего организма в целом. Настоящие исследования направлены на решение фундаментальной проблемы контроля кислородного обеспечения тканей человека на основе новых недорогих и быстрых неинвазивных методов спектрального анализа, способных выполняться вне медицинских учреждений [1-3]. Предложенный метод контроля статуса кислородного обеспечения тканей основан на различиях спектров поглощения у оксигемоглобина и восстановленного гемоглобина [3-6], а также анализе отклика системы с применением математических методов обработки многомерных данных и визуализации образов [7, 8].

Система неинвазивного контроля кислородного обеспечения тканей человека состоит из двух блоков: 1) сенсорного измерительного и 2) информационного блока, включающего модули визуализации и распознавания образов. Сенсорный модуль представлен интегральным шестиканальным анализатором спектров и набором оптических сенсоров, обладающих перекрестной чувствительностью к биологически важным формам гемоглобина, генерирующим излучение определенной длины волны области спектра от 450 до 650 нм. Модуль визуализации и распознавания образов представлен в виде математической модели, реализующей функции обучения системы и распознавания многомерных образов [2, 7].

Экспериментальные исследования проведены на 28 испытуемых, до и после функциональной нагрузки, с целью оценки работоспособности диагностической системы в плане возможности получения «образов» функционального состояния испытуемых в виде комбинации численных показаний в условных единицах шести сенсоров различной длины волны, отражающих кислород-транспортные свойства организма. Функциональная нагрузка, представляющая собой задержку дыхания на максимально возможное время, характеризует устойчивость организма к гипоксии, общий уровень тренированности организма, а также позволяет судить о кислородном обеспечении тканей и выявлении скрытой дыхательной и сердечно-сосудистой недостаточности. Результаты численного

представления образов кислородного обеспечения тканей испытуемых регистрировались в состоянии покоя, в течение функциональной нагрузки и в периоде восстановления для контроля компенсаторно-приспособительных реакций организма в ответ на нагрузку.

Экспериментально показано, что каждый испытуемый имеет свой индивидуальный, воспроизводимый «образ» и может быть идентифицирован по этому «образу». В ходе применения математических методов обработки многомерных данных испытуемые разделились на три группы, согласно типу реакции на функциональную нагрузку – группа, у которой прослеживается изменение кислородного обеспечения тканей в момент начала вдоха и в течение последующего восстановления, группа, у которой нет изменений и группа, у которой есть существенное изменение кислородного статуса в момент восстановления по отношению к состоянию покоя. Каждая из выделенных групп обладает определенной тенденцией изменения «образа» в течение времени функциональной нагрузки, что объясняется различными компенсаторно-приспособительными реакциями и функциональным состоянием организма испытуемых.

Выявленные в проведенных исследованиях возможности аналитического комплекса формировать индивидуальные образы испытуемых в четко определенных ситуациях до функциональной нагрузки и их индивидуальные изменения после нагрузки могут быть использованы для формирования алгоритмов обучения системы распознавания функционального состояния испытуемых.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой эффективности нового методического подхода к решению проблем неинвазивного контроля здоровья и работоспособности человека. Измерительная система контроля кислородного обеспечения тканей человека позволяет получить необходимый спектр сведений о разнообразной патологии сосудов и может быть использована при создании нового поколения диагностических систем медицинского назначения.

Список литературы

1. Кислякова Л.П., Зайцева А.Ю., Кисляков Ю.Я. Неинвазивный анализ кислородного обеспечения двигательной активности руки по показателям, регистрируемым полиселективной оптической системой // Естественные и технические науки. — 2018. — №12. — С. 318-324.
2. Zaitceva A.Yu., Kislyakova L.P., Kislyakov Yu.Ya., Avduchenko S.A. Development of a multi-sensor analytical trainable system for non-invasive evaluation of adaptedness status of hazardous occupation specialists // Journal of Physics: CS. — 2019. — Vol. 1400, 033022.
3. Зайцева А.Ю., Кислякова Л.П., Кисляков Ю.Я. Распределение кислорода в поверхностных тканях организма человека при его вертикальном и горизонтальном положениях // Фундаментальные аспекты психического здоровья. — 2018. — №4. — С. 37-41.
4. Anderson R. R., Parrish J. A. The optics of human skin J. Invest. Dermatol. – 1981. – 77. – P. 13 – 19.
5. Корсунский, В. М. Интеллектуальные сенсоры: учеб. пособие / В.М. Корсунский, И.Д. Войтович. — М.: Изд-во Бином, Лаборатория знаний, 2009.— 624 с.
6. Кисляков Ю.Я., Зайцева А.Ю., Кислякова Л.П. Неинвазивный анализ кислородного обеспечения тканей человека при физической нагрузке по показателям полиселективных оптических сенсоров // Фундаментальные аспекты психического здоровья. — 2018. — №3. — С. 91-95.
7. Кислякова Л.П., Буляница А.Л., Кисляков Ю.Я., Гуляев В.И. Оценка функционального состояния человека при физических нагрузках по показателям

конденсата выдыхаемого воздуха, регистрируемым полиселективными электрохимическими сенсорами с применением проекционных методов многомерного анализа. «Научное приборостроение» 2016, т. 26, № 2 с. 37-47.

8. Сизиков В. С. Математические методы обработки результатов измерений СПб.: Политехника, 2001.

Фотоимпедансный эффект в контакте металл/электролит/клетка

Ступин Д. Д.¹, Абелит А.А.^{1,2}

¹СПБАУ РАН

²СПбПУ

e-mail: stu87@ya.ru

На сегодняшний день электрическая импедансная спектроскопия (ЭИС) живой материи является бурно развивающейся областью экспериментальной биофизики, практической медицины и биосенсорики [1-3]. Одним из наиболее ярких примеров биологического приложения ЭИС является технология ECIS [3], которая позволяет с помощью измерения импеданса покрытого живыми клетками электрода (контакта металл/электролит/клетка, МЭК) оценивать число клеток на электроде, определять их функциональное состояние, а также исследовать реакцию клеток на различные внешние воздействия, что открывает широкие перспективы для создания гибридных био-электронных датчиков [4-8]. В частности, в работе [4] мы показали, что на основе концепции ECIS можно реализовать детектор поражающего излучения, чувствительным элементом которого являются одиночные живые клетки. В настоящей работе мы развили данное направление и изучили временную динамику импедансных спектров контакта МЭК при его облучении летальной дозой УФ излучения. В результате мы обнаружили, что высокочастотная составляющая импеданса имеет нетривиальное поведение, а именно вначале обнаруживается медленный рост модуля импеданса, после которого происходит его резкое падение до уровня пустого, контрольного электрода. Мы связываем данные эффекты с наличием двух конкурирующих процессов при УФ облучении:

1. Появление под действием УФ пузырей [9] на поверхности клеточной мембраны, которые препятствуют протеканию тока через контакт МЭК, то есть увеличивают его сопротивление. Данный процесс доминирует на начальной стадии облучения.
2. Увеличение проводимости клеточной мембраны, вызванное ее деградацией и разрушением под действием УФ [4]. Данное явление на начальной стадии облучения проявляется слабо, однако с течением времени его вклад в проводимость МЭК растет, и оно начинает доминировать над первым эффектом. Описанный механизм также косвенно подтверждается с помощью флуоресцентной микроскопии.

Таким образом, влияние факторов 1 и 2 на облучаемый контакт МЭК приводит к немонокотонной зависимости его импеданса от времени. Данный фотоимпедансный эффект может быть использован для детального изучения влияния УФ на различные клеточные линии, а также его учет может значительно улучшить предложенную в [4] методику детектирования поражающего излучения. В частности, немонотонность поведения импеданса позволяет отличить гибель клеток под действием УФ от, например, гибели клеток под

действием токсинов [5]. Мы надеемся, что результаты нашей работы откроют новые пути для решения важных современных задач в областях науки и техники, в которых необходимо работать с поражающим излучением: от проблем экологии и здравоохранения до приложений в аэрокосмической промышленности.

Список литературы

1. Liu Q., Wang P. Cell-based biosensors: principles and applications. – Artech House, 2009.
2. Martinsen O. G., Grimnes S. Bioimpedance and bioelectricity basics. – Academic press, 2011.
3. Jiang W. G. (ed.). Electric cell-substrate impedance sensing and cancer metastasis. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 17.
4. Stupin D. D. TiN Nanoporous Electrode Covered by Single Cell as Bio-Electronic Sensor of Radiation Hazard //Semiconductors. – 2018. – Т. 52. – №. 5. – С. 600-601.
5. Stupin D. D. A Single-Cell Electronic Sensor of Toxins //JPhCS. – 2017. – Т. 917. – №. 4. – С. 042006.
6. Tan L., Schirmer K. Cell culture-based biosensing techniques for detecting toxicity in water //Current opinion in biotechnology. – 2017. – Т. 45. – С. 59-68.
7. Asphahani F. et al. Single-cell bioelectrical impedance platform for monitoring cellular response to drug treatment //Physical biology. – 2011. – Т. 8. – №. 1. – С. 015006.
8. Tlili C. et al. Fibroblast cells: a sensing bioelement for glucose detection by impedance spectroscopy //Analytical chemistry. – 2003. – Т. 75. – №. 14. – С. 3340-3344.
9. Charras G. T. et al. Life and times of a cellular bleb //Biophysical journal. – 2008. – Т. 94. – №. 5. – С. 1836-1853.

Номер проекта РФФИ: 18-32-00363

Неинвазивная оценка функционального состояния человека с использованием мультисенсорной обучаемой диагностической системы на основе полиселективных электрохимических сенсоров и математических методов многомерного анализа

Созинова О. Ю.¹, Зайцева А.Ю.¹, Кислякова Л.П.¹, Кисляков Ю.Я.¹

¹ИАП РАН

e-mail: shopping.spb@gmail.com

Разработан новый принцип неинвазивной диагностики для медико-биологических исследований с применением искусственной мультисенсорной обучаемой аналитической системы для контроля функционального состояния человека по показателям конденсата выдыхаемого воздуха, в котором в значительном количестве присутствуют продукты обмена веществ. Предложенный новый метод направлен на решение фундаментальной проблемы химического анализа сложных многокомпонентных биосредств их идентификации на основе новых методов многопараметрического электрохимического анализа с применением искусственных нейроподобных систем и математических методов обработки массивов многомерной информации [1, 2]. Предлагаемый подход отличается от

существующих тем, что не требует высокоточного определения содержания в биосредах определенных химических компонентов, которое ограничивается уровнем селективности и чувствительности сенсоров к основному измеряемому компоненту и ряду сопутствующих, мешающих веществ, а предлагается использовать массив сенсоров с так называемой перекрестной чувствительностью. Каждый сенсор такой системы реагирует на присутствие сразу нескольких компонентов анализируемой среды. Получаемая совокупность многомерных данных требует современной математической обработки [2, 3]. Предложенный метод позволяет осуществлять неинвазивный контроль реакции человека на функциональные и физические нагрузки, а также проводить диагностику и прогнозирование заболеваний с помощью отнесения испытуемого в ту или иную группу функционального состояния [4].

Экспериментальные исследования были проведены на пяти испытуемых до и после физической нагрузки с целью оценки и демонстрации работоспособности диагностической системы. Для решения данной задачи разработан макет обучаемой мультисенсорной диагностической системы. Сенсорный электрохимический модуль представлен массивом полиселективных электрохимических сенсоров с перекрестной чувствительностью (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} катион чувствительные, F^- , Cl^- , NO_3^- анион чувствительные, рН электрод) [2, 3]. Каждый из сенсоров генерирует относительно опорного потенциала электрода сравнения выходной сигнал – ЭДС электродной ячейки. Совокупность ЭДС, регистрируемых сенсорами, позволяет формировать «образы» исследуемой среды в виде композиций электродных потенциалов. Модуль обучения и распознавания представлен в виде математической модели, реализующий функции обучения системы и распознавания образов.

Установлено, что используя комплект выбранных полиселективных электрохимических сенсоров можно получать воспроизводимые индивидуальные образы конденсата. Результаты проведенных исследований показывают, что «образ» каждого из испытуемых в состоянии покоя имеет свои индивидуальные особенности. Физические нагрузки видоизменяют его. Были применены проекционные методы (в том числе метод главных компонент) для получения «образов» испытуемых в простой и наглядной форме в виде точек в двумерном пространстве первых двух главных компонент начального (до) и конечного (после нагрузки) состояний испытуемых. Было выделено два типа реакции испытуемых на физическую нагрузку – в тч группа людей более чувствительных к нагрузке. Анализ взаимного расположения двух образов до и после нагрузки составляет полный цикл анализа реакций каждого испытуемого. Выявленные в проведенных экспериментах возможности исследуемого аналитического комплекса формировать индивидуальные «образы» испытуемых в четко определенных ситуациях до нагрузки и их индивидуальные изменения после фиксированных нагрузок были использованы для формирования алгоритмов «обучения» аналитической системы к «распознаванию» испытуемых и их функционального состояния.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о работоспособности аналитической системы и перспективе исследований биохимических показателей конденсата выдыхаемого воздуха с применением методов мультисенсорных обучаемых систем в качестве нового подхода к решению проблем неинвазивного контроля здоровья и работоспособности человека.

Список литературы

1. Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Мультисенсорные системы типа электронный язык – новые возможности создания и применения химических сенсоров //Успехи химии. 2006. Т. 75. № 2. С. 141-150.

2. Кислякова Л.П., Буляница А.Л., Кисляков Ю.Я., Гуляев В.И. Оценка функционального состояния человека при физических нагрузках по показателям конденсата выдыхаемого воздуха, регистрируемым полиселективными электрохимическими сенсорами с применением проекционных методов многомерного анализа // Научное приборостроение. – 2016.--№26 (2).—С.37-47.
3. Zaitceva A.Yu., Kislyakova L.P., Kislyakov Yu.Ya., Avduchenko S.A. Development of a multi-sensor analytical trainable system for non-invasive evaluation of adaptedness status of hazardous occupation specialists // Journal of Physics: CS. —2019. — Vol. 1400, 033022.
4. Зайцева А.Ю., Кисляков Ю.Я., Кислякова Л.П., Авдюшенко С.А. Искусственная мультисенсорная система контроля функционального состояния специалистов опасных профессий // Естественные и технические науки. — 2019. — № 11. — С. 355-358.

Patient-specific kidney phantoms for an LED-based photoacoustic imaging.

Nikitichev D. I.¹

¹University College London

e-mail: d.nikitichev@ucl.ac.uk

Ultrasound (US) imaging is widely used to guide vascular access procedures such as arterial and venous cannulation. As needle visualisation with US imaging can be very challenging, it is easy to misplace the needle in the patient and it can be life threatening. Photoacoustic (PA) imaging is well suited to image medical needles and catheters that are commonly used for vascular access. To improve the success rate, a certain level of proficiency is required that can be gained through extensive practice on phantoms. Unfortunately, commercial training phantoms are expensive and custom-made phantoms usually do not replicate the anatomy very well. Thus, there is a great demand for more realistic and affordable ultrasound and photoacoustic imaging phantoms for vasculature access procedures training. Three-dimensional (3D) printing can help create models that replicate complex anatomical geometries. However, the available 3D printed materials do not possess realistic tissue properties. Alternatively, tissue-mimicking materials can be employed using casting and 3D printed moulds but this approach is limited to the creation of realistic outer shapes with no replication of complex internal structures. In this study, we developed a realistic vasculature access phantom using a combination of mineral oil based materials as background tissue and a non-toxic, water dissolvable filament material to create complex vascular structure using 3D printing. US and PA images of the phantoms comprising the complex vasculature network were acquired. The results show that 3D printing can facilitate the fabrication of anatomically realistic training phantoms, with designs that can be customized and shared electronically. LED-based photoacoustic and ultrasound imaging system to locate abnormalities and tumours. This is a significant step in further integration of the novel compact system in clinical practice.

Список литературы

1. D. I. Nikitichev,etal.:“Patient-specific printed 3D models for education, research and surgicalsimulation”; Book Chapter; In Tech Open 2018

Исследование воздействия гипохлорита натрия на структуру нуклеиновых кислот методом инфракрасной спектроскопии

Осинникова Д. Н.¹, Морошкина Е.Б.¹, Поляничко А.М.^{1,2},

¹СПбГУ

²Институт Цитологии РАН

e-mail: d.osinnikova@spbu.ru

Гипохлорит натрия (NaClO) – одно из наиболее широко применяемых противомикробных средств. Этот препарат входит в сотню химических соединений, имеющих наибольшее значение для практики. Он применяется в медицине, пищевой промышленности и сельском хозяйстве как бактерицидное и стерилизующее средство. Отличительной особенностью гипохлорита является способность одновременного воздействия, как на нуклеиновые кислоты (НК), так и на белки и полипептиды. Данное свойство препарата позволяет обеспечить уничтожение бактерий с минимальным риском развития резистентности. К настоящему времени хорошо известно, что гипохлорит натрия способен разрушать белки и полипептиды. Высокие концентрации препарата способны также разрушать клеточную мембрану бактерий. Однако, его влияние на молекулу ДНК остается мало изученным.

Ранее нами было показано, что при взаимодействии с гипохлоритом натрия происходит как разрушение вторичной структуры ДНК (денатурация), так и химическая модификация азотистых оснований (Osinnikova, 2019). С целью уточнить характер изменения структуры отдельных элементов молекулы ДНК при таком взаимодействии в рамках данной работы проведено исследование воздействия гипохлорита натрия на структуру НК методом инфракрасной спектроскопии. Анализ спектров поглощения НК в среднем ИК диапазоне позволяет наблюдать колебания химических групп, входящих в состав как азотистых оснований, так и сахарофосфатного остова. Полученные спектры демонстрируют заметные изменения во всем исследованном спектральном диапазоне (2000 – 800 см⁻¹). Проведенный нами анализ показывает, что высокие концентрации гипохлорита приводят к разрушению азот-содержащих гетероциклов. Однако при этом наиболее яркие изменения в спектре наблюдаются в области колебаний сахаров (1100 – 800 см⁻¹). Мы полагаем, что данные изменения указывают на постепенное нарушение геометрии двойной спирали ДНК с ростом концентрации гипохлорита в растворе, которые в итоге приводят к полному разрушению структуры сахарофосфатного остова.

Таким образом, совокупность полученных в работе результатов, а также данных, полученных ранее, указывают на способность гипохлорита не только нарушать вторичную структуру НК, но и существенно нарушать структуру азотистых оснований и сахарофосфатного остова НК. Эффективное разрушение нуклеиновых кислот открывает возможность использования гипохлорита в медицинских целях, в том числе, для разрушения бактериальных пленок.

Авторы признательны за финансовую поддержку РФФИ (грант № 18-08-01500)

Список литературы

1. Osinnikova, D.N., Moroshkina, E.B., Mokronosova, E.S. (2019) Effect of sodium hypochlorite on nucleic acids of different primary and secondary structures. Journal of Physics: Conference Series, 1400 (3), 033001

Математическая модель механического возмущения мембраны нейрона под действием электрического импульса

Котикова М. Р.¹, Чижев А. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kotikova.mr@yandex.ru

Информация между нейронами передается посредством электрических импульсов. Вопрос создания модели, описывающей данный процесс, является важной частью изучения процессов в мозге человека, в том числе аномалий. Основная модель использует для описания электрических импульсов автоволновые процессы [1]. В ходе дальнейших исследований было установлено, что движение электрического импульса по аксону нейрона сопровождается малыми деформациями его формы [2]. Однако механизм такого воздействия установлен не был, что делало невозможным его математическое описание. Похожий эффект был экспериментально зафиксирован при электрической стимуляции клетки [3]. Для объяснения изменения формы клетки использовалось уравнение Липпманна, связывающее электрический потенциал мембраны и ее поверхностное натяжение. Таким образом, появилась основа математического описания данного механического смещения. При этом модели описывающей динамику механического изменения формы нейрона под влиянием электрического потенциала нет.

В данной работе предложена одномерная модель нейрона, меняющего форму при стимуляции. Модель имеет форму длинного цилиндра, поверхность которого представляет собой упругую мембрану, а внутри находится сплошная среда. Использовались уравнения сплошной несжимаемой среды: уравнение сохранения импульса и уравнение неразрывности.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{E(R - R_0)}{R_0^2} \right) = 0$$

$$\frac{2}{R_0} \frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Здесь $u(t, x)$ – скорость сплошной среды, ρ – плотность, $R(t, x)$ – радиус нейрона, R_0 – радиус нерастянутой мембраны, $E(t, x)$ – модуль упругости мембраны.

На основе данной модели были рассмотрены две задачи для цилиндрического нейрона со свободными поверхностями в качестве граничных условий. 1) Был смоделирован ответ нейрона на краткий электрический импульс, локализованный на отрезке цилиндрического нейрона. В зависимости от полярности импульса, модуль упругости $E(t, x)$ изменяется, что приводит к распространению возмущения радиуса и скорости. Качественный характер и времена процессов согласуются с экспериментом [3]. 2) Был симитирован потенциал действия мембраны как треугольный импульс $E(t, x)$, движущийся со скоростью 1 м/с. Наблюдалось колебание радиуса, движущееся согласованно с импульсом, что соответствует экспериментальным данным, представленным в работе [2]. Таким образом, сформулирована модель нейрона, позволяющая описать его механическую деформацию в ответ на воздействие электрического импульса.

Работа поддержана грантом РНФ 16-15-10201-П.

Список литературы

1. A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *J. Physiol.* 117(4), 500–544 (1952).
2. I. Tasaki, K. Iwasa, Rapid Pressure Changes and Surface Displacements in the Squid Giant Axon Associated with Production of Action Potentials, *The Japanese journal of physiology* (1982)
3. Y. Yang, X. Liu, S. Wang and N. Tao, Plasmonic imaging of subcellular electromechanical deformation in mammalian cells, *Journal of Biomedical Optics* 24, 1-7, 7 (2019).

Номер проекта РФФИ: 19-015-00183

Частотно-фазовая синхронизация зрительно индуцированных МЭГ-сигналов коры головного мозга человека

Исаева А. Г.¹, Панищев О.Ю.¹, Демин С.А.¹, Ильдирякова А.Р.¹

¹КФУ

e-mail: nastyaadema@mail.ru

Использование методов анализа частотно-фазовой синхронизации при исследовании биоэлектрической активности коры головного мозга позволило значительно продвинуться в понимании физиологических механизмов мозговой деятельности, в частности, ее нарушений. Этому способствовало и развитие регистрирующей аппаратуры, позволяющей фиксировать все более слабые сигналы. К примеру, с помощью магнитоэнцефалографии, где используются квантовые интерферометрические датчики (СКВИДЫ) можно фиксировать изменения магнитного поля до 10^{-15} Тл/см [1]. Применение таких устройств, а также современные методы анализа эффектов согласования и взаимодействия дают возможность более глубокого понимания процессов, обеспечивающих высшую нервную деятельность.

В данной работе с помощью методов на основе формализма функций памяти (ФФП) [2] проводится сопоставительный анализ индуцированных нейромагнитных откликов коры головного мозга здоровых людей на воздействие двух зрительных мерцающих стимулов. В наших предыдущих работах [3, 4] основное внимание акцентировалось на исследованиях проявления фоточувствительной эпилепсии (ФЧЭ) при зрительном стимулировании испытуемых. В данном же случае основной задачей было раскрыть механизмы реакции на разные зрительные стимулы у здоровых людей. Формализм функций памяти [2] позволяет получать динамические, спектральные и стохастические характеристики изучаемых сигналов, а также количественно оценивать проявления в них эффектов статистической памяти.

Регистрация вызванных МЭГ-сигналов в ответ на стимулы цветовых комбинаций (красный-голубой и красный-зеленый) выполнялась установкой Neuromag-122 (Neuromag Ltd., Finland) при помощи 61 СКВИД-сенсора (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) с частотой дискретизации 500 Гц [1]. Световые стимулы генерировались на специальный экран 80 раз по 2 секунды с интервалом 3 секунды. Результаты всех попыток усреднялись. В начале каждой попытки 0.4 секунды стимул не подавался –

фиксируется контрольный сигнал. В эксперименте участвовали 9 здоровых испытуемых (возраст 22–27 лет), не имеющих наследственной предрасположенности к эпилепсии.

На первом этапе на основе коэффициента корреляции для каждого стимула были определены области, взаимодействие которых (в среднем по группе) при разных стимулах различалось сильнее всего. Для второго этапа были выбраны испытуемые с наиболее типичными (по своим характеристикам) сигналами МЭГ при воздействии стимула. Далее для них проводился анализ фазовых портретов динамических ортогональных переменных, спектров мощности кросскорреляционной функции, а также частотных зависимостей параметра немарковости. В результате были получены статистические данные по динамическим, спектральным и стохастическим характеристикам МЭГ сигналов, позволяющие построить картину наиболее ярких различий взаимодействия областей коры головного мозга при воздействии рассмотренных стимулов. Полученные результаты дают возможность более глубокого понимания процессов распространения возбуждения в коре головного мозга при зрительных раздражителях.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Отдельные результаты настоящего исследования были получены при финансовой поддержке РФФИ 14-02-31385 мол_а.

Список литературы

1. Bhattacharya J., Nonlinear dynamics of evoked neuromagnetic responses signifies potential defensive mechanisms against photosensitivity, *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, Vol. 14, 2701-2720, 2004
2. Demin S.A., Statistical quantifiers of memory for an analysis of human brain and neurosystem diseases, *Physica A*, Vol. 387, 2100-2110, 2008
3. Panishev O.Y., Studying properties of abnormal human brain activity in photosensitive epilepsy caused by light stimulation, *Biomedical Engineering*, Vol. 49, 236-239, 2015
4. Panishev O.Yu., Cross-correlation markers in stochastic dynamics of complex systems, *Physica A*, Vol. 389, 4958-4969, 2010

Каноническая формулировка теоретико-полевого варианта теории вложения с Эйнштейновскими связями

Семенова Е. Н.¹, Пастон С.А.¹

¹СПбГУ

e-mail: derenovacio@mail.ru

Общая теория относительности является общепринятой теорией гравитации и успешно используется в практических расчетах, однако до сих пор не проведена процедура квантования самого гравитационного поля, описываемого в терминах метрики пространства-времени. Такая процедура сопряжена со значительными техническими и идеологическими сложностями [1].

Для решения проблемы квантования гравитации различными исследователями использовались два основных подхода: либо гравитационное поле пытались описать в теоретико-полевым, а не геометрическом аспекте, что делает теорию гравитации более похожей на теории прочих фундаментальных взаимодействий, для которых квантование оказывается успешным (как это, например, делал Р. Фейнман в своих "Лекциях по гравитации"), либо для геометрического описания гравитации подбирались другие переменные.

Одним из вариантов второго подхода является теория вложения [2], в которой гравитация описывается как динамика трехмерного пространства, рассматриваемая аналогично динамике струны, которой соответствует двумерная поверхность в плоском пространстве-времени. В качестве действия берется стандартное выражение Эйнштейна-Гильберта, выраженное в терминах альтернативной переменной – функции вложения. Соответствующие этому действию уравнения Эйлера-Лагранжа (уравнения Редже-Тейтельбойма) оказываются несколько более общими по отношению к уравнениям Эйнштейна, кроме решений уравнений Эйнштейна они содержат так называемые "лишние" решения, которые можно пытаться интерпретировать как эффекты, связанные с наличием темной материи в рамках ОТО.

В работе [3] была предложена новая формулировка теории вложения в виде некоторой теории поля в плоском объемлющем пространстве, таким образом оба подхода к решению проблем квантования гравитации объединяются. В этой теории "теории разбиения" объемлющее пространство разбивается на систему четырехмерных поверхностей, каждая из которых подчиняется уравнениям теории вложения, а взаимодействие между разными поверхностями отсутствует. Каждая из таких поверхностей может рассматриваться как 4-мерное пространство-время, и задается как поверхность постоянных значений набора скалярных полей в плоском объемлющем пространстве. Данный подход имеет ряд преимуществ по сравнению с оригинальной теорией вложения: к примеру, нет необходимости вводить координаты на четырехмерных поверхностях, чего нельзя избежать как в эйнштейновской гравитации, так и в оригинальной теории вложения.

Необходимым шагом на пути квантования в рамках теории разбиения является изучение гамильтоновой формулировки варианта данной теории, в котором дополнительно

накладываются эйнштейновские связи, в результате чего теория становится эквивалентной ОТО.

Полученное каноническое описание теории разбиения в дальнейшем может быть использовано для построения функционального интеграла теории, позволяющего изучить особенности ее квантования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-01-00081

Список литературы

1. Carlip S., Quantum Gravity A Progress Report, Reports on Progress in Physics, том. 64, 885-942, 2001г.
2. Regge T., Teitelboim C., General relativity à la string: a progress report, Proceedings of the First Marcel Grossmann Meeting, 1975, 77-88, 1977г.
3. Paston S. A., Gravity as a field theory in flat space-time, Theoretical and Mathematical Physics, том. 169, 1600-1610, 2011г.

Номер проекта РФФИ: 20-01-00081

Исследование системы уравнений диффузии с реакцией, связанной с формированием сетчатки глаза Дрозофилы

Руколайне С. А.¹, Варш С. Е.²

¹ФТИ, ²СПбПУ

e-mail: rukol@ammp.ioffe.ru

Сетчатка глаза плодовой мушки Дрозофилы представляет из себя почти идеальную периодическую гексагональную структуру. Адекватная математическая модель, объясняющая формирование этой регулярной структуры, до сих пор отсутствует. В статье [1] была предложена математическая одномерная пространственно-дискретная модель, отражающая некоторые особенности образования реальной регулярной структуры. В статьях [2-4] эта пространственно-дискретная модель была усовершенствована и перенесена на двухмерный случай. Имеющаяся модель основана на системе уравнений пространственно-дискретной диффузии с реакцией. Эта модель имеет принципиальные недостатки. Например, имеющаяся модель существенно использует базовую гексагональную матрицу, состоящую из клеток ткани, топологически эквивалентную гексагональной. В действительности же клетки ткани не образуют топологически гексагональную матрицу. Неясно также, связана ли конечная регулярная структура со структурой матрицы клеток ткани? Кроме того, в модели считается, что часть регулярной структуры уже сформирована. Поэтому вопрос, как структура начала формироваться, остается открытым. Таким образом имеющаяся модель не объясняет формирование всей регулярной структуры.

В этом докладе мы исследуем систему уравнений пространственно-непрерывной диффузии с реакцией, связанную с имеющейся моделью. Пространственно-непрерывная модель позволяет использовать средства классического непрерывного анализа, см., например, [5]. Такая модель свободна также от ограничений пространственно-дискретной модели, накладываемых матрицей клеток ткани. Мы определяем условия, при которых возможно формирование регулярной структуры.

Список литературы

1. Pennington, M. W., Lubensky, D. K. Switch and template pattern formation in a discrete reaction-diffusion system inspired by the *Drosophila* eye. *Eur. Phys. J. E* 33: 129–148, 2010.
2. Lubensky, D. K., Pennington, et al. A dynamical model of ommatidial crystal formation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108: 11145–11150, 2011.
3. Gavish, A., Barkai, N. A two-step patterning process increases the robustness of periodic patterning in the fly eye. *J. Biol. Phys.* 42: 317–338, 2016.
4. Gavish, A., Shwartz, A., et al. Periodic patterning of the *Drosophila* eye is stabilized by the diffusible activator Scabrous. *Nat. Commun.* 7: 10461, 2016.
5. Мюррей Дж. Д. *Математическая биология. Том II. Пространственные модели и их приложения в биомедицине.* М.-Ижевск: РХД, 2011.

Номер проекта РФФИ: 17-01-00638

Начально-краевая задача для системы уравнений одномерной неньютоновской гемодинамики

Кривовичев Г. В.¹

¹СПбГУ

e-mail: g.krivovichev@spbu.ru

Работа посвящена аналитическому решению начально-краевой задачи для системы уравнений, описывающей динамику крови в одномерном неньютоновском приближении. Рассматривается случай сосуда конечной длины с периодическими граничными условиями. Система уравнений получается посредством осреднения трехмерных уравнений гидродинамики в цилиндрических координатах по поперечному сечению сосуда. Построенная математическая модель представляет собой нелинейную гиперболическую систему уравнений в частных производных первого порядка.

Решение поставленной задачи производится с помощью метода малого параметра. Для нахождения каждого из приближений решается задача для неоднородной линейной системы уравнений. Для решения однородных задач используется метод Фурье. Неоднородная задача решается посредством разложения по собственным функциям.

В рамках работы рассматривается несколько реологических моделей крови как неньютоновской жидкости – степенная модель, модель Карро, Карро – Иосиды, Кросса и модифицированная модель Кросса [1, 2]. В ходе вычислительного эксперимента модели сравниваются по амплитуде затухания вещественных частей решения. Помимо этого, исследуется влияние профиля осевой компоненты вектора скорости на получаемое решение. Показано, что в пределах значений параметров, характерных для физиологии, существенного влияния вид профиля не оказывает.

Полученные результаты могут быть полезны как при сравнении друг с другом разных моделей крови, так и для тестирования программ, реализующих численные методы решения нелинейных задач одномерной гемодинамики.

Список литературы

1. Ameenuddin M., Anand M., Massoudi M. Effect of shear-dependent viscosity and hematocrit on blood flow // Applied Mathematics and Computation. 2019, 356, pp. 299-311.
2. Cho Y.I., Kensey K.R. Effects of the non-Newtonian viscosity of blood on flows in a diseased arterial vessel. Part I: Steady flows // Biorheology. 1991, 28, pp. 241-262.

Номер проекта РФФИ: 16-31-00021мола

Моделирование физических процессов при распространении ультразвуковой волны в металлических средах

Можайко А. А.¹, Давыдов В.В.^{1,2}, Рудь В.Ю.²

¹СПбПУ,

²ВНИИФ

e-mail: annaanna-1996@mail.ru

Одной из задач прикладной физики является определение внутренних дефектов в металлических средах. Сложность поиска и идентификации дефектов зависит от места размещения металлической конструкции и состояния поверхности объекта контроля. Для того, чтобы выявить подобные дефекты, на практике применяются методы неразрушающего контроля. К таким методам относят: ультразвуковой, радиоволновый, магнитный, тепловой, вихретоковый, электрический, радиационный и капиллярный [1, 2].

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля считаются одними из самых достоверных и высокоскоростных, но необходимость в обеспечении акустического контакта между ультразвуковыми преобразователями и контролируемым изделием является основным фактором, который ограничивает применение ультразвукового контроля для решения различных задач, связанных как с исследованиями, так и диагностикой. Поэтому разработка бесконтактных методов генерации и приема ультразвуковых волн в металлах [2] крайне актуальна.

Одним из её решений является разработка методов ультразвукового контроля с использованием электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) на фазированной решетке. С помощью ЭМАП можно осуществлять поиск дефектов металлических конструкций и сварных швов бесконтактно, без применения контактной жидкости и зачистки поверхности [4, 5].

В данной работе детально рассмотрен ЭМАП на фазированной антенной решетке. В качестве элементов решетки используются катушки с током. Основным преимуществом многоэлементных преобразователей является возможность фокусировки и углового сканирования ультразвукового луча, что позволяет проводить исследования труднодоступных областей объекта для контроля их состояния.

Важную роль при разработке данных устройств играет компьютерное моделирование ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток. На этапе проектирования моделирование позволяет выявить недостатки конструкции преобразователей и определить закономерности взаимодействия ультразвуковых волн с дефектами различного типа. Это значительно экономит временные ресурсы и уменьшает затраты при разработке устройств и показывает возможности исследования с их помощью металлов.

Эффективным способом расчета акустических полей ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток является моделирование методом конечных элементов. Одной из наиболее функциональных и перспективных программных сред для моделирования физических процессов является среда COMSOL Multiphysics. Данная программная среда позволяет рассчитывать электрические, магнитные, электромагнитные и акустические поля. Это дает возможность комплексного моделирования ЭМАП [3].

Модель электромагнитно-акустического преобразователя была спроектирована в программном пакете Comsol Multiphysics 5.2 (COMSOL Inc., Massachusetts, USA), используя модуль механика твердого тела. В качестве образцов с дефектами используются плоскопараллельные пластины толщиной от 6 до 32 мм. Производится расчет акустического поля, отраженного от следующих видов дефектов: боковое сквозное и несквозное цилиндрическое сверление, вертикальное сквозное и несквозное цилиндрическое сверление, запил, выходящий на внешнюю поверхность образца, запил, не выходящий на внешнюю поверхность образца, плоскодонный отражатель и сферический отражатель. Все модели параметризованы, поэтому возможен расчет пластин другой толщины и дефектов различных размеров. Это делает предложенный метод универсальным.

В результате моделирования физических процессов распространения ультразвуковой волны в металлических конструкциях разработана модель, позволяющая исследовать влияние формы, размеров, местоположения дефектов в пластине, а также геометрических параметров пластины, на формирование отраженного сигнала.

Список литературы

1. Базылев, Д.Н. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки / Д.Н. Базылев, В.А. Романович, С.Н. Сомов, А.А. Пыркин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т.61, №12. – С. 1060 – 1066.
2. Васильев А.Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, С.Ю. Гуревич, М.И. Каганов, Ю.П. Гайдуков; отв. ред. В.М. Березин. – Челябинск –М.: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339 с.
3. Мышкин, Ю.В. Моделирование акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток в трубах и прутках / Ю. В. Мышкин, К. В. Петров // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции, Могилев, 19-20 сентября 2017 г. / ред. кол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 519-529.
4. Drinkwater, B.W., Wilcox P.D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review / B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox // Ndt & E Int. – 2006. – 39. N 7. – P. 525 – 541.
5. Isla, J. Cegla F. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection / J. Isla, F. Cegla // Ultrasonics. – 2017. – N 78. – P. 1-9.

Квантовые эффекты при образовании шнура тока в халькогенидном стеклообразном полупроводнике

Совтус Н. В.¹, Мынбаев К.Д.¹

¹ФТИ им.А.Ф. Иоффе

e-mail: spnick93@mail.ru

При протекании тока в полупроводнике может возникнуть ситуация, когда плотность текущих зарядов в определенной области полупроводника будет гораздо выше, чем в остальных областях. Это явление называется шнурованием тока. На настоящее время известно, что одной из причин токового шнура можно считать проводимость, экспоненциально зависящую от обратной температуры [1, 2]. Проводимость такого типа наблюдается в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП). Данные полупроводники интересны тем, что на их основе можно создать устройства записи информации, гораздо более совершенные, чем классическая FLASH-память. [3]. В представленной работе проанализирована возможность образования в центре тонкой цилиндрической полупроводниковой пластины шнуров тока с квантующимся радиусом. Из оценки шнура с помощью классического математического аппарата было выяснено, что квантовые эффекты будут проявляться при радиусе шнура $r_{fil} \propto 10nm$. Электроны шнура попадают в радиально направ-

ленное электрическое поле $E = \frac{kT(r)}{e}$ ($T(r)$ — распределение температуры вдоль ради-

уса шнура). Было произведено исследование уравнения Шредингера для потенциала $U(r) = kT(r)$. Заменой $\psi(r) = \exp(f(r))$ уравнение Шредингера в цилиндрических коор-

динатах сведено к уравнению первой степени: $y' + y^2 + \frac{y}{r} = E - U(r)$ $y = f'(r)$. Из сооб-

ражений того, что в шнуре плотность вероятности нахождения электрона должна быть максимальна, была вычислена энергия электрона, напоминающая энергию электрона в атоме водорода или экситоне. Радиус шнура зависит линейно от квантового числа n . При бесконечно больших n наблюдается совпадение с классической теорией из [2]. Данная работа может быть полезна при изучении квантовых эффектов, возникающих при протекании токов в халькогенидных стеклообразных полупроводниках и любых полупровод-

никах с проводимостью $\sigma \propto \exp(-\frac{\Delta E}{kT})$, где ΔE — энергия активации полупроводника.

Список литературы

1. К.Д. Цэндин, Н.А. Богословский. ФТП, 46, 577 (2012)
2. Н.В. Совтус, К.Д. Мынбаев. ФТП, 53, 12 (2019)
3. W. Zhang, R. Mazzarello, M. Wuttig, E. Ma. Nature Rev. Mater., 4, 150 (2019).

Regular black holes and self-gravitating solitons replacing naked singularities

Dymnikova I.¹

¹Ioffe Institute

e-mail: igd.ammpp@mail.ioffe.ru

We outline the basic properties of regular black holes (RBH) and solitons replacing naked singularities which are predicted by analysis of dynamical equations. The Petrov classification of stress-energy tensors provides a definition of a vacuum as a medium by the algebraic structure of its stress-energy tensor and implies the existence of vacua whose symmetry is reduced in comparison with the maximally symmetric de Sitter vacuum associated with the Einstein cosmological term [1]. The Einstein equations for the stress-energy tensors with the algebraic structure $T_i^j = T_r^r$ ($p_r = -\rho$) satisfying the weak energy condition (WEC) admit the class of regular solutions which describe non-singular black holes and solitons with the de Sitter vacuum interiors.

Quantum evaporation of RBHs involves a 2-nd order phase transition followed by quantum cooling and resulting in a thermodynamically stable double-horizon remnant [2]. Primordial RBHs, their remnants and solitons can form graviatoms binding electrically charged particles [3]. Their observational signatures as heavy dark matter candidates [4] include electromagnetic radiation of graviatom within the range available for observations [3]. In graviatoms with the GUT scale interiors, where baryon and lepton numbers are not conserved, remnant components of gravi-atoms can induce proton decay, which could in principle serve as their additional observational signature in heavy dark matter searches at the IceCUBE experiment [4].

For rotating RBHs and solitons energy conditions distinguish two types of interiors. For the first type WEC is satisfied and interior consists of the rotating de Sitter vacuum disk. In the second type WEC is violated and interior contains also a phantom energy confined by the de Sitter disk and by additional closed de Sitter surface [6]. Electrically charged regular objects are governed by source-free equations of nonlinear electrodynamics coupled to gravity. Their de Sitter interiors have properties of a perfect conductor and ideal diamagnetic [5, 6]; the ring singularity is replaced with a superconducting current which serves as a nondissipative electromagnetic source [7].

The mass of objects is generically related to breaking of spacetime symmetry from the de Sitter group [8]. This allows to explain the observable negative mass-square differences for neutrinos by calculating their masses as the eigenvalues of the Casimir operator in the de Sitter space, and to evaluate the gravito-electroweak scale [9]. Spinning electromagnetic soliton can be applied as the toy model for interpretation of appearance of a minimal length scale in the electron-positron annihilation reaction. The scale $l_e = 1,57 \times 10^{-17}$ cm, revealed with the 5significance, can be understood as a distance of the closest approach of annihilated particles at which electromagnetic attraction is balanced by the gravitational repulsion of the interior de Sitter vacuum [10].

Список литературы

1. Dymnikova, General Relativity and Gravitation 24 (1992) 235; Physics Letters B 472 (2000) 33.
2. Dymnikova and M. Korpusik, Physics Letters B 685 (2010) 12.
3. Dymnikova and M. Fil'chenkov, Advances in High Energy Physics 13 (2013) 746894.
4. Dymnikova and M.Khlopov, Intern. J. of Modern Physics D 24 (2015) 1545002.

5. Dymnikova, Physics Letters B 639 (2006) 368.
6. Dymnikova and E. Galaktionov, Classical and Quantum Gravity 32 (2015) 165015.
7. Dymnikova, Intern. Journal of Modern Physics D 24 (2015) 1550094.
8. Dymnikova, Classical and Quantum Gravity 19 (2002) 725.
9. D. V. Ahluwalia and I. Dymnikova, Intern. J. of Modern Physics D 12 (2003) 1787.
10. Dymnikova, A. Sakharov and J. Ulbricht, Advances in High Energy Physics 14 (2014) 707812.

Форма вертикального трехмерного жидкого моста между произвольными выпуклыми поверхностями

Галактионов Е. В.¹, Галактионова Н.Е.², Тропп Э.А.¹

¹ФТИ

²СПбПУ

e-mail: evgalakt@mail.ru

В наших недавних работах [1, 2] была решена задача о форме вертикального катеноидального жидкого моста между двумя твердыми горизонтальными плоскостями. Такая задача возникает, в частности, при изучении формы жидких менисков, образующихся в процессе роста кристаллов по способу Степанова [3]. Однако, как известно [3], фронт кристаллизации в этом процессе, в действительности, не является плоским, а представляет собой выпуклую поверхность малой кривизны. Вследствие этого, задача о нахождении формы жидкого моста между двумя произвольными выпуклыми поверхностями является актуальной. Для решения задач такого типа используются как численные, так и асимптотические методы. В работе [4] построена асимптотика формы поверхности горизонтального жидкого моста между двумя вертикальными твердыми плоскостями при малых числах Бонда.

В настоящей работе дана вариационная постановка задачи о форме боковой поверхности вертикального трехмерного катеноидального жидкого моста малого объема, находящегося между двумя произвольными выпуклыми твердыми поверхностями. Рассмотрен осесимметричный случай и для решения задачи используются цилиндрические координаты. Учитывается действие силы тяжести. Предполагается, что число Бонда и кривизны поверхностей, между которыми помещается жидкий мост, являются малыми величинами, и применение асимптотического метода выглядит предпочтительнее.

Предложен алгоритм итерационного процесса решения задачи, причем итерации строятся как по малому числу Бонда, так и по форме заданных граничных поверхностей, в предположении их малой кривизны. На первом шаге этого процесса действие силы тяжести не учитывается (рассматривается жидкий мост в невесомости) и старт берется от случая жидкого моста между параллельными плоскостями.

Обнаружено, что одному значению высоты жидкого моста (расстоянию между заданными поверхностями) могут соответствовать до четырех различных профилей его боковой поверхности.

В качестве примера рассмотрен случай вертикального жидкого моста между сферой и плоскостью. Исследована зависимость числа решений задачи от высоты моста при заданных углах смачиваемости. Установлено, что для значений высоты, превышающих

некоторое критическое значение, задача не имеет решения (жидкий мост не существует). А при значениях высоты меньших некоторого значения, существует только один профиль боковой поверхности моста (единственное решение задачи). Имеются интервалы изменения высоты, соответствующие наличию двух, трех и четырех решений задачи.

В докладе представлены результаты расчетов формы боковой поверхности вертикального жидкого моста между сферой и плоскостью в невесомости. Приведены графики четырех различных профилей боковой поверхности, соответствующие одному значению высоты моста.

Список литературы

1. Галактионов Е.В., Галактионова Н.Е., Тропп Э.А. Форма поверхности вертикального жидкого моста между двумя параллельными твердыми плоскостями с учетом силы тяжести при малых числах Бонда. ЖТФ, 87, 10, 1475-1482, 2017;
2. Galaktionov E.V., Galaktionova N.E., Tropp E.A. The small parameter method in the problem of the lateral surface shape of the vertical liquid bridge between planes. J. Phys.: Conf. Ser., 1400, 4, 044025, 2019;
3. Антонов П.И., Загуловский Л.М., Костыгов А.С. и др. Получение профилированных монокристаллов и изделий способом Степанова. Л.: «Наука», 1981. 280 с.;
4. Haynes M., O'Brien S.B.G., Benilov E.S. Asymptotic of a horizontal liquid bridge. Phys. Fluids, 28, 042107, 2016.

Взаимодействие уединенной волны с нанопорами в кристалле стехиометрии A_3B

Захаров П. В.¹, Старостенков М. Д.², Луценко И. С.², Кочкин А. С.³

¹АГППУ им. В.М. Шукшина

²АГТУ

³АГУ

e-mail: zakharovpvl@rambler.ru

Механизмы генерации и распространения уединенных волн вызвали интерес с момента их открытия в середине XIX века по настоящее время. Второе рождение солитоны получили с применением компьютерной техники для их изучения. Такие объекты могут иметь различную природу, но объединяет их структурная устойчивость и существование в нелинейных средах. Среди всего многообразия солитонов, можно выделить дискретные бризеры, которые были открыты чуть более 30 лет назад [1]. Интерес к данным объектам достаточно высок в силу потенциального их практического применения в различных областях [2].

В одной из последних наших работ [3] продемонстрирована роль дискретных бризеров при возбуждении уединенной волны посредством внешнего гармонического воздействия на кристаллы состава A_3B . Такие волны способны распространяться на десятки микрометров без изменения своей формы и скорости. Оценка энергии, сосредоточенной волной, составляет величины порядка 2-5 эВ на атомный ряд. Таким образом, такая волна, распространяясь по кристаллу, может оказывать существенное влияние на процессы, протекающие в кристаллах на атомном уровне.

В данной работе нами исследуется взаимодействие таких волн с дефектами структуры кристалла Pt_3Al в виде нанопор различных размеров. Рассматриваемая нами модель представляет собой объемный ГЦК кристалл стехиометрии A_3B со сверхструктурой $L1_1$, содержащий до $2,5 \times 10^6$ частиц, взаимодействующих посредством потенциала, полученного методом погруженного атома. Было показано, что периодическое воздействие на частотах близких к собственным частотам дискретных бризеров вызывает их возбуждение в непосредственной близости с областью воздействия, что выражается в резком увеличении амплитуды колебаний легких атомов рассматриваемого кристалла. Получены характеристики рассматриваемой волны, изучены процессы структурно-энергетических трансформаций при взаимодействии с рассматриваемыми дефектами кристалла.

Список литературы

1. Sievers A. J., Takeno S., Intrinsic Localized Modes in Anharmonic Crystals, Phys. Rev. Lett., vol. 61, 970-973, 1988
2. Дмитриев С. В., Корзникова Е. А., Баимова Ю. А., Веларде М. Г., Дискретные бризеры в кристаллах, УФН, том. 186, 471–488, 2016
3. Захаров П. В., Старостенков М. Д., Корзникова Е. А. и др., Возбуждение волн солитонного типа в кристаллах стехиометрии A_3B , ФТТ, том. 61, 2183-2189, 2019

Номер проекта РФФИ: 18-42-220002 p_a

Разработка модели для определения дефектов по отраженной ультразвуковой волне с использованием нейронных сетей

Гревцева А. С.¹, Давыдов В.В.^{1,2}, Рудь В.Ю.²

¹СПбПУ

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Московская обл., Россия

e-mail: annagrevtseva@mail.ru

В настоящее время распознавание дефектов, их классификация и оценка качества изделия является одной из актуальных задач [1-3]. Это связано с постоянным повышением требований к надежности и безопасности работы оборудования на предприятиях, например, в нефтегазовой сфере и т.д. Неразрушающий контроль является неотъемлемой частью технической диагностики состояния трубопроводов, сварных соединений и т.д. Преимущество его использования связано с тем, что разрушительные операции, требующие в дальнейшем проведения восстановительных работ, не применяются.

Среди методов неразрушающего контроля ведущее положение занимает ультразвуковой контроль [1-3]. Данный метод основан на способности звуковых волн отражаться от границы раздела двух упругих сред, обладающих разными акустическими свойствами. Принцип работы приборов для ультразвуковой диагностики состоит в анализе формы и амплитуды принятой и отраженной волны [1, 3]. По установленным различиям можно идентифицировать наличие дефектов и определить его тип. Расшифровку дефектов осуществляет человек, который принимает решение об опасности дефекта и т.д.

Развитие научно-технического прогресса требует разработки технологий для автоматической классификации дефектов, в которой бы использовался определенный уровень опасности, например, разрушение соединения, в зависимости от каждого типа дефекта.

Одним из вариантов решения данной задачи является использование нейронных сетей. Одно из таких решений будет представлено в данной работе.

Нейронные сети позволяют найти решение сложных задач, которые требуют аналитических вычислений аналогичных тем, что выполняет мозг человека. В процессе эксперимента наша нейронная сеть, анализируя поступающие на ее вход данные и предоставленные ей ответы, способна обучаться и далее самостоятельно принимать решения. В качестве объектов выступают изображения отраженной ультразвуковой волны, в качестве «ответов» для сети выделены классы возможных дефектов изделия. На первом этапе составляется обучающая выборка из возможных образов поступающих сигналов, каждому образу сопоставляется определенный вид дефекта. Второй этап заключается в обучении сети в тестовом режиме с помощью предоставленных данных. При проведении реального эксперимента разработанная модель нейронной сети качественно квалифицирует дефекты по данным сравнения, полученных от излучаемой и отраженной ультразвуковой волны. Необходимо также отметить, что при обработке сигналов ультразвуковой волны возникает ряд трудностей, связанных с наличием шумов при регистрации отраженного сигнала. Наличие различных шумов при регистрации отраженного сигнала может приводить к ложным решениям нашей модели. Для учёта данного факта необходимо произвести предварительную фильтрацию сигнала, обеспечивающую увеличение отношения сигнал/шум.

Полученные предварительные результаты показали, что использование разработанной модели позволяет решить задачу автоматического выявления дефектов, значительно экономит время и человеческие ресурсы.

Список литературы

1. Базылев, Д.Н. Ультразвуковой контроль металлоконструкций с использованием фазированной электромагнитно-акустической антенной решетки / Д.Н. Базылев, В.А. Романович, С.Н. Сомов, А.А. Пыркин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т.61, №12. – С. 1060 – 1066.
2. Васильев А.Н. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, С.Ю. Гуревич, М.И. Каганов, Ю.П. Гайдуков; отв. ред. В.М. Березин. – Челябинск –М.: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339 с.
3. Drinkwater, B.W., Wilcox P.D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review / B.W. Drinkwater, P.D. Wilcox // Ndt & E Int. – 2006. – 39. N 7. – P. 525 – 541.

Обратная задача о колебании стержня с переменным сечением

Утяшев И. М.¹

¹ИМех УФИЦ РАН

e-mail: utyashevim@mail.ru

Стержни с переменным сечением находят применение во многих деталях и механизмах. Например, конические стержни широко применяются в ударных механизмах. Прочность таких деталей напрямую зависит от собственных частот продольных колебаний. В работе представлен метод, позволяющий численно найти переменное сечение упругого стержня по собственным частотам продольных колебаний. Предполагается, что площадь сечения меняется вдоль оси и описывается экспоненциальной функцией от полинома

степени n . Одномерные продольные колебания стержня с переменной площадью сечения описываются уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EF(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \rho F(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $u(x,t)$ – перемещение сечения с координатой x , $F(x)$ – площадь поперечного сечения в точке x , модуль упругости E и плотность ρ стержня считаются постоянными. Один конец стержня закреплен жестко $u(0)=0$, закрепление на другом конце может быть различным.

В настоящей работе предлагается площадь поперечного сечения стержня в точке x принять в виде:

$$F(x) = e^{P(x)}, \quad (2)$$

где $P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$, коэффициент a_0 соответствует значению площади сечения в точке начала отсчета ($x=0$) и считается известным. Решение (1) будем искать в виде $u(x,t) = y(x)\cos(\omega t)$. Тогда, подставив (2) в (1), учитывая, что $P'(x) = a_1 + 2a_2x + \dots + na_nx^{n-1}$, получим задачу на собственные значения

$$\left. \begin{aligned} -y'' - P'(x)y' &= \lambda^2 y, \\ y(0) = 0, \quad y'(1) + Hy(1) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Метод решения задачи (3) аналогичен [1], то есть общее решение уравнения (3) будем искать в виде $y(x, \lambda) = C_1y_1 + C_2y_2$. Здесь y_1, y_2 – линейно-независимые решения уравнения (3). Функции y_1, y_2 будем строить в виде ряда Маклорена по переменным x и λ , для которых должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} y_1(0, \lambda) &= 1, \quad y_1'(0, \lambda) = 0, \\ y_2(0, \lambda) &= 0, \quad y_2'(0, \lambda) = 1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Условие (4) необходимо для линейной независимости функции y_1, y_2 .

Подставив общее решение, построенное в виде ряда, в граничные условия (3), получим характеристическое уравнение вида

$$\Delta(\lambda) = y_2'(1, \lambda) - H \cdot y_2(1, \lambda), \quad (5)$$

здесь H – жесткость пружины на правом торце. Если коэффициент $H=0$, то получим свободное закрепление, если $H = \infty$, то жесткое, в остальных случаях – упругое. Подстановкой собственных чисел в (5) получим систему линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов $a_1 \dots a_n$. Для определения n неизвестных коэффициентов функции сечения требуется n собственных значений.

Представление переменного сечения в виде функции (2) позволяет численно определить закон изменения сечения по конечному набору собственных значений. Еще одним преимуществом данного представления является то, что полученная функция всегда неотрицательна, что соответствует физической постановке. Точность решения зависит от выбора количества членов в сумме ряда. Обратная задача может иметь несколько решений, однако, подставив найденные коэффициенты в уравнение (2) и учитывая, что коэффициент a_0 нам известен, можно отбросить решения, которые не удовлетворяют физической постановке. Данный результат говорит о том, что для стержней с различными функциями сечения спектр собственных частот продольных колебаний может совпадать. Для однозначного определения параметров таких стержней требуется использовать также спектр поперечных или крутильных колебаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00150-А) и гранта Республики Башкортостан молодым ученым 2020 года.

Список литературы

1. Ахтямов А.М., Утяшев И.М. Восстановление полиномиального потенциала в задаче Штурма–Лиувилля // Журнал Средневолжского математического общества. 2018. Т.20, № 2. С. 148-158.

Компьютерное моделирование трехслойных ферромагнитных наносистем в магнитном поле

Белим С. В.^{1,2}, Белим С.С.³

¹Омский государственный технический университет

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

³Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

e-mail: sbelim@mail.ru

Ферромагнитные многослойные пленки являются важными материалами, так как они обладают интересными физическими свойствами, такими как гигантское магнитосопротивление [1, 2], магнитная анизотропия [3, 4], магнитосопротивление туннелирования [5] и гигантская магнитоотражательная способность [6, 7]. Эти свойства очень чувствительны к микроструктуре многослойной пленки. Присутствие ферромагнетизма в многослойных фильмах позволяет управлять магнитосопротивлением и магнитооптическими свойствами внешним магнитным полем. Ферромагнитные многослойные пленки демонстрируют благодаря спин-спиновому взаимодействию обладают гигантским магнитосопротивлением и большим магнитосопротивлением туннелирования. Большинство ферромагнитных мультислойных пленок демонстрируют высокую чувствительность к удельному электрическому сопротивлению, даже в относительно небольшом внешнем магнитном поле порядка 50 Э и меньше. В связи с этим многослойные ферромагнитные наноструктуры могут использоваться при создании миниатюрных сверхбыстрых и ультрачувствительных магнитных датчиков.

В работе осуществлено компьютерное моделирование поведения намагниченности трехслойных систем в магнитном поле. Исследованы системы, состоящие из двух ферромагнитных пленок толщиной D , разделенных антиферромагнитной пленкой толщиной d . В данной работе исследование ограничено моделью Изинга. Несмотря на ограниченное применение данной модели к реальным системам она позволяет выявить основные закономерности. Подобные трехслойные системы находят широкое применение в устройствах спинтроники, так как в них наблюдается эффект гигантского магнитосопротивления.

Гамильтониан исследуемой системы имеет следующий вид:

$$H = J \sum_{0 \leq z < D} S_i S_j - J_a \sum_{D \leq z < D+d} S_i S_j + J \sum_{D+d \leq z < 2D+d} S_i S_j + \mu H_0 \sum S_i$$

Здесь через S_i обозначен спин в i -ом узле ($1/2$ или $-1/2$), J - обменный интеграл в ферромагнитных слоях системы, J_a – обменный интеграл в антиферромагнитных слоях системы, H_0 – напряженность магнитного поля, μ – магнетон Бора. При компьютерном моделировании удобнее работать с безразмерными относительными величинами: $R = J_s / J_B$, $H = \mu H_0 / J_B$.

В этом случае Гамильтониан примет вид:

$$H = \sum_{0 \leq z \leq D} S_i S_j - R \sum_{D \leq z \leq D+d} S_i S_j + \sum_{D+d \leq z \leq 2D+d} S_i S_j + H \sum S_i$$

Вместо температуры t удобнее рассматривать безразмерную величину $T = kt/J$, где k – постоянная Больцмана.

Поведение системы исследовано методом Монте-Карло с помощью алгоритма Метрополиса. Введены параметры порядка, характеризующие магнитное и антиферромагнитное упорядочивание во всех пленках системы. Для нахождения температур фазовых переходов в системе использована теория конечноразмерного скейлинга. Построена фазовая диаграмма системы. Выделены четыре фазы системы. Ферромагнитная пленка может находиться в упорядоченной фазе (FO) и неупорядоченной фазе (FN). Антиферромагнитная пленка может находиться в упорядоченной фазе (AO) и неупорядоченной фазе (AN). В отсутствие магнитного поля в системе возможно существование четырех фаз: FO/AO, FO/AN, FN/AO, FN/AN. Определены параметры системы, при которых в ней может наблюдаться эффект гигантского магнитосопротивления (фаза FO/AN). Для систем, находящихся в фазе FO/AN исследовано распределение намагниченности в системе. Изучено влияние магнитного поля на распределение намагниченности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00053.

Список литературы

1. Xu C, Ostler T A, Chantrell R W, 2016 Phys. Rev. B 93 054302
2. Locatelli N, Naletov V, Grollier J et al, 2011 Appl. Phys. Lett. 98 062501
3. Rizal C, Moa B, Wingert J, Shpyrko O, 2015 IEEE Trans. Magn. 2.
4. Rizal C, Ueda Y, 2009 IEEE Trans. Magn. 45 2399
5. Ikeda S, Hayakawa J, Lee Y M, 2005 Jpn. J. Appl. Phys. 44 L1442
6. Armelies G, Cebollada A, García-Martín A et al, 2013 Adv. Opt. Mat. 1
7. Lodewijks K, Maccaferri N, Pakizeh T et al. 2014 Nano Lett. 14 7207

Номер проекта РФФИ: 20-07-00053

Нелинейные волны уравнения синус-Гордона в модели с тремя примесными модами

Самсонов К. Ю.¹, Кудрявцев Р.В.³, Гумеров А.М.², Екомасов Е.Г.^{1,2}

¹Тюменский государственный университет

²Башкирский государственный университет

³Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН

e-mail: k.y.samsonov@gmail.com

В современной теории нелинейных колебаний и волн для более точного описания физических процессов нужны нелинейные дифференциальные уравнения. Для них были найдены решения, описывающие уединенные волны, сохраняющие свою форму и скорость во времени в том числе при взаимодействии друг с другом – солитоны. Открытие новых солитонных решений, описание их свойств интересно изучать как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Одним из наиболее изучаемых нелинейных дифференциальных уравнений является уравнение синус-Гордона (УСГ), являющимся континуальным приближением модели Френкеля-Конторовой. Один из часто используемых при

проведении теоретических исследований способов получения модификаций УСГ, необходимых при описании приложений, заключается в учете пространственной неоднородности периодического потенциала (или примеси) [1, 2]. В данной работе исследуется нелинейная динамика солитонных решений УСГ в модели с тремя притягивающими примесями.

Используя метод коллективных координат (координаты центра кинка и амплитуд примесных мод), были получены интегро-дифференциальные динамические уравнения. С их помощью можно упрощенно аналитически описать одномерную динамику рассеяния кинков УСГ на трех притягивающих разных точечных примесях, с учетом возбуждения примесных мод, в присутствии внешней силы и диссипации. Исследованы некоторые частные случаи, например, изучены связанные колебания локализованных волн и динамика кинка при наличии трех одинаковых примесей, находящихся на равном расстоянии друг от друга. Описаны особенности возможных вариантов эволюции кинка, изменения его структуры, динамических характеристик в зависимости от начальной скорости кинка и от расстояния между примесями. Найдены условия возникновения различных резонансных эффектов, связанных с динамикой кинка резонансного отражения от притягивающей примеси и "квazitуннелирования". Показано, что процесс рассеяния энергии кинком на примеси можно рассматривать как новый "канал затухания" движущегося кинка.

Показано, что уравнения описывающие колебания амплитуд локализованных волн на примесях в отсутствие диссипации можно свести к виду:

$$\begin{cases} \ddot{a}_1 + a_1\omega_1^2 + a_2k_{12} + a_3k_{13} = 0, \\ \ddot{a}_2 + a_2\omega_2^2 + (a_1 + a_3)k_{21} = 0, \\ \ddot{a}_3 + a_3\omega_3^2 + a_1k_{13} + a_2k_{12} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Где a_1, a_2, a_3 – амплитуды примесных мод, локализованных на первой, второй и третьей примесях, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, k_{12}, k_{21}, k_{13}$ – параметры связанные с размерами примеси и расстоянием примесей друг от друга. Найдены аналитические решения системы (1), которые представляют собой сумму трех гармонических колебаний с частотами, зависящими от размера примеси и расстояния примесей друг от друга. Изучены возможные сценарии связанных колебаний локализованных волн. Определенно наличие критического значения расстояния между примесями, которое приводит к качественно различным сценариям динамического поведения локализованных волн. Проведено сравнение с ранее изученным случаем двух разных примесей. Предложены способы использования примесей как генератора для возбуждения различного вида мультисолитонов УСГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках начуного проекта №20-02-00213А.

Список литературы

1. *Ekomasov E.G., Gumerov A.M., Kudryavtsev R.V.* Resonance dynamics of kinks in the sine-Gordon model with impurity, external force and damping // *Jornal of Computational and Applied Mathematics*, 312 (2017), 198-208.
2. *Ekomasov E.G., Gumerov A.M., Murtazin R.R.* Interaction of sine-Gordon solitons in the model with attracting impurities // *Mathematical Methods in The Applied Sciences*, 40:17 (2016), 6178-6186.

Верификация интегральной модели парогравитационного дренажа с использованием данных по месторождению Синьцзян и численного решения методом Эйлера

Гильманов А. Я.¹, Фёдоров К. М., Шевелёв А. П.

¹Тюменский государственный университет

e-mail: agilmanov1996@gmail.com

В настоящее время при разработке месторождений набирают популярность тепловые методы увеличения нефтеотдачи. Они позволяют поддерживать добычу на прежнем уровне. Высокую эффективность среди таких методов показал парогравитационный дренаж.

Применение парогравитационного дренажа невозможно без предварительного моделирования технологических параметров. Существующие модели требуют большого количества параметров и длительного времени расчета.

Распределение температуры по длине горизонтальных скважин может влиять на эффективность разработки и вытеснения нефти. Вязкость нефти также зависит от распределения температуры.

Таким образом, создание интегральной модели, учитывающей распределение температуры вдоль скважины, является актуальной задачей. Осуществлена разработка модели парогравитационного дренажа с неоднородным распределением температуры по стволу скважины и ее верификация.

Материальный баланс и законы сохранения массы и энергии лежат в основе разработанной модели. Замыкающие соотношения получены из закона Дарси. Модель представлена в безразмерном виде для удобства оценки технологических параметров разработки и анализа влияния основополагающих эффектов.

Геометрия паровой камеры считается треугольной. Отдельные уравнения учитывают рост камеры вверх и распределение температуры вдоль ствола скважины. Рост паровой камеры учитывается с помощью уравнения траектории её угловой точки. Уравнение траектории получено из соотношения удельных тепловых потоков. Это уравнение решается итерационным методом Ньютона.

Распределение температуры считается линейным. Зависимость вязкости от температуры является экспоненциальной, характерной для тяжёлой нефти.

Для замыкания системы используются модельные относительные фазовые проницаемости с использованием корреляций Кори.

Модель учитывает пятиугольную геометрию сечения камеры при наложении соседних паровых камер.

Асимптотический анализ модели приводит к наличию аналитического решения для максимального объёма паровой камеры.

Решение системы уравнений модели осуществляется явной конечно-разностной схемой с аппроксимацией производных по методу Эйлера в силу её нелинейности.

Показана сходимость численного решения к аналитическому.

При разработке технологии парогравитационного дренажа Чанг и Батлер провели серию основных экспериментов. Эти эксперименты позволяют определить геометрию паровой камеры и её динамику по распределению температуры.

Верификация модели проводилась с использованием данных экспериментов Чанга и Батлера, а также данных Синьцзянского месторождения.

Динамика роста паровой камеры из модельных расчетов хорошо согласуется с экспериментальными данными. Время роста по вертикали составляет 90 минут и соответствует эксперименту.

Показано, что на первом этапе паровая камера растёт преимущественно в вертикальном направлении с приблизительно постоянным углом раскрытия. После окончания вертикального роста паровая камера расширяется только в горизонтальном направлении.

Коэффициент извлечения нефти и обводнённость продукции соответствуют промышленным данным.

Коэффициент извлечения нефти не стабилизируется до окончания рентабельного периода, определённого по паронефтяному отношению. Эти результаты справедливы для поперечного сечения паровой камеры вблизи пятки горизонтальной скважины.

Установлено, что отсутствие вовлечения носка скважины в процесс парогравитационного дренажа происходит при значительной разнице температур между пяткой и носком скважины. Температура падает по всей длине скважины от пятки до носка. Вязкость и подвижность нефти также снижаются. Поэтому необходим подбор параметров процесса парогравитационного дренажа, снижающего негативные эффекты.

Полученные рекомендации могут быть использованы и для других месторождений в России и мире.

Список литературы

1. Edmunds N., Peterson J. A unified model for prediction of CSOR in steam-based bitumen recovery, Petroleum Society of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Paper 2007-027, 1-12, (2007);
2. Xi C., Yang Z., Du X., Zhou Y., Shi L., Sang L., Li X., Ma D. Three typical SAGD horizontal producer temperature models and enhanced measures in heterogeneous super heavy oil reservoir – a case study in FC project, Society of Petroleum Engineers, Paper SPE-196762-MS, 1-12, (2019).

Моделирование дифференцированной закалки железнодорожных рельсов сжатым воздухом

Невский С. А.¹, Сарычев В.Д.¹, Кормышев В.Е. ¹, Полевой Е.В.²

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²АО «Евраз-Западно-Сибирский металлургический комбинат»,

e-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru

Проведено математическое моделирование дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов сжатым воздухом. Оно включало в себя два этапа. На первом этапе аналитически и численно решалась одномерная задача теплопроводности с граничными условиями третьего рода. Полученные распределения температуры на поверхности головки рельса и на глубине 20 мм от поверхности катания сравнивались с экспериментальными данными. В результате определялось значение коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности рельсовой стали. На втором этапе создавалась математическая модель распределения температуры в рельсовом темплете, в условиях принудительного охлаждения и последующего самопроизвольного остывания. В основу предложенной математической модели положены уравнения Навье-Стокса и конвективной

теплопроводности для закалочной среды и уравнение теплопроводности рельсовой стали. На границе «рельс/воздух» задавалось условие непрерывности тепловых потоков. В условиях самопроизвольного остывания изменение температурного поля моделировалось уравнением теплопроводности с условиями третьего рода. Аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности показало, что расчетные значения температуры отличаются от экспериментальных данных на 10 %. При $t > 30$ с происходит смена хода кривых зависимости температуры от времени, что связано со сменой механизмов охлаждения. Результаты численного анализа подтверждают это предположение. Анализ двумерной модели охлаждения рельса методом конечных элементов показал, что на начальном этапе охлаждения температура поверхности головки рельсов, как по центральной оси, так и по выкружке резко уменьшается. При $t > 100$ с идет стабилизация температуры до 307 К. В центральных областях рельса процесс охлаждения идет медленнее, чем в поверхностных. После прекращения принудительного охлаждения сначала наблюдается нагрев поверхностных слоев, обусловленный сменой направления теплового потока от центральных областей к поверхности головки рельса, а затем происходит охлаждение со скоростями меньшими, чем на первом этапе. Полученные результаты могут быть использованы для корректировки режимов дифференцированной закалки.

Список литературы

1. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: УРСС, 2003 – 784 с.
2. Математические модели и механизмы формирования градиентных структур в материалах при внешних энергетических воздействиях: монография / В.Д. Сарычев, С.А. Невский, А.Ю. Грановский, В.Е. Громов; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. – 320 с.

Номер проекта РФФИ: 19-32-60001

Модификация метода двойного слоя для решения краевых задач магнитостатики

Филитов Д. М.¹, Шуйский А. А.¹

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: a.a.shuiskii@gmail.com

При оптимальном проектировании новых устройств электротехники возникает задача математического моделирования магнитных полей, порождаемых намагниченными телами и вихревыми токами в проводниках. Задачи вихретоковой дефектоскопии [1] и проектирования электрических машин осевого потока [2] характеризуются существенной неоднородностью распределения магнитного поля, и, как следствие, возникает необходимость в трёхмерном моделировании. Среди численных методов моделирования поля наиболее эффективен метод вторичных источников [3], так как данный метод не требует дискретизации воздушных зазоров, внутри которых сосредоточен существенный градиент поля, между рассматриваемыми проводниками или ферромагнетиками. Нераспространённость применения классического метода вторичных источников обусловлена тем, что при достаточно малых зазорах граничные условия для электромагнитного поля

нарушаются. Как показано авторами настоящего исследования в [4], вычислительная эффективность метода вторичных источников существенно увеличивается, если вывести интегральное граничное уравнение из граничного условия, записанного в интегральной форме. В [4] авторами настоящего исследования разработана новая математическая модель электромагнитного поля вихревых токов для случая возбуждения вихревых токов неферромагнитным источником внешнего поля.

Целью настоящей работы является разработка математической модели трёхмерного стационарного магнитного поля ферромагнитных тел, намагниченных под действием произвольного внешнего поля. В рамках метода вторичных источников, оптимальным решением будет применение метода двойного слоя фиктивных магнитных зарядов [5]. Данный метод характеризуется тем, что плотность двойного слоя является функцией, не содержащей точек разрыва второго рода во всей области определения, в том числе в тех точках границы, где нормаль меняет своё направление скачкообразно. Поэтому, при решении задачи методом двойного слоя, даже при использовании кусочно-постоянной аппроксимации, отсутствует необходимость в сгущении сетки в областях, приближающихся к изломам границы, что значительно уменьшает общее число разбиений расчётной сетки. Однако, классическое интегральное уравнение относительно двойного слоя содержит в правой части скалярный магнитный потенциал свободных источников, являющийся неоднозначной функцией. Эта проблема существенно затрудняет процесс алгоритмизации моделирования.

В настоящей работе из закона полного тока в интегральной форме получено новое интегральное уравнение для двойного слоя магнитных зарядов, не содержащее скалярный магнитный потенциал. Таким образом, новая математическая модель обладает всеми преимуществами классического метода двойного слоя, и в тоже время освобождена от проблем, связанных с расчётом скалярного магнитного потенциала. Приведём систему линейных алгебраических уравнений, которая осуществляет численную аппроксимацию вышеупомянутого интегрального уравнения:

$$v_i - v_k - \frac{1}{2\pi} \frac{\mu - \mu_0}{\mu + \mu_0} \left\{ \sum_{m=1, m \neq k}^{N_s} v_m \iint K(Q, P) dS_P \overline{dl}_Q' + \sum_{m=1, m \neq i}^{N_s} v_m \iint K(Q, P) dS_P \overline{dl}_Q'' \right\} = 2 \frac{\mu - \mu_0}{\mu + \mu_0} \int \overline{B}_0 \overline{dl}_Q.$$

где \overline{B}_0 – магнитная индукция внешних источников, v_m – плотность двойного слоя фиктивных магнитных зарядов, распределенных по поверхности S ферромагнетика, N_s – число разбиений поверхности, $K(Q, P) = \frac{3(\vec{r}_{PQ}, \vec{n}_P)\vec{r}_{PQ} - r_{PQ}^2 \vec{n}_P}{r_{PQ}^5}$.

Для верификации разработанной математической модели авторами была изготовлена электрическая машина осевого потока с бескаркасной обмоткой номинальной мощности 2 кВт и испытана на стенде. С использованием разработанной вычислительной модели проведено моделирование магнитного поля машины осевого потока, расчётным и экспериментальным путём получены интегральные характеристики машины, такие как вращающий момент и противо-ЭДС. Теоретически полученные интегральные характеристики отличаются от экспериментально измеренных не более чем на 3,1%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00962.

Список литературы

1. Вишнеvский В.Г. Магнитооптический вихретоковый контроль: интроскопический и магнитографический методы / В.Г. Вишнеvский, В.Н. Бержанский, Г.П. Козик и др. // Учёные записки ТНУ имени В. И. Вернадского. Серия «Физико-математические науки». – 2011. – Т. 24 (63), № 2. – С. 127-140.
2. Price, G.P. Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator / G.P. Price, T.D. Batzel, M. Comanescu, B.A. Muller // Proceeding of the 2008 IAJC-IJME International Conference (November 17– 19, 2008; Music City Sheraton, Nashville, TN, USA). – 2008. – 15 p.
3. Тозони, О.В. Расчёт трёхмерных электромагнитных полей / О.В. Тозони, И.Д. Маергойз. – Киев: Техника, 1974. – 352 с.
4. Filippov D.M. Improving Efficiency of the Secondary Sources Method for Modeling of the Three-Dimensional Electromagnetic Field / D.M. Filippov, A.A. Shuysky // PIER M. – 2019. – Vol. 78. – P. 19-27.
5. Ishibashi K. Improvement of Unified Boundary Integral Equation Method in Magnetostatic Shielding Analysis / K. Ishibashi, T. Yoshioka, S. Wakao, Y. Takahashi, Z. Andjelic, and Koji Fujiwara // IEEE Trans. Magn. – 2014. – Vol. 50. – P. 105-108.

Номер проекта РФФИ: 20-08-00962

Математическое моделирование усталостного масштабнo-структурного разрушения металлов при сложном напряженном состоянии

Завойчинская Э. Б.¹

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: elen@velesgroup.com

Экспериментально-теоретические исследования по физике твердого тела, металлoведению, механике деформируемого твердого тела показали, что при многоцикловом нагружении металлов и сплавов развитие дефектов в диапазоне линейных размеров, в среднем, $[10^{-5}, 10]$ мм, является иерархическим многоуровневым случайным процессом. Предлагаемая модель [1-3] формулируется в рамках физико-механического подхода как система гипотез о стадийном развитии дефектов на микро-, мезо- и макроуровнях. Из всей иерархии масштабнo-структурных уровней рассматриваются шесть уровней в соответствии с известными данными по эволюции структуры металла по различным физическим механизмам до образования одной (нескольких) хрупких макротрещин характерных размеров, которые допускают применение подходов механики разрушения. На каждом уровне вводится функция распределения вероятности достижения дефектами предельного состояния и для нее строятся определяющие соотношения. Формулируется система критериев многоуровневой повреждаемости. В качестве переменной выбирается амплитуда максимального главного напряжения, материальные функции определяются по данным усталостных испытаний с учетом результатов физических исследований по развитию хрупких трещин и в соответствии с экспериментально обоснованными критериями усталостной прочности металлов. Строятся кривые усталости для различных предельных состояний при сложных напряженных состояниях. Для обоснования достоверности предлагаемого подхода в

работах автора представлены результаты анализа экспериментальных данных по развитию дефектов на разных масштабных уровнях в представительном ряде углеродистых, аустенитно-мартенситных, легированных конструкционных сталях; чугунов; металлов: молибдена, никеля, свинца, титана; никелевых, магниевых, алюминиевых, титановых сплавов при различных процессах пропорционального нагружения. В докладе обсуждаются результаты расчетов по модели для сталей и алюминиевых сплавов при двух видах напряженного состояния: осевого циклического нагружения с постоянной составляющей касательного напряжения и циклического кручения с постоянной составляющей осевого напряжения. Показано удовлетворительное соответствие известным опытным данным и критериям усталости [4-7]. Исследованы зависимости областей развития дефектов и их предельных состояний при совместном растяжении с кручением от постоянных составляющих компонент напряжения. Построены кривые усталости по уровням дефектности для рассматриваемых нагружений.

Список литературы

1. Zavoychinskaya E.B., On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading, *Journal of Physics: Conference Series*, издательство *Institute of Physics (United Kingdom)*, том 1431, с. 012024-012032, 2020
2. Завойчинская Э.Б., О теории усталостного разрушения при сложном напряженном состоянии металлов с учетом структурных изменений, *Вестн. Моск. Ун-та. Сер.1: Математика. Механика*, № 1. С. 29-34, 2019
3. Завойчинская Э.Б., Усталостное масштабное-структурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения, автореф.дис.док. физ.-мат.н., М.: Типография ООО «Генезис», 2018, 46 с.
4. Вильдеман В.Э., Янкин А.С. и др. Усталостное поведение конструкционных сплавов в условиях одноосных и двухосных циклических воздействий, *Сборник Трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*, Уфа, т.3, DOI 10.22226/2410-3535-2019-congress-v3
5. Bruun O.A., Fatigue Assessment of Components Subjected to Non-Proportional Stress Histories, *Thesis Mast.Sci.*, NTNU-Trondheim, 2013, 86 p.
6. Papuga J., Halama R., Mean Stress Effect in Multiaxial Fatigue Limit Criteria, *Archive of Appl.Mech.*, 2018, p. 1-13.
7. Amouzou K., Charkaluk E. A New High-Cycle Fatigue Criterion Based on a Self-consistent Scheme for Hard Metals under Non-proportional Loading, *Proc.17 Conf.on New Trends in Fat.and Fract.*,2018, p.29-39.

Требования к сетке при проведении численного моделирования методом моделирования крупных вихрей с пристеночными функциями

Колмогоров Д. К.¹, Гарбарук А. В.

¹СПбПУ

e-mail: dkolmogorov@cfcd.spbstu.ru

В настоящее время все больше прикладных инженерных расчетов пристеночных течений проводится с использованием вихреразрешающих подходов. Однако доступные в настоящее время вычислительные ресурсы недостаточны [1] для применения наиболее точных методов, таких как прямое численное моделирование (DNS) и Метод моделирования крупных вихрей (LES) с разрешением пограничного слоя (WRLES). Это стимулировало развитие гибридных подходов, таких как LES с пристеночным RANS моделированием (WMLES) [2], однако и их использование также сопряжено со значительными вычислительными затратами, поскольку требуемые расчетные сетки должны быть измельчены к стенке для разрешения вязкого подслоя.

Одной возможных альтернатив, обеспечивающих приемлемую точность при умеренных вычислительных затратах, является LES с пристеночными функциями (WFLES) [3]. Этот метод может быть использован на сетках, которые не разрешают внутреннюю область пограничного слоя, что позволяет существенно уменьшить их размер и привлекательным для инженерных расчетов пристеночных течений. Целью настоящей работы является детальное исследование достоинств и недостатков WFLES, а также определение требований к расчетной сетке и вычислительной схеме, предъявляемых в рамках этого подхода.

В данной статье будет представлен опыт использования WFLES в расчетах базовых пристеночных течений, таких как турбулентное течение в канале и течение пограничного слоя. В частности, будет показано, что при использовании WFLES необходимо использовать изотропные сетки величина шага которых не превышает 10% толщины пограничного слоя. При использовании более грубых сеток существенно снижается точность предсказания параметров среднего течения, а на анизотропных сетках искажаются профили нормальных компонент тензора рейнольдсовых напряжений.

Результаты получены с использованием ресурсов СКЦ "Политехнический" СПбПУ.

Список литературы

1. Гарбарук, А. В., Стрелец, М. Х., Травин, А. К., & Шур, М. Л. (2016). Современные подходы к моделированию турбулентности. *СПб: Изд-во Политехн. ун-та*, 234.
2. Larsson, J., Kawai, S., Bodart, J., & Bermejo-Moreno, I. (2016). Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions. *Mechanical Engineering Reviews*, 3(1), 15-00418.
3. Werner, H., & Wengle, H. (1993). Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel. In *Turbulent shear flows 8* (pp. 155-168). Springer, Berlin, Heidelberg.

Исследование эффекта неустойчивости роста толстостенных трубок из сапфира способом Степанова

Васильев М.Г.¹, Бахолдин С.И.¹, Крымов В.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: v.krymov@mail.ioffe.ru

При выращивании профилированных кристаллов сапфира при некоторых режимах роста наблюдается потеря устойчивости фронта кристаллизации. В случае выращивания трубчатых профилей происходит отрыв внутреннего мениска от кромки формообразователя и нарушение геометрии сечения. Эти явления наблюдаются для толстостенных трубок при плоской верхней поверхности формообразователя, при сильном перегреве расплава, и возникают при достижении длины кристалла, сопоставимой с высотой тепловых экранов. При толщинах стенки менее 1 миллиметра рост трубки происходит без каких-либо проблем.

В настоящей работе показано, что этот эффект отрыва внутреннего мениска от кромки формообразователя можно объяснить большим поглощением более горячего излучения, приходящего извне, в областях, примыкающих к внутренней поверхности трубки. С увеличением длины выращиваемого кристалла увеличивается радиационный поток тепла через кристалл, вследствие чего необходимо увеличивать подачу тепла, что и приводит к данному явлению.

В работе на основании построения асимптотики решения задачи теплообмена при выращивании тугоплавких полупрозрачных кристаллов из расплава аналитически исследовано поведение поля температур вблизи фронта кристаллизации. Особенностью алгоритма асимптотического разложения является наличие 2-х малых параметров – кондуктивно-радиационного параметра N [1] и характерной оптической толщины поперечного сечения кристалла. Для сапфира при температурах, близких к температуре плавления, параметр $N=0,01$. Показано, что при (k – коэффициент поглощения теплового излучения, d – характерный поперечный размер) поле температур почти одномерно и зависит только от расстояния от фронта кристаллизации, но при, когда вклад радиационного переноса тепла становится соизмеримым с кондуктивной компонентой (в поперечном направлении по отношению к скорости роста кристалла), это уже не так. Пространственная плотность излучения, приходящего извне, неоднородна по поперечному сечению трубки и максимальна вблизи внутренних её стенок [2], что и приводит к их перегреву и отрыву мениска от внутренних кромок формообразователя. Для сапфира оценки дают возникновение такой неоднородности, начиная с толщин стенки трубки d порядка 5mm ($k=20\text{m}^{-1}$ – коэффициент поглощения теплового излучения сапфира при температуре, близкой к температуре плавления), что согласуется с результатами экспериментов.

Список литературы

1. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. С. 490-492.
2. Васильев М.Г., Бахолдин С.И., Крымов В.М.// ЖТФ. 2020. Т. 96. N 8. Принята к печати.

Явные изометрические вложения псевдоримановых пространств: методы и приложения

Шейкин А. А.¹, Марков М.В.¹, Федулов Я.А.¹, Пастон С.А.¹

¹СПбГУ

e-mail: anton.shejkin@gmail.com

Изометрическое вложение риманова пространства с заданной метрикой – это процедура нахождения поверхности в объемлющем пространстве большей размерности (зачастую плоском), обладающей такой метрикой. Эта поверхность задается при помощи так называемой функции вложения – вектора объемлющего пространства, чьи компоненты зависят от координат на поверхности, метрика же становится индуцированной и выражается через функцию вложения.

Изометрические вложения пространств с заданной метрикой изучались математиками задолго до появления физических приложений. Однако с появлением общей теории относительности такие вложения стали полезным инструментом изучения и визуализации геометрии искривленных пространств, а впоследствии и физики в этих пространствах; в частности, вложения позволяют рассчитывать температуру Хокинга пространств с горизонтом [1] и анализировать глобальную структуру таких пространств [2].

Однако нахождение явного глобального вложения пространства с метрикой общего вида – чрезвычайно трудная задача, эквивалентная поиску решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Она значительно упрощается, если метрика обладает какой-либо симметрией; в этом случае возможно зафиксировать зависимость функции от переменных, подчиненных этой симметрии, с помощью метода, предложенного в работе [3] и основанного на классификации представлений группы симметрии метрики, изоморфных некоторым подгруппам группы Пуанкаре объемлющего пространства. Этот метод был успешно применен в задачах о построении явных вложений метрик вселенной Фридмана [4] и неврашающихся черных дыр [5], в том числе коллапсирующих [6].

В то же время необходимо отметить, что вышеупомянутый метод не позволяет построить все вложения, соответствующие данной метрике, даже при фиксации числа изменений объемлющего пространства и его сигнатуры. Существуют задачи, в которых применение этого метода в исходной формулировке оказывается затруднительным: в числе таких, к примеру, задача о вложении метрики Гёделя.

В данной работе обсуждается обобщение этого метода, основанное на сужении группы симметрии вкладываемой поверхности по отношению к группе симметрии исходной метрики. Показано, что в тех случаях, когда итоговая система уравнений на индуцированную метрику остается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, модифицированный метод дает хорошие результаты. В частности, с использованием этого метода строится новое явное глобальное вложение метрики Гёделя в 8-мерное объемлющее пространство. Обсуждается также задача о нахождении изометрического изгиба поверхности с метрикой сферы и ее связь с изложенным методом.

Список литературы

1. S.A. Paston, When does the Hawking into Unruh mapping for global embeddings work? // JHEP 2014 (06), 122 (2014), arXiv:1402.3975.
2. C. Fronsdal, Completion and Embedding of the Schwarzschild Solution // Phys. Rev. 116, 778 (1959).

3. S. A. Paston, A. A. Sheykin, Embeddings for Schwarzschild metric: classification and new results // *Class. Quantum Grav.* 29, 095022 (2012), arXiv:1202.1204.
4. S. A. Paston, A. A. Sheykin, Embeddings for solutions of Einstein equations // *Theor. Math. Phys.* 175(3), 808-817, (2013), arXiv:1306.4826.
5. A. A. Sheykin, S. A. Paston // Classification of global minimal embeddings for nonrotating black holes // *Theor. Math. Phys.* 185(1), 1547-1556 (2015), arXiv:1512.08280.
6. S. A. Paston, A. D. Kapustin, to appear in *Class. Quantum Grav.*

Номер проекта РФФИ: 20-01-00081

The limit shape of the height function in the six-vertex model with domain-wall boundary conditions

Belov P. A.¹, Reshetikhin N. Yu.¹

¹Saint-Petersburg State University

e-mail: pavelbelov@gmail.com

The six-vertex model, also known as the square-ice model, has been studied for a long time [1]. In its original formulation, under the assumption of periodic boundary conditions, the partition function for the model was investigated in [2, 3]. In the eighties, a special case of the six-vertex model with the so-called domain-wall type boundary conditions was developed [4]. An interest in the six-vertex model with such boundary conditions is related to the phenomena of the phase separation. The problems arising in connection with these phenomena are to establish the limit shapes as well as to study fluctuations of the random configurations near these shapes. A formulation of these problems originates from the classical work of A. M. Vershik and S. V. Kerov on the asymptotics of the Plancherel measures and the limit shape of the Young tableaux [5].

In this report, the two-point correlation function of the six-vertex model is studied. This correlation function describes fluctuations of the height function near its limit shape in the scaling limit. Based on the results of F. Colomo and A. G. Pronko [6], the exact expression for the height function of the six-vertex model in the free fermion point is obtained. The two-point correlation function in the scaling limit can be derived from the obtained analytical height function. The analytical findings are validated by Monte Carlo simulations for the finite square lattices [7, 8]. A good agreement of the analytical and numerical results is obtained.

Список литературы

1. R. J. Baxter, *Exactly solved models in statistical mechanics*, Academic press, 1982
2. E. H. Lieb, *Phys. Rev.*, 162, 162 (1967)
3. B. Sutherland, *Phys. Rev. Lett.*, 19, 103 (1967)
4. V. E. Korepin, *Comm. Math Phys.*, 86, 391 (1982)
5. A. M. Vershik, S. V. Kerov, *Dokl. Acad. Sci. USSR.*, 233, 1024 (1977)
6. F. Colomo, A. G. Pronko, *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, 2005, P05010 (2005)
7. D. Allison and N. Reshetikhin, *Ann. Inst. Fourier*, 55, 1847 (2005)
8. P. A. Belov, A. A. Nazarov, A. O. Sorokin, *Phys. Rev. E*, 95, 063308 (2017)

Номер проекта РФФИ: 18-01-00916

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ И ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Optically driven terahertz waves polarization modulation by single-wall carbon nanotube thin film

Kvitsinskiy A.¹, Demchenko P.^{1,2}, Novoselov M.^{1,2}, Anoshkin I.¹, Bogdanov K.³, Baranov A.³, Khodzitsky M.^{1,2}

¹Terahertz Biomedicine Laboratory, ITMO University, Russia

²Center for Bioengineering, ITMO University, Russia

³Center of Information Optical Technology, ITMO University, Russia

e-mail: anatolykvitsinskiy@gmail.com

Terahertz (THz) radiation is widely used in physics and astronomy, chemistry and medicine, security and telecommunication systems, and other fields of science and technology. Currently, one of the relevant problems for development in THz photonics is the lack of efficient and affordable tunable under external influences devices for modulating the polarization of an electromagnetic (EM) radiation in the THz frequency range. A promising solution to the foregoing problem is a study of carbon nanomaterials-based structures [1, 2] for use as a functional medium in polarizers due to unique optical and electronic properties of this materials.

The goal of this work was an experimental study of unaligned single-wall carbon nanotubes (U-SWCNT) with different geometric parameters using the THz time-domain spectroscopic polarimetry (THz-TDSP) method with an external optical pumping (OP) system to obtain its polarization properties.

Two U-SWCNT thin films samples on transparent float glass (TFG) substrates were studied. The U-SWCNT thin films were synthesized by the chemical vapor deposition at KTH Royal Institute of Technology's Microsystem Technology Laboratory (Sweden) on a nitrocellulose micropore (NCM) filter using ethanol gas without adding the hydrogen [3]. Then the U-SWCNT thin films were transferred from the NCM filter to the TFG substrates with a thickness of 1.030 nm. The diameters of the U-SWCNT were calculated using the Kataura plot and were 1.0–1.4 nm [2]. The length of the U-SWCNT was visualized by the transmission electron microscopy and was 5–15 μm [4]. Based on the scanning electron microscopy images, it can be seen that the nanotubes are distributed over the substrates in a form of a disordered mesh. By studying the Raman spectrum, it was found that the samples have a high degree of purity and a small number of structural defects.

To study the polarization properties of the experimental samples using the THz-TDSP method, a system based on a THz time-domain spectrometer [5], three wire grid polarizers, and a 980 nm laser for creating the OP of 0.2, 0.6, and 1.0 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ were used. Temporal waveforms of the THz signals transmitted through the samples were recorded using PC with LabVIEW (USA) software at the parallel and the crossed by 45° positions to a transmission direction of the polarizers. Each single measurement took ~43 min. All measurements were done at ITMO University's Terahertz Biomedicine Laboratory (Russia) under a stable air temperature of 291–293 K and a relative humidity of 40–45%.

Raw experimental data processing was done using MATLAB (USA) software. To obtain a maximum signal-to-noise ratio, a denoising technique was used. The rectangular signal windowing was used to exclude an influence of a water vapor absorption. Frequency dependencies of an azimuth angle ψ and an ellipticity angle χ of a polarization ellipse of the EM waves transmitted through the samples in the range from 0.2 THz to 1.0 THz and the polarization ellipses at various frequencies were calculated according to the Stokes parameters:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_1|^2 + |E_2|^2 \\ |E_1|^2 - |E_2|^2 \\ 2 \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \cos \delta \\ 2 \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot \tan^{-1}(S_2 \cdot S_1^{-1}) \\ 0.5 \cdot \sin^{-1}(S_3 \cdot S_0^{-1}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where E_1 and E_2 are complex amplitudes of parallel and perpendicular components of an electric field vector \mathbf{E} , and δ is a phase difference between them. According to the obtained experimental results, it is seen that, under the OP of $1.0 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, the azimuth angle changes up to 10° and the ellipticity angle changes up to 5° relative to the U-SWCNT without influences.

As a result of this work, the polarization properties of the U-SWCNT thin films in the THz frequency range were studied. It can be seen that the U-SWCNT is an efficient material for devise optically tunable polarization modulators, which are necessary in cutting-edge THz nanophotonics.

The reported study was funded by the Government of the Russian Federation, Grant Number 08–08 (“Project 5–100”), and by the Russian Science Foundation (RSF), Grant Number 19–72–10141 (“Thin-film structures based on bismuth and antimony for terahertz photonics”).

Список литературы

1. Photoexcited terahertz conductivity in multi-layered and intercalated graphene [Текст] / А. N. Grebenchukov [и др.] // Opt. Commun. — 2020. — Vol. 459. — P. 124982. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124982> (дата обращения 2020–02–20).
2. Optically controlled dielectric properties of single-walled carbon nanotubes for terahertz wave applications [Текст] / S. Smirnov [и др.] // Nanoscale. — 2018. — Vol. 10. — Iss. 26. — P. 12291–12296. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1039/C8NR03740J> (дата обращения 2020–02–20).
3. Single-wall carbon nanotube film grown by advanced ethanol chemical vapor deposition process [Текст] / А. А. Tonkikh [и др.] // J. Nanoelectron. Optoelectron. — 2012. — Vol. 7. — Iss. 1. — P. 99–101. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1166/jno.2012.1226> (дата обращения 2020–02–20).
4. Krause, В. A method for determination of length distributions of multiwalled carbon nanotubes before and after melt processing [Текст] / В. Krause, R. Boldt, P. Pötschke // Carbon. — 2011. — Vol. 49. — Iss. 4. — P. 1243–1247. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.11.042> (дата обращения 2020–02–20).
5. Polarization properties of few-layer graphene on silicon substrate in terahertz frequency range [Текст] / А. Kvitsinskiy [и др.] // SN Applied Sciences. — 2019. — Vol. 1. — Iss. 12. — P. 1714. — Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1748-x> (дата обращения 2020–02–20).

Влияние эффекта чётности *n*-алканов на структурные фазовые переходы

Гурьева С. А.¹, Марихин В.А.¹, Волчек Б.З.², Медведева Д.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИВС РАН

e-mail: swet.gurjewa@gmail.com

Целью работы являлось исследование трансформаций длинноцепочечных молекулярных кристаллов *n*-алканов при температурных фазовых переходах (ФП) методом ИК-Фурье спектроскопии. ИК-спектроскопический анализ позволяет выявить тонкие смещения в спектрах молекулярных колебаний, происходящие при изменении симметрии субъчеек в кристаллических сердечниках элементарных ламелей при твердофазном переходе I рода (ФП-1) [1].

Методом ИК-Фурье спектроскопии в предыдущих наших работах [2, 3] изучена кинетика развития структурного ФП-1 в монодисперсных образцах *n*-алканов: трикозана C₂₃H₄₈ и тетракозана C₂₄H₅₀. Для выявления кинетики были получены спектры образцов при ступенчатом повышении температуры с шагом 0,1К от 292 до 325К (Bruker IFS-88 FTIR spectrometer, Germany). Исследовались температурные зависимости частот и интенсивностей маятниковых ($\nu \sim 720 \text{ см}^{-1}$) и деформационных ($\nu \sim 1470 \text{ см}^{-1}$) мод колебаний протяжённых метиленовых CH₂ транс-последовательностей в сердечниках ламелей. Показано, что в сердечниках ФП-1 развивается по гетерогенному механизму в узком температурном интервале $\Delta T \sim 2\text{К}$ в соответствие с теорией размытых фазовых переходов I рода. Выяснено, что переход обусловлен изменением симметрии кристаллографических субъчеек с превращением исходных – в гексагональные. В частности, для трикозана (нечётного *n*-алкана) исходные субъчейки – орторомбические, а для чётного тетракозана – триклинные.

Значительный интерес представляет также исследование изменений в поверхностных слоях ламелей, образованных Ван-дер-Ваальсовыми контактами между концевыми метильными группами близлежащих ламелей. С этой целью была изучена спектральная область $\nu = 2800 - 3000 \text{ см}^{-1}$, включающая валентные колебания C-H связей в концевых метильных CH₃-группах. Согласно [4] в исследуемом частотном диапазоне наблюдается 8 полос поглощения, частоты которых несколько отличаются для *n*-алканов с разными длинами цепей. Приняты следующие обозначения полос:

r^+ – симметричные валентные колебания в CH₃-группах ($\nu(\text{C}_{23}\text{H}_{48}) = 2871.0 \text{ см}^{-1}$, $\nu(\text{C}_{24}\text{H}_{50}) = 2870.6 \text{ см}^{-1}$);

r_a^-, r_b^- – антисимметричные валентные колебания в CH₃-группах, компоненты in-plane и out-of-plane соответственно ($\nu(\text{C}_{23}\text{H}_{48}) = 2960.6$ и 2955.0 см^{-1} , $\nu(\text{C}_{24}\text{H}_{50}) = 2961.5$ и 2953.5 см^{-1});

d^+, d^- – симметричные и антисимметричные валентные колебания в CH₂-группах в цепи ($\nu(\text{C}_{23}\text{H}_{48}) = 2849.0$ и 2918.4 см^{-1} , $\nu(\text{C}_{24}\text{H}_{50}) = 2848.7$ и 2916.1 см^{-1});

d_w^+ – симметричные валентные колебания в конечных CH₂-группах ($\nu(\text{C}_{23}\text{H}_{48}) = 2858.3 \text{ см}^{-1}$, $\nu(\text{C}_{24}\text{H}_{50}) = 2859.3 \text{ см}^{-1}$).

Кроме того, имеются 2 полосы, обусловленные Ферми-резонансом симметричных валентных колебаний r^+ и d^+ с обертоном деформационных колебаний CH₂-групп.

Показано, что валентные колебания С-Н связей также, как маятниковые и деформационные для CH_2 -групп, испытывают частотный сдвиг порядка $1 - 2 \text{ см}^{-1}$ в области ФП-1. Исследование n-алканов разной чётности позволило выявить различия в инициализирующих переход функциональных группах. В трикозане ФП начинается с изменения частот r_a^-, r_b^- колебаний в концевых CH_3 -группах при $T = 39.9^\circ\text{C}$, что на 0.4°C опережает переход в сердцевинах ламелей. В тетракозане наиболее чувствительными оказались d^+, d^- колебания в метиленовых CH_2 -группах в сердечниках ламелей (уже при $T = 45.5^\circ\text{C}$ проявляется перестроение кристаллической структуры), тогда как изменения колебаний концевых групп начинается на 0.7°C позднее. Можно заключить, что чётность n-алканов влияет на развитие ФП-1 и на возникновение начальных нанозародышей новой фазы – либо в сердцевинах ламелей (для чётных), либо на поверхностях ламелей (для нечётных). Анализ взаимной упаковки концевых групп соседних ламелей позволяет сделать вывод, что этот эффект обусловлен особенностями формирования межламелярных прослоек в кристаллах с наклонными и перпендикулярно расположенными молекулами относительно базовых плоскостей из концевых групп в n-алканах разной чётности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН №13 «Основы высоких технологий и использование особенностей наноструктур в науках о природе».

Список литературы

1. Borisov A.K., Egorov V.M., Marikhin V.A., An investigation of the thermodynamic properties of longchain molecular crystals and the possibility of their application as phase change materials, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1400, 055020, 2019;
2. Марихин В.А., Гурьева С.А., Мясникова Л.П., Волчек Б.З., Медведева Д.А., Исследование кинетики фазового перехода I рода в тетракозане $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$ методом ИК-Фурье спектроскопии, ФТТ, т.61, вып.10, 1831-1835, 2019;
3. Gureva S.A., Marikhin V.A., Myasnikova L.P., Volchek B.Z., Medvedeva D.A., Crystal structure transformations during phase transitions in homologues of n-alkanes: $\text{C}_{23}\text{H}_{48}$, $\text{C}_{24}\text{H}_{50}$, $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$ as revealed by FT-IR spectroscopy, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1400, 055040, 2019;
4. MacPhail R. A., Straws H. L., Snyder R. G., C-H Stretching Modes and the Structure of n-Alkyl Chains. 2. Long, All-Trans Chains, *J. Phys. Chem.*, 88, 334-341, 1984;

Номер проекта РФФИ: 18-29-17023мк

Изменение дираковского конуса поверхностных топологических состояний при нанесении ферромагнетиков на BiSbTeSe_2

Кавеев А. К.¹, Терпицкий А.Н.¹, Терещенко О.Е.², Голяшов В.А.², Естюнин Д.А.³, Шикин А.М.³, Schwier E.F.⁴

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

²ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН

³СПбГУ

⁴Hiroshima University, Japan

e-mail: kaveev@mail.ioffe.ru

Управление спектром поверхностных топологических состояний топологических изоляторов привлекательно с точки зрения возможных применений в спинтронике. В частности, влияние эффекта близости при нанесении или внедрении в поверхностный слой магнитной примеси способно снимать топологическую защищенность состояний путем снятия инверсии по отношению к обращению времени [1].

В настоящей работе выявлено раскрытие энергетической щели в спектре поверхностных топологических состояний топологического изолятора BiSbTeSe_2 при нанесении субангстремных ферромагнитных металлических покрытий. В качестве ферромагнетика были использованы кобальт и марганец. Был выявлен эффект смещения точки Дирака за счет изгиба зон вниз (электронное легирование) при использовании тех же самых материалов (кобальта и марганца) в качестве адсорбатов, наносимых при комнатной температуре. Данный изгиб зон приводит к смещению точки Дирака ниже уровня Ферми, что позволило наблюдать область вблизи точки Дирака методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. В работе использовалась как обычная (синхротронное излучение), так и лазерная фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (титансапфировый лазер с накачкой зеленым лазером, и генератор 4-й гармоники, позволяющие исследовать образцы на длине волны около 200 нм и достигать пространственного разрешения 5-10 микрон, что крайне важно при исследовании шероховатых поверхностей, возникающих при вакуумном скалывании слоистых материалов с Ван-дер-Ваальсовыми связями, которыми, как правило, и являются топологические изоляторы). Ширина энергетической щели была оценена как 15-25 мэВ для случая нанесения кобальта, и 30-45 мэВ для случая нанесения марганца. Измерения резонансной фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения (синхротрон HiSOR, Хиросима, Япония) образцов с марганцем с энергией 47 эВ (соответствующей переходу 3p-3d марганца) продемонстрировали отсутствие электронных состояний марганца в области точки Дирака. Выявленные особенности спектров лежат выше точки Дирака более чем на 100 мэВ. Этот результат является подтверждением факта отсутствия состояний марганца внутри энергетической щели, и, как следствие, неприменимости механизма резонансного рассеяния [2] при определении природы энергетической щели. Температурные измерения выше 15 К показали устойчивость энергетической щели к повышению температуры. Известен механизм образования щели немагнитной природы, которая может быть связана с гибридизацией поверхностных состояний от двух противоположных поверхностей топологического изолятора, возникающих при проникновении атомов металла в Ван-дер-Ваальсовские зазоры между атомными квинтислоями топологических изоляторов на базе халькогенидов и разрушающих Ван-дер-Ваальсову связь [3]. Однако в нашем случае этот механизм неприменим из-за малого количества осажденного вещества (менее одного монослоя), которого недостаточно для диффузии по крайней мере через 4-5 квинтислоев подложки для раскрытия щели похожей ширины (~50 мэВ в [3]). Таким образом, можно сделать предположение о магнитной природе щели, связанной с поверхностным магнетизмом осажденных ферромагнитных атомов. Управление раскрытием энергетической щели магнитной природы можно рассматривать как инструмент управления топологическими состояниями топологического изолятора. Известно небольшое количество экспериментальных работ, посвященных раскрытию щели в спектре поверхностных состояний, например, [4], поэтому полученный нами результат является, на наш взгляд, заметным шагом в области экспериментальной физики топологических изоляторов.

Список литературы

1. X.-L. Qi, T.L. Hughes and S.-C. Zhang, Topological field theory of time-reversal invariant insulators, *Phys. Rev. B*, 78, 195424, 2008.
2. J. Sanchez-Barriga et al., Nonmagnetic band gap at the Dirac point of the magnetic topological insulator $(\text{Bi}_{1-x}\text{Mn}_x)_2\text{Se}_3$, *Nat. Comm.*, 7, 10559, (2016).
3. Y. Zhang et al., Crossover of the three-dimensional topological insulator Bi_2Se_3 to the two-dimensional limit, *Nat. Phys.* 6, 584–588, 2010.
4. E.D. Rienks et al., Large magnetic gap at the Dirac point in $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{MnBi}_2\text{Te}_4$ heterostructures, *Nature*, 576, 423, 2019.

Номер проекта РФФИ: 18-29-12094

Спектральные свойства новых прозрачных стеклокерамик на основе наноразмерных кристаллов $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnAl}_2\text{O}_4$

Еремеев К. Н.¹, Дымшиц О.С.², Алексеева И.П.², Хубецов А.А.², Запалова С.С.², Центрер М.Я.², Басырова Л.Р.³, Лойко П.А.⁴, Жилин А.А.², Попков В.И.⁵

¹СПбГТИ (ТУ)

²АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³Университет ИТМО

⁴CIMAP, CNRS, Université de Caen Normandie

⁵ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

e-mail: kirilleremeev42@gmail.com

Для создания активных элементов и пассивных затворов лазеров средней ИК области спектра перспективны материалы, содержащие тетраэдрически координированные ионы Fe^{2+} и имеющие интенсивное поглощение в области 2 – 3 мкм. Один из таких материалов – шпинели, активированные ионами Fe^{2+} [1]. По сравнению с монокристаллами и оптическими керамиками, стеклокерамики (СКМ), содержащие наноразмерные кристаллы шпинелей, имеют преимущества, обусловленные гибкостью и удобством производства по стекольной технологии, разнообразием составов, структур и размеров нанокристаллов.

Целью работы являлось исследование спектроскопических свойств новых прозрачных СКМ цинковоалюмосиликатной (ZAS) системы, содержащих наноразмерные кристаллы ганита (ZnAl_2O_4), допированного ионами Fe^{2+} , и связи этих свойств с фазовым составом и структурой созданных СКМ.

Модельное ZAS стекло, содержащее TiO_2 в качестве нуклеатора объемной кристаллизации [2] и 0.6 мол.% FeO в качестве активной добавки, было синтезировано при температуре 1560 °С в течение 5 часов с принудительной гомогенизацией расплава. СКМ были получены термообработкой по двухстадийным режимам при 720-1200 °С. Последовательность выделения кристаллических фаз определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Структура и фазовые превращения исследовались методами рентгенофазового анализа (РФА) и комбинационного рассеяния света (КР). Спектры поглощения были измерены в спектральном интервале 300-3300 нм.

Прозрачное стекло окрашено в желто-коричневый цвет. Согласно данным ДСК, его температура стеклования, T_g , составляет 696 °С, температура начала кристаллизации ганита – 798 °С, а температура максимума кристаллизации – 841 °С. Термообработка в

интервале температур 720 – 1050 °С приводят к изменению окраски образцов до чёрно-коричневой при сохранении их прозрачности. Образцы, термообработанные при 1100 – 1200 °С, непрозрачны.

Спектр поглощения стекла формируется коротковолновым краем поглощения ($E_g = 2.95$ эВ), двумя широкими неструктурированными полосами с $\lambda_{\text{макс}}$ около 1070 нм (переход ${}^5T_2 \rightarrow {}^5E$ (5D)) и около 1850 нм (переход ${}^5E \rightarrow {}^5T_2$ (5D)), обусловленными поглощением ионов Fe^{2+} в октаэдрической и тетраэдрической координации, соответственно, и широкой полосой в области 2700 – 3300 нм, обусловленной поглощением ОН-групп в стекле. С ростом температуры термообработки край поглощения сдвигается в ИК область, закрывая полосу поглощения при 1000 нм; заметно возрастает интенсивность полосы поглощения в области 2000 нм, положение ее максимума смещается к ~ 2030 нм; структурируется полоса поглощения ОН-групп, растёт ее интенсивность.

Во образцах СКМ основной кристаллической фазой является ганит, в интервале 1000 – 1200 °С дополнительно кристаллизуется TiO_2 (рутил). Размер кристаллов ганита при увеличении температуры термообработки растёт от 5 до 40 Å, объемная доля ганита увеличивается, причем в образцах, полученных при 1000 – 1200 °С, резко увеличиваются размер и количество кристаллических фаз. Параметр элементарной ячейки ганита a изменяется с увеличением температуры термообработки сложным образом и имеет величину от 8,09 Å (750 °С) до 8,11 Å (1200 °С), что отражает изменение состава и структуры кристаллов. Состав остаточного стекла приближается к кварцевому стеклу, что отражается в смещении максимума аморфного гало с 25,5 до 22 градусов угла 2θ . Данные КР спектроскопии не только подтверждают данные РФА, но и свидетельствуют об образовании ликвационных титансодержащих областей при одностадийной обработке и о сохранении этих областей до температур выделения рутила.

Изменение спектра поглощения при ситаллизации обусловлено вхождением ионов Fe^{2+} в структуру ганита в тетраэдрические позиции и с интервалентными переходами между ионами железа и титана. Структурирование спектра ОН-групп обусловлено их вхождением в кристаллы ганита.

Впервые созданы прозрачные СКМ, содержащие наноразмерные кристаллы $Fe^{2+}:ZnAl_2O_4$, перспективные для создания устройств лазерной техники, работающих в средней ИК области.

Список литературы

1. L. Basyrova, S. Balabanov, A. Belyaev, V. Drobotenko, A. Volokitina, V. Vitkin, O. Dymshits, P. Loiko, Synthesis, structure and spectroscopy of $Fe:MgAl_2O_4$ transparent ceramics, J. Phys. Conf. Ser. 1410 (2019) 012123.
2. V.V. Golubkov, O.S. Dymshits, V.I. Petrov, A.V. Shashkin, M.Ya. Tsenter, A.A. Zhilin, Uk. Kang, Small-angle X-ray scattering and low-frequency Ramanscattering study of liquid phase separation and crystallization in titania-containing glasses of the $ZnO-Al_2O_3-SiO_2$ system, J. Non-Cryst. Solids 351 (2005) 711–721.

Особенности диффузии водорода через мембрану из аморфного сплава $\text{Fe}_{92}\text{Si}_6\text{B}_2$

Плужникова Т. Н.¹, Федоров В.А.¹, Балыбин Д.В.¹, Яковлев А.В.¹, Плужников С.Н.²

¹ТГУ им. Г. Р. Державина

²ТГМПИ

e-mail: plushnik@mail.ru

Повышение надежности и увеличение сроков эксплуатации изделий из аморфных металлических сплавов находятся в прямой зависимости от содержания в них водорода. Степень наводороживания металлических сплавов определяется диффузионной способностью водорода. Последнюю можно определить, измеряя плотность тока водорода, диффундирующего через мембрану, изготовленную из исследуемого сплава.

В экспериментах использовали аморфный металлический сплав $\text{Fe}_{92}\text{Si}_6\text{B}_2$. Диффузию водорода через мембрану площадью $3,63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и толщиной 25 мкм изучали в двухкамерной ячейке Деванатхана. Использовали растворы с концентрацией 0,1; 0,5; 0,99 моль/литр HCl. Для сохранения постоянства ионной силы в растворы дополнительно вводили LiCl. Изменение механических свойств образцов определяли на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565. Элементный состав и морфологию поверхности образцов исследовали на растровом электронном микроскопе Merlin. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3М. Характеристику пластичности сплава определяли методом на изгиб.

Установлено, что средняя плотность тока диффундирующего водорода через мембраны из аморфного сплава уменьшается с ростом кислотности среды при неизменной ионной силе раствора. В случае с минимальной кислотностью скорость образования гидридов на поверхности невелика и превалирует диффузионный процесс. При увеличении кислотности среды возрастает скорость образования гидридов металлов на поверхности и диффузия водорода вглубь материала незначительна. Зависимость проницаемости водорода через мембраны из аморфного сплава можно объяснить также с точки зрения существования двух форм адсорбированного атомарного водорода на поверхности аморфного сплава: надповерхностного – H^+ и подповерхностного H^s , находящегося в динамическом равновесии [1]. Превалирование одной из форм этого водорода приводит либо к увеличению твердофазной диффузии (H^s), либо к ее уменьшению (H^+).

Экспериментально установлено, что морфологические особенности разрушения и деформации после твердофазной диффузии связаны с образованием ветвящихся трещин и складчатых структур. На поверхности разрушения образуется «венный» рельеф характерный для аморфных металлических сплавов. Величина деформационных складок составляет от 200 до 700 нм. При увеличении концентрации водорода деформационный рельеф существенно не меняется.

Отмечено незначительное изменение механических характеристик аморфного сплава $\text{Fe}_{92}\text{Si}_6\text{B}_2$ (предела прочности, микротвердости, модуля Юнга).

Установлено, что для мембраны из аморфного материала на основе железа при низких концентрациях водорода показатель потока твердофазной диффузии совпадает с предельным значением такого показателя для наиболее коррозионно-активной стали (Ст3), то есть наряду с коррозионной стойкостью аморфных сплавов необходимо учитывать их неустойчивость к водородной диффузии. Этот аспект имеет большое значение с учётом расширения областей применения аморфных сплавов, а также специфики самих этих областей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-01-00513_а), часть исследований выполнена на оборудовании ЦКП ТГУ имени Г.Р. Державина.

Список литературы

1. Тоя Т., Ито Т., Иши Ш. Две формы водорода на поверхности металла // Электрохимия. 1978. Т.14. № 5. С. 703 – 714.

Номер проекта РФФИ: 18-01-00513_а

Исследование влияния габитуса нанозародышей на специфику фазовых переходов в длинноцепочечных молекулярных кристаллах и полимерах

Борисов А. К.¹, Егоров В. М.¹, Марихин В. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: borisov.ak@bk.ru

Проведено сравнение температур плавления полиметилена и ряда длинноцепочечных алифатических молекулярных кристаллов (ДМК) (н-алканы $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$, н-алканолы $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COH}$, диолы $\text{HO}(\text{CH}_2)_n\text{COH}$, карбоновые $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ и дикарбоновые $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ кислоты) [1, 2]. В исследуемых образцах при кристаллизации из расплава или раствора образуются стопки из ламелярных образований. Толщина ламелей L пропорциональна числу n метиленовых CH_2 -групп в молекулах ДМК, которое варьировали от $n = 6$ (дикарбоновые кислоты) до $n = 44$ (н-алканы). Оказалось, что при одинаковой толщине ламелей температура плавления образцов может отличаться на несколько десятков градусов. Анализ профилей пиков плавления с использованием теории гетерогенных размытых фазовых переходов [2, 3] позволил сделать вывод, что значительное отличие в температурах плавления обусловлено наличием «эффективных» структурных образований, толщиной L^* , состоящих из N соседних элементарных ламелей: $L^* = L \cdot N$. Эти ламели ведут себя как единое целое во время фазового перехода, а число N для определенных ДМК зависит от соотношения объемной энергии и энергии торцевой поверхности. Показано, что габитус нанозародышей в ДМК изменяется от нанопризм, состоящих из 1-2 ламелей (для н-алканов) до нанофибрилл, состоящих из 6-7 ламелей (для дикарбоновых кислот). В результате анализа экспериментальных данных получена универсальная линейная зависимость температур плавления образца T_m от обратной толщины эффективных ламелей, описываемая уравнением $T_m = 414,2 \cdot \left[1 - \frac{6,27}{L^*} \right] \pm 0,8\text{K}$. Следует подчеркнуть, что, как и ожидалось, экспериментальные значения T_m при $L^* \rightarrow \infty$ соответствуют теоретическому значению равновесной температуры плавления идеального полиметиленового кристалла. Таким образом, продемонстрировано, что ДМК при количественном увеличении повторяющихся групп $-\text{CH}_2-$ теряют свои индивидуальные термодинамические свойства и приближаются к свойствам полиметилена вследствие изменения соотношения объемной и поверхностной энергий.

Список литературы

1. Б.Вундерлих. Физика макромолекул. т.3. Москва, Мир, 1984, 484 с.

2. В.М. Егоров, В.А. Марихин. ФТТ 58, 2482 (2016).
3. Г.А. Малыгин. УФН 171, 187 (2001).

Crystal growth and coalescence mechanisms in crystallizing liquid metal film

Galimzyanov B.N.^{1,2}, Yarullin D.T.¹, Mokshin A.V.^{1,2}

¹Kazan Federal University, Russia

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

e-mail: bulatnmail@gmail.com

The amorphous metallic alloys are materials with unique functional and engineering properties. Since the 80s of the last century, an amorphous state of the systems serves as a starting point to generate the nanocrystalline samples with required structural and morphological properties [1, 2]. Reheating a glassy system and an applied external pressure are used as the basic ways to control the crystal nucleation, growth and coalescence processes. Here understanding the nuclei coalescence mechanisms is of great importance from the viewpoint of new functional materials production.

One of the most intriguing is crystal growth through a mechanism of oriented attachment [3]. This mechanism is manifested in the crystallizing low-viscous supercooled liquids, and is detectable experimentally using high-resolution transmission electron microscopy. According to this mechanism, coalescence of crystalline nuclei arises as a result of their mutual rotation and the subsequent decrease of their crystallographic misorientation. It was reported in Ref. [4], that the crystal growth through this mechanism was also found in crystallizing high-viscous systems such as glass-ceramics. Nevertheless, as was found, due to the very slow particle dynamics in viscous systems, the mechanism of oriented attachment is not decisive for crystal growth.

In the present work, the atomistic dynamics simulations are performed to study the crystallization process in the ultrathin metallic film at different supercooling levels [5]. The considered supercooling levels cover the supercooled liquid and amorphous solid states. Scaled relations are applied to identify the characteristic regimes in the time-dependent crystalline nuclei concentration: steady-state nucleation regime, saturation regime and coalescence regime. We show that the crystal growth at the saturation regime appears due to mixing nucleation and coalescence processes. The crystallite coalescence realizes mainly through the mechanism of restructuration/absorption of crystal nuclei, whereas the mechanism of oriented attachment is manifested only at low levels of supercooling.

This work is supported by the Russian Science Foundation (project 19-12-00022).

Список литературы

1. Gleiter H., Nanostructured materials: basic concepts and microstructure, Acta Mater., 48, 1-29, 2000
2. Galimzyanov B. N., Yarullin D. T., Mokshin A. V., Structure and morphology of crystalline nuclei arising in a crystallizing liquid metallic film, Acta Mater., 169, 184-192, 2019

3. Ivanov V. K., Fedorov P. P., Baranchikov A. Ye., Osiko V. V., Oriented attachment of particles: 100 years of investigations of non-classical crystal growth, *Russ. Chem. Rev.*, 83, 1204-1222, 2014
4. Kracker M., Zscheckel T., Thieme C., Thieme K., Höcheb T., Rüssel C., Morphology, topography, and crystal rotation during surface crystallization of BaO/SrO/ZnO/SiO₂ glass, *Cryst. Eng. Comm.*, 21, 1320-1328, 2019
5. Galimzyanov B. N., Ladyanov V. I., Mokshin A. V., Remarkable nuances of crystallization: From ordinary crystal nucleation to rival mechanisms of crystallite coalescence, *J. Cryst. Growth*, 526, 125214, 2019

 Номер проекта РФФИ: 19-12-00022

Рентгendifракционное исследование материала на основе вольфрама для первой стенки термоядерного реактора ИТЭР

Козушкина А. И.^{1,2}, С. И. Павлов², А. А. Левин²

¹СПБПУ, ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kozushkina.ai@edu.spbstu.ru

Вольфрам является перспективным материалом для первой стенки термоядерного реактора. Проведено рентгendifракционное исследование W образца, изготовленного ОАО “Полема” и многократно обработанного He плазмой (~10²⁴He/m²).

Дифрактограммы обработанной плазмой (1) и исходной (0) сторон образца получены на порошковом дифрактометре. Атомный состав оценен энергодисперсионным рентгено-спектральным микроанализом (EDXS) на растровом электронном микроскопе. С использованием данных EDXS проведён фазовый анализ образцов. Выполнен профильный анализ рентгеновских рефлексов (программа *SIZECR*) с построением графиков Виллиамсона–Холла (WHP) [1] и “Размер-микронапряжение” (SSP) [2] для рефлексов псевдо-войтовского типа, и получены величины размеров кристаллитов *D* и микронапряжений *s* основных фаз. Проведён ритвельдовский количественный анализ дифрактограмм (программа *TOPAS* [3]) с включением в уточнение *D* и *s*. Получены весовое содержание фаз, параметры их элементарных ячеек, величины *D* и *s*.

На стороне 0 обнаружены фазы: основная W (80.9(2) wt%, *Im-3m*) и примесные BCN (15.6(1)wt%, *F-43m*), WB₄ (0.9(2) wt%, *P6₃/mmc*), Cu₄O₃ (2.7(1) wt%, *I4₁/amd*). Параметр элементарной ячейки W (*a* = 3.1703(1) Å) несколько больше, чем равновесный *a* = 3.165 Å. Размеры *D* по результатам разных методов хорошо совпадают: *D* = 46(8) nm, 51(8) nm и 49.0(4) nm согласно WHP, SSP и *TOPAS* соответственно. Величины *s* = 0.14(2) % и 0.15(2) % совпадают по результатам WHP и SSP соответственно, и только *TOPAS* даёт *s* = 0.000835(3) %.

На стороне 1: две фазы W с разными параметрами элементарной ячейки – W_1 (57.67(3) wt%) и W_2 (42.02(3) wt%) и примесь AlCr₂C (0.31(4) wt%, *P6₃/mmc*). Двумя фазами W объясняется наблюдаемая после обработки плазмой асимметрия рефлексов W.

Кристаллическая фаза W_1 имеет значение параметра *a* = 3.1593(2) Å. Величина *D* и *s* меняется слабо в сравнении со стороной 0 (*D* и *s* = 67(17) nm и 0.13(1) %, 61(9) nm и 0.13(1) %, 52.1(3) nm и 0.00089(3) % по результатам WHP, SSP и *TOPAS* соответственно).

Фаза W_2 имеет значение параметра $a = 3.1627(2)$ Å, более близкое к равновесному. Возможно, увеличение a по сравнению с W_1 произошло из-за вакансий в позициях W (коэффициент заполнения $p_W = 0.88(2)$). Если, базируясь на наличии заметного количества Ti на стороне 1 по результатам EDXS, предположить, что вместо вакансий в позициях W фазы W_2 находится Ti , то уточнение дает $p_W = 0.83(2)$ и $p_{Ti} = 0.17(2)$. Ti мог попасть на поверхность при изготовлении образца и войти в структуру после обработки плазмой. Для этой фазы D увеличивается, а s уменьшается в ~ 2 раза по сравнению со стороной 0 (D и $s = 129(37)$ nm и 0.097(8) %, 106(17) nm и 0.090(8) %, 136(4) nm и 0.00049(4) % по результатам WHP, SSP и *TOPAS*, соответственно). Таким образом, несмотря на разницу в величинах s , методы WHP/SSP и программа *TOPAS* показывают одну и ту же тенденцию. Возможно, разница в величинах s связана с разной дефиницией этой величины в разных программах.

Поскольку фаза W_1 на стороне 1 имела наибольшее весовое содержание и параметры микроструктуры, близкие к значениям на стороне 0, её можно отнести к материалу в глубине образца. Дефектную фазу W_2 можно считать приповерхностной.

Сравнение исходной стороны с обработанной в плазме позволяет сделать следующие выводы. Обработка в плазме приводит к выгоранию кристаллических фаз, содержащих лёгкие элементы, и уменьшению объёма кубической элементарной ячейки W при сохранении в глубине образца размеров кристаллитов и микронапряжений в них. В приповерхностном слое формируется дефектная фаза W с дефектами в виде вакансий или атомов Ti , что приводит к структурной и механической релаксации этого слоя. Вероятно, в результате этой релаксации размеры областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения вырастают в ~ 2 раза.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 18-08-00487А. Работа выполнена на оборудовании федерального ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект RFMEFI62119X0021).

Список литературы

1. В. Terlan, A. A. Levin, F. Börrnert, F. Simon, M. Oschatz, M. Schmidt, R. Cardoso-Gil, T. Lorenz, I. A. Baburin, J.-O. Joswig, A. Eychmüller, 'Effect of surface properties on the microstructure, thermal and colloidal stability of VB_2 nanoparticles', Chem. Mater. 27 (2015) 5106-5115, DOI: 10.1021/acs.chemmater.5b01856
2. Bürgehan Terlan, Aleksandr A. Levin, Felix Börrnert, Julian Zeisner, Vladislav Kataev, Marcus Schmidt, Alexander Eychmüller, „A size dependent analysis of structural, surface, thermal, and colloidal properties of $Ti_{1-x}B_2$ nanoparticles“, Eur. J. Inorgan. Chem. 2016 (2016) 3460-3468, DOI: 10.1002/ejic.201600315
3. *TOPAS 4.2*, Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany, 2009

Исследование особенностей призмного ввода узкополосного излучения в диффузионный волновод методом синхронного детектирования

Васильева М. В.¹, Лихачев А.И.¹, Нашекин А.В.¹, Соколов Р.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: masha130897@mail.ru

В настоящее время наблюдается растущий интерес к материалам с наночастицами (НЧ) благородных металлов благодаря их уникальным оптическим свойствам [1]. При облучении металлических НЧ светом энергия электромагнитного поля переходит в энергию коллективных колебаний электронов проводимости на границе раздела металл-диэлектрик – явление локализованного плазмонного резонанса (ЛПР). Стёкла с НЧ серебра на поверхности представляются перспективными структурами для создания оптических сенсоров биологического и медицинского назначения в силу высокой чувствительности спектрального положения ЛПР к показателю преломления внешней среды [2, 3].

Для возбуждения локализованного плазмона на границе металл-диэлектрик должно выполняться согласование проекции волнового вектора падающего излучения на границу раздела и волнового вектора плазмона. Для согласования волновых векторов обычно используют волноводы различной конфигурации и структуры, сопряженные с призмными или решёточными элементами связи. Диффузионный волновод – наиболее часто встречающийся тип волноводной структуры, формирующийся в приповерхностной области стекла методом ионного обмена (ИО) [4].

В работе были исследованы покровные стекла толщиной 180 мкм с синтезированными на поверхности серебряными НЧ, покрытые полимерной пленкой полиамида – 6 (ПА-6). Синтез серебряных НЧ со средним размером 25 нм на поверхности покровных стекол проводился методом ионного обмена из расплава AgNO_3 (5 вес.%) + NaNO_3 (95 вес.%) с последующим восстановлением в парах воды [5]. В процессе ИО в приповерхностной области стекла образуется диффузионный волновод толщиной порядка 1,67 мкм [6]. Пленки ПА-6 наносились методом центрифугирования, контроль толщин осуществлялся методом спектральной эллипсометрии [7].

Была проведена серия экспериментов по вводу и выводу излучения узкополосного источника в диффузионный волновод в таких структурах с использованием призмных элементов связи. С этой целью был собран программно-аппаратный комплекс для измерения в автоматическом режиме зависимости интенсивности выходного излучения от угла при заданном угле падения. В качестве узкополосного источника излучения был использован полупроводниковый лазер (405 нм). Измерения сигналов слабой интенсивности проводились методом синхронного детектирования (Lock-in nanovoltmeter type 232 (Польша)) с целью улучшения соотношения сигнал/шум.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность ввода излучения с использованием призмных элементов связи в диффузионный волновод, сформированный в приповерхностной области покровных стекол. Показано, что для исследуемых структур есть угол, при котором обеспечивается оптимальный ввод излучения в волновод и вывод из него. Результаты работы подтверждают возможность использования призмного метода ввода излучения в приборных структурах с металлическими наночастицами на поверхности покровных стекол для создания биологических и химических сенсоров.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 20-03-00400а.

Список литературы

1. Mayer K. M., Hafner J. H. (2011). *Localized Surface Plasmon Resonance Sensors*. // *Chemical Reviews*, 111(6), 3828–3857.
2. Nishi H., Hiroya S., Tatsuma T. (2015). *Potential-Scanning Localized Surface Plasmon Resonance Sensor*. // *ACS Nano*, 9(6), 6214–6221.
3. Willets K. A., Van Duyne R. P. (2007). *Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing*. // *Annu. Rev. Phys. Chem.*, V58, 267–297.
4. Stosch J. H., Kuhler T., Griese E. (2018). *Bend Structures in Optical Diffusion Waveguides*. // *2018 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*.
5. Kaganovskii Yu., Mogilko E., Lipovskii A.A., Rosenbluh M. (2007). *Formation of nanoclusters in silver-doped glasses in wet atmosphere*. // *Journal of Physics: Conference Series*, V61, 508–512.
6. Lihachev A.I., Nashchekin A.V., Sokolov R.V., Konnikov S.G. (2019). *Determination of the thicknesses and visualization of ion-exchange waveguides in glasses by scanning electron microscopy*. // *Technical Physics* 64(3), 418–421.
7. Lihachev A.I., Brunkov P.N., Nashchekin A.V., Tolmachev V.A., Vasileva M.V. (2019). *Characterization of optically inhomogeneous polymer layers with silver nanoparticles by spectroscopic ellipsometry*. *Journal of Physics: Conference Series* 1400:055041.

Номер проекта РФФИ: 20-03-00400а

Особенности структуры нитевидных нанокристаллов оксида меди по данным электронной микроскопии

Берминова М.С.¹, Мясоедов А.В.¹, Калмыков А.Е.¹, Сорокин Л.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: MarinaBerminova@yandex.ru

Нитевидные нанокристаллы (ННК) представляют собой кристаллы с высоким аспектным отношением: их диаметр не превышает 100 нм, а длина может достигать сотни микрон [1]. Интерес к ним вызван тем, что они обладают уникальным комплексом физических и химических свойств, а также являются одними из самых перспективных материалов для наноэлектроники и нанопотоники.

Среди полупроводниковых ННК выделяются ННК CuO, так как они являются узкозонными полупроводниками р-типа (ширина запрещенной зоны – 1.2 эВ) и их применение возможно в качестве газовых сенсоров [2], полевых эмиттеров [3], при фотокатализе в видимом диапазоне излучения [4].

Существует целый ряд способов получения ННК CuO. Термическое окисление является одним из наиболее широко распространенных методов получения ННК CuO, так как отличается простотой, производительностью и сравнительно невысокой стоимостью. Вопрос о кристаллической структуре ННК CuO, полученных термическим окислением, и механизме их роста на сегодняшний день остается открытым [5]. Для катализа и фотокатализа большое значение имеют структура и морфология поверхности катализатора, так как каталитическая активность различных граней может отличаться в сотни раз. Таким образом, цель данной работы – детальное исследование структуры и морфологии ННК

CuO методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), полученных термическим окислением медных покрытий. Исследование структуры ННК позволит целенаправленно управлять морфологией CuO ННК путем регулировки параметров синтеза.

В качестве объекта исследования были выбраны ННК CuO выращенные отжигом медных покрытий в атмосфере воздуха в интервале температур 250-500 °С. Впервые для ПЭМ исследования были приготовлены поперечные сечения ННК CuO, что позволило выявить целый ряд их структурных особенностей. Установлено, что ННК могут представлять собой не только бикристаллы, но и мульткристаллы, состоящие из нескольких нанокристаллов с границей раздела параллельной направлению роста. Граница между составными частями ННК может быть плоскостью двойникования, может не совпадать с ней и представлять собой фасетированную поверхность. Направлением роста ННК является направление [110]. Установлены ориентационные соотношения между составными частями ННК, плоскости их сопряжения.

Обнаружено явление повторного двойникования, когда вторая составляющая бикристалла является результатом двойникования первой составляющей сперва по плоскости (11-1), затем по плоскости (001).

Боковая поверхность ННК не состоит из явно выраженных граней, тем не менее, можно утверждать, что элементами поверхности являются плоскости, содержащие направление [110], такие, как (001), (110), (11-1), (11-2). Наиболее ярко выражены грани (001).

Список литературы

1. V.G. Dubrovskii, N.V. Sibirev, J.C. Harmand, F. Glas. Phys. Rev. B, 78, 235 301 (2008).
2. Hyo-Joong Kim, Jong-Heun Lee//Sensors and Actuators B 192 (2014) 607– 627
3. Feng et al // AIP ADVANCES 8, 045109 (1-8), 2018
4. Kozlov A.Yu. et al// Nano Hybrids and Composites 2017, Vol. 13, pp 183-189.
5. Lijun Xiang et al// J. Mater. Res., Vol. 33, No. 16, Aug 28, 2018, pp. 2264-2280

Расчет электропроводности тонкого проводящего слоя с учетом граничных условий Соффера и анизотропии изоэнергетической поверхности проводника

Савенко О.В.¹, Кузнецов П.А., Кузнецова И.А.

¹Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

e-mail: o.savenko@uniyar.ac.ru

Известно, что электропроводность тонкого слоя отличается от электропроводности макроскопического образца. Значение средней длины свободного пробега носителей заряда в типичных металлах и полупроводниках при комнатной температуре лежит соответственно в пределах 10 – 100 нм, 10 – 1000 нм. Современные технологии позволяют создавать элементы интегральных схем с характерным размером порядка нанометра. Теоретическое описание электрических свойств таких элементов требует учета поверхностного рассеяния носителей заряда.

Большинство проводящих материалов обладает анизотропной формой изоэнергетической поверхности. В ряде случаев изоэнергетическую поверхность таких материалов

можно представить трехосным эллипсоидом, что является естественным обобщением часто используемой для решения задач сферически-симметричной энергетической зоны. Учет анизотропии изоэнергетической поверхности выполнен в работе [1] при расчете электропроводности тонкой неоднородной цилиндрической проволоки.

В настоящей работе кинетическим методом решена задача об высокочастотной электропроводности тонкого проводящего слоя с учетом модели граничных условий Соффера. Рассматривается случай полупроводника с произвольным вырождением. Предполагается, что толщина слоя много больше длины волны де Бройля носителей заряда, что позволяет пренебречь квантовыми размерными эффектами. На соотношение между толщиной слоя и длиной свободного пробега носителей заряда ограничений не накладывается. Скин-эффект не учитывается, т.к. рассматриваемая толщина слоя много меньше глубины скин-слоя. Предполагается, что изоэнергетическая поверхность представляет собой эллипсоид вращения.

Периодическое по времени электрическое поле действует на носители заряда и вызывает отклонение их функции распределения от равновесной функции Ферми-Дирака. Неравновесная функция распределения носителей заряда ищется из решения кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации и в линейном по внешнему электрическому полю приближении. В качестве граничных условий использована модель Соффера, учитывающая зависимость коэффициента зеркальности от параметра шероховатости и угла между вектором скорости и нормалью к поверхности слоя. Параметры шероховатости верхней и нижней поверхности предполагаются различными. Неравновесная функция распределения позволяет рассчитать плотность тока, полный ток и интегральную проводимость.

Проанализированы зависимости интегральной проводимости слоя от безразмерных параметров: толщины слоя, частоты электрического поля, параметров шероховатости поверхностей, степени несферичности изоэнергетической поверхности и химического потенциала. Проведено сравнение полученных результатов для предельных случаев вырожденного и невырожденного электронного газов. Показано, что максимальное относительное различие между результатами для этих предельных случаев наблюдается при диффузном отражении носителей заряда от поверхностей слоя. Выполнен сравнительный анализ результатов с расчетами, проведенными ранее в рамках модели диффузно-зеркальных граничных условий и с известными экспериментальными данными.

Список литературы

1. I.A. Kuznetsova, D.N. Romanov, A.A. Yushmanov The electrical conductivity of an inhomogeneous thin metal wire in the case of an ellipsoidal Fermi surface and a constant mean free path of the electrons // *Physica Scripta*. 2019. V. 94. № 11. 115805.

Взаимодействие электромагнитной E-волны с тонкой проводящей пленкой с учетом анизотропии изоэнергетической поверхности проводника и постоянной длины свободного пробега

Романов Д. Н.¹, Кузнецова И. А.¹, Юшканов А. А.²

¹ЯрГУ им. П.Г. Демидова

²МГОУ

e-mail: romanov.yar357@mail.ru

В рамках кинетической теории решена задача об электропроводности тонкой проводящей пленки с учётом эллипсоидальной изоэнергетической поверхности и постоянной длины свободного пробега в рамках модели диффузно-зеркальных граничных условий Фукса и различных коэффициентов зеркальности поверхностей. Для предельных случаев вырожденного газа и невырожденного газа свободных носителей заряда получены упрощённые выражения. Найденная электропроводность подставляется в аналитические выражения для коэффициентов отражения, прохождения и поглощения [1] при взаимодействии с E-волной. Электромагнитная волна падает на поверхность пленки под произвольным углом. Тонкая проводящая пленка расположена между двумя диэлектрическими средами. Выполнен анализ зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и поглощения от эффективной массы при различных значениях коэффициентов зеркальности при отражении электронов (дырок) от поверхностей тонкого проводящего слоя. Проведено сравнение между случаями вырожденного и невырожденного газа свободных носителей заряда.

Список литературы

1. Уткин А. И., Юшканов А. А. Влияние коэффициентов зеркальности на взаимодействие электромагнитной E-волны с тонкой металлической пленкой, расположенной между двумя диэлектрическими средами // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. № 2. С. 250-254.

Номер проекта РФФИ: 19-32-90008

Атомно-силовая микроскопия пористых сегнетоэлектрических пленок PZT

Гущина Е. В.¹, Зайцева Н.В.¹, Делимова Л.А.¹, Орлов Г.А.², Серегин Д.С.², Воротилов К.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²РТУ МИРЭА

e-mail: katgushch@yandex.ru

Благодаря высоким электрофизическим параметрам сегнетоэлектрические (СЭ) пленки цирконата-титаната свинца $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT) представляют большой интерес для современных электронных технологий, в том числе для создания пьезоэлектрических микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1]. При формировании PZT методом

химического осаждения из растворов (золь-гель), толщина слоя за одно нанесение ограничена растрескиванием пленки в процессе сушки из-за возникающих механических напряжений при ее усадке [2]. Конечная толщина пленок PZT при многократном нанесении слоев обычно составляет 100-500 nm, в то время как для МЭМС применений требуются пленки с толщиной более 1 μm . Эффективным способом увеличения толщины пленок, свободных от растрескивания, является введение в пленкообразующий раствор PZT органического полимера (порогена), который увеличивает вязкость наносимого раствора и подвергается деструкции при отжиге, образуя пористую структуру.

В данной работе методами контактной атомно-силовой микроскопии (к-АСМ) изучены топография поверхности, локальное распределение токов и сигнала пьезоотклика (PFM-сигнал) в СЭ пористых PZT пленках, сформированных на Si/SiO₂/Ti/Pt подложках с использованием в качестве порогена поливинилпирролидона (PVP) с молекулярной массой 360000. Пленки толщиной 400-700 nm формировали из растворов с добавлением 0 – 20 вес.% PVP. С помощью к-АСМ были получены изображения топографии и карт распределения локального тока одного и того же участка поверхности. Это дало возможность провести сравнение профилей сигналов топографии и тока. Показано, что в пленке без PVP локальные токи протекают внутри зерен, образующих плотную столбчатую структуру. При концентрациях PVP 1-3 вес.% на анализируемых профилях наблюдаются всплески межзеренного тока, но начиная с 6 вес.% PVP и выше, локальный ток, протекающий в области пор превышает величину тока, регистрируемого в области зерен.

Исследование PFM-сигнала данных пленок также свидетельствует об уменьшении площади переключаемого сигнала и размытии изображений в пористых пленках с содержанием PVP более 6 вес.%. Эти результаты коррелируют с данными сканирующей электронной микроскопии, согласно которым, с увеличением содержания PVP структура пленки трансформируется от столбчатой структуры зерен перовскита с отдельными включениями пор к губчатой и гранулярной структурам.

Авторы Н.В. Зайцева, Л. А. Делимова, Д. С. Серегин, К. А. Воротилов благодарят за поддержку проект РФФИ № 19-02-00148.

Список литературы

1. G.L. Smith, J.S. Pulskamp, L.M. Sanches, D.M. Potrepka, R.M. Proie, T.G. Ivanov, R.Q. Rudy, W.D. Nothwang, S.S. Bedair, C.D. Meyer, R.G. Polcawich. *J. Am. Ceramic Soc.* 95, 1777 (2012).
2. К.А. Vorotilov, M.I. Yanovskaya, E.P. Turevskaya, A.S. Sigov. *J. Sol-Gel Technology.* 16, 109 (1999).

Фурье-анализ растрескивания тонких пленок гексагональных полупроводников

Компан М. Е., Бессолов В.Н., Грузинов Н.Д.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kompan@mail.ioffe.ru

Широкозонные гексагональные полупроводники (GaN AlN) востребованы в оптоэлектронике как материалы для создания источников света в УФ и на коротковолновом краю видимого диапазона, а также для некоторых других применений.

Для создания приборов УФ необходима т.н. “квазиподложка”, обеспечивающая малое количество дефектов роста. Таким материалом для подложек мог бы являться кремний соответствующей ориентации Si(111); в этом случае симметрия материала подложек совпадала бы с гексагональной симметрией материала наращиваемых пленок, например AlN/Si(111). Однако, эпитаксиальный рост слоя AlN на Si затруднен из-за большого различия постоянных решеток AlN и Si. Кроме того, значительно различаются коэффициенты термического расширения этих материалов. При эпитаксии это приводит к высоким механическим напряжениям и растрескиванию слоя, особенно для относительно толстых пленок.

Как правило, даже в случае, когда предварительный, содержащий трещины, слой впоследствии зарастает сплошной, без трещин, пленкой полупроводника, области над трещинами оказываются более низкого качества, дефектными, с пониженной подвижностью носителей.

Некоторыми технологическими приемами удается уменьшить растрескивание. Однако до настоящего времени отсутствовал объективный количественный способ оценки степени растрескивания пленок.

В работе предложен количественный метод оценки трещин пленочных материалов на базе фурье-анализа картины растрескивания. В отличие от существовавшего оценочного способа подсчета трещин, пересекающих произвольную прямую, Фурье-анализ извлекает информацию из имеющейся картины трещин на всей поверхности, и тем самым, лишен субъективности. Разработаны также некоторые процедуры коррекции изображения. Относительно сложным было нахождение корректной процедуры определения среднего расстояния между трещинами, поскольку процесс трещинообразования является случайным, не подчиняющимся аналитической закономерности. Нами был применен критерий, разработанный в социологии для оценок случайных распределений – медианная оценка среднего значения.

Способ применен для анализа системы трещин в пленках гексагональных полупроводников. Например, для структур AlN / Si(111), полученных различными методами [1], среднее расстояние между трещинами, полученное Фурье-анализом соответствовало величинам, полученным субъективным оценочным методом. Необходимо подчеркнуть, что, даже при значительном разбросе межтрещинного расстояния, затрудняющем визуальную оценку, примененный метод автоматически исключает субъективность и предоставляет численные данные для сравнения методов выращивания пленок.

Таким образом: был разработан способ объективной оценки системы трещин на базе Фурье-анализа картины растрескивания. Разработанный метод позволяет количественно сравнивать и оценивать различные подходы и технологии выращивания пленок.

Один из авторов, Бессолов В.Н., благодарит за поддержку Российский фонд фундаментальных исследований (проект № 20-08-00096).

Список литературы

1. В.Н. Бессолов, Н.Д. Грузинов, М.Е. Компан, Е.В. Коненкова, В.Н. Пантелеев, С.Н. Родин, М.П. Щеглов // Письма в ЖТФ, 2020, том 46, вып. 81

Номер проекта РФФИ:20-08-00096

Эффект модуляции состава при спиноподальном распаде твердых растворов $Zn_xCd_{1-x}Te$ в условиях энергетического резонанса

Кузнецов В.В.¹, Москвин П.П.², Скуратовский С.И.²

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

² Государственный университет «Житомирская политехника», Украина

e-mail: vvkuznetsov@inbox.ru

Полупроводниковые твердые растворы A^2B^6 перспективны для создания регистраторов электромагнитного излучения широкого диапазона длин волн. Синтез сверхтонких слоев этого класса материалов обычно проводят при низких температурах [1-2], что предопределяет термодинамическое состояние $Zn_xCd_{1-x}Te$ близким к состоянию спиноподального распада. Следствием релаксации подобного пересыщенного состояния твердой фазы является эффект модуляции состава распадающегося твердого раствора [3-6] с образованием своеобразной сверхструктуры.

Слой $Zn_xCd_{1-x}Te$ получали на неориентированной подложке, т.е. упругое состояние пленки не вызывалось различием параметров кристаллической решетки гетеропары. Этот факт предопределил изменение исходных положений [4-6] порядка моделирования спиноподального распада, а именно: упруго деформированное состояние твердого раствора в его кристаллической матрице рассматривали по отношению к ПКР (периоду кристаллической решетки) самого исходного материала. При этом величину ПКР твердой фазы принимали как текущую переменную, связанную со средним составом твердого раствора.

В указанных условиях стационарное уравнение для расчета концентрационных полей в материале при его спиноподальном распаде приобрело вид:

$$\beta \frac{d^2x}{dz^2} = \alpha^s x \cdot (1-x) + RT[x \ln x + (1-x) \ln(1-x)] + \lambda_{ijk} \cdot N_0 a(a - a_s)^2 / 4 - \mu = F(x)$$

где z – координата в направлении роста слоя; $\alpha^s = \alpha^s_{ZnTe-CdTe} = 17230-14,83 \cdot T$ Дж/мол. – параметр твердофазного взаимодействия в модели регулярных растворов; x – мольная доля цинка в $Zn_xCd_{1-x}Te$; N_0 – число Авогадро; a, a_s – текущий и средний ПКР слоя; λ_{ijk} – комбинация модулей упругости C_{ij} [3]; β – коэффициент разложения в степенной ряд свободной энергии Гиббса в неоднородном по составу твердом растворе [4-6]; μ – химический потенциал твердой фазы (константа интегрирования).

Среднюю концентрацию компонента в твердом растворе определяли как: $\bar{x} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L x(z) dz$, где L – период колебаний состава.

Для начальных условий, в которых задается диапазон составов при моделировании распада материала, использовали выражения [6]: $x_{нач} = const, \frac{dx}{dz} \Big|_{z=0} = 0$

Термодинамические параметры исходных бинарных соединений системы Zn-Cd-Te и их упругие свойства заимствованы из [3], с соответствующими линейными аппроксимациями.

Поиск термодинамических условий, определяющих колебательный характер изменения состава твердого раствора, осуществляли путем расчетов фазовых портретов системы по методике [6].

Основу численного метода интегрирования уравнения (1) составлял стандартный метод Рунге-Кутты. Набор тестирующих и рабочих программ реализован на основе пакета "Matematica".

Типичная картина распределения получена для состава и ПКР по слою твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$ с $\bar{x} = 0.21$ мол. дол., который синтезируется при $T = 450$ К. Решение показало наличие концентрационных доменов, т.е. периодичности в изменении состава твердого раствора в направлении роста слоя. Амплитуда колебательного процесса, ограниченная возможностью существования когерентного сопряжения зарождающейся фазы и решетки исходного раствора, не превышала 0.02 мол. дол. [6, 7].

Неожиданно получено решение стало значительное возрастание амплитуды колебаний состава в пределах границ стабильной и метастабильной областей существования твердых растворов. При этом состояние системы, для которого характерно значительное возрастание амплитуды концентрационных колебаний и, как следствие, проявление её нелинейных свойств, можно определить как некое резонансное состояние. За это состояние отвечают термодинамические параметры, которые определяют фазовый портрет материала в границах метастабильной и абсолютно нестабильной областей. В противном случае, когда условия резонанса не выполняются, наблюдается релаксация системы, приводящая к срыву колебательного процесса, ответственного за модуляцию состава материала.

Появление периодических изменений состава должно быть учтено при формировании даже поликристаллических слоев твердых растворов, когда размеры кристаллитов становятся соизмеримыми с периодом модуляции.

Список литературы

1. Moskvina P.P., Kryzhanivskyy V.B., Rashkovetskiy L.V. et al. J. Cryst. Growth, 2014. V. 404, p.204–209.
1. Moskvina P.P., Kryzhanivskyy V.B., Rashkovetskiy L.V., et al. J. Cryst. Growth, 2017. V.475, p.144-149.
2. Кузнецов В.В., Москвин П.П. Межфазные взаимодействия при гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов. Монография: Из-во «Лань», Санкт-Петербург, 2019 г., 376 с.
3. Sahn J.W. Acta Metallurgica, 1961, V.9. P. 81-87.
4. Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов. Москва: Наука. 1974. 383 с.
5. Moskvina P.P., Skurativskiy S.I. Kravchenko O.P. et al. J. Cryst.Growth, 2019. V.510, p.40-46.
6. Максимов С.К., Бондаренко Л.А., Кузнецов В.В., Петров А.С. Физика твердого тела. 1982. Т. 24. № 2. С. 628-631.

Расчет спектра комбинационного рассеяния графеновой наноленты

Шарин Е. П.¹, Понамарев В.В.

Северо-Восточный федеральный университет им М.К. Аммосова

e-mail: ep.sharin@s-vfu.ru

Графеновые наноленты (GNR) – узкие полосы графена – обладают уникальными электронными свойствами, которые делают их интересным материалом для нанoeлектронных устройств. В отличие от графена, GNR имеют значительную запрещенную зону из-за квантового ограничения, что является фундаментальным требованием для приложений [1, 2]. Электронные свойства GNR зависят от ширины лент и структуры краев [3, 4].

Исследования с помощью сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии подтвердили тесную связь между структурой и свойствами, предоставляя структурную и электронную информацию в атомном масштабе [1, 4]. Однако поверхностный синтез атомарно точных графеновых нанолент является лишь первым шагом к интеграции GNR в нанoeлектронные устройства, за которым должен следовать их контролируемый перенос с металлической ростовой подложки (обычно Au (111)) на изолирующую или полупроводниковую подложки, которые более подходят для приложений цифровой логики.

Однако интеграция GNR в нанoeлектронные устройства является критическим этапом, поскольку необходимо сохранять качество GNR и контролировать его после переноса на подложку. Рамановская спектроскопия является пока единственным методом, способным исследовать структурное качество GNR на всем пути от роста в условиях сверхвысокого вакуума (UHV) до интеграции в нанoeлектронные устройства.

В данной работе на основе метода функционала плотности исследуются колебательные свойства графеновых нанолент, края которых пассивированы атомами водорода. Показано, что в графеновых нанолентах с различной шириной характерные сигнатуры однослойного графена в спектрах комбинационного рассеяния все еще хорошо сохраняются, что абсолютные интенсивности G- и 2D-линий масштабируются с шириной наноленты, а интенсивность D-линии – нет. Следовательно, интенсивность D-линии зависит только от краевой области наноленты, включая шероховатость кромки, которая может быть дополнительно проанализирована путем выполнения зависимых от поляризации измерений.

Список литературы

1. Cai, J., Ruffieux, P., Jaafar, R., Bieri, M., Braun, T., Blankenburg, S., Muoth, M., Seitsonen, A.P., Saleh, M., Feng, X., Müllen, K., and Fasel, R. (2010) Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons. *Nature*, 466 (7305), 470–473.
2. Cai, J., Pignedoli, C.A., Talirz, L., Ruffieux, P., Söde, H., Liang, L., Meunier, V., Berger, R., Li, R., Feng, X., Müllen, K., and Fasel, R. (2014) Graphene nanoribbon heterojunctions. *Nat Nano*, 9 (11), 896–900.
3. Gröning, O., Wang, S., Yao, X., Pignedoli, C.A., Borin Barin, G., Daniels, C., Cupo, A., Meunier, V., Feng, X., Narita, A., Müllen, K., Ruffieux, P., and Fasel, R. (2018) Engineering of robust topological quantum phases in graphene nanoribbons. *Nature*, 560 (7717), 209–213.
4. Ruffieux, P., Cai, J., Plumb, N.C., Patthey, L., Prezzi, D., Ferretti, A., Molinari, E., Feng, X., Müllen, K., Pignedoli, C.A., and Fasel, R. (2012) Electronic Structure of Atomically Precise Graphene Nanoribbons. *ACS Nano*, 6 (8), 6930–6935.

Дифракция света на многослойных голографических дифракционных структурах на основе фотополимерного материала

Дудник Д. И.¹, Шарангович С.Н.

¹ТУСУР

e-mail: drinza10@gmail.com

Многослойные неоднородные голографические дифракционные структуры (МНГДС) в поглощающих фотополимерных материалах (ФПМ) представляют собой набор слоев из неоднородных решеток, разделенных оптически однородными промежуточными слоями [1-3]. Благодаря возможности управления видом селективного отклика и дифракционными характеристиками таких структур, они имеют перспективу найти широкое практическое применение в качестве элементов в устройствах оптической связи.

В работах [4, 5] описан процесс формирования МНГДС в ФПМ с учетом фотоиндуцированного изменения оптического поглощения материала и без, где показано, что во время записи происходит трансформация пространственных профилей показателя преломления каждого слоя МНГДС. Неоднородность профиля показателя преломления дифракционной структуры может существенно отличаться на каждом слое МНГДС и быть однородной, спадающей, возрастающей или куполообразной. В моделях дифракции плоских волн на МНГДС, представленных в работах [6, 7], учитывают только определенный вид однородности – спадающий, подобно ослаблению интенсивности света по экспоненциальному закону, или не учитывается совсем.

В данной работе представлена аналитическая модель дифракции световых пучков на МНГДС с учетом пространственной неоднородности амплитудного профиля первой гармоники показателя преломления, возникающей в процессе голографического формирования решеток в фотополимерном материале. Процесс считывания МНГДС представляется произвольно поляризованным монохроматическим световым пучком в пренебрежении остаточным поглощением материала. Процессы дифракции описываются в геометрооптическом приближении. Рассмотрена дифракция только на основной пространственной гармонике показателя преломления дифракционной структуры, т.к. амплитуды высших гармоник экспоненциально убывают с увеличением их номера.

В работе получены самогласованные аналитические решения уравнений связанных волн в частных производных, описывающие пространственные распределения дифрагирующих пучков на выходе n -го слоя, которые зависят от распределения дифрагирующих пучков на выходе предыдущего слоя. Полученные пространственные распределения векторных световых полей позволяют определить поляризационные и амплитудные параметры дифракционных полей на выходе n -го слоя МНГДС.

Для определения дифракционного светового поля на выходе всей МНГДС, состоящей из N голографических дифракционных структур, которые разделены $N-1$ промежуточными слоями, применен матричный метод описания преобразования световых волн в многослойных средах [8], на основе их передаточных функции (матриц перехода). Представлены аналитические выражения для матриц перехода неоднородных слоев МНГДС на основе голографических фотополимерных решеток.

Данная модель позволяет рассчитать поляризационные и дифракционные характеристики МНГДС, такие как частотно-угловая селективность и дифракционная эффективность, а также провести оптимизацию характеристик МНГДС, в зависимости от их практических приложений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения Госзадания на 2020 год.

Список литературы

1. Nordin, G.P., Johnson, R.V., Tanguay, A.R. Diffraction properties of stratified volume holographic optical elements. // Journal of the Optical Society of America A. – 1992. – Vol. 9, N. 12. – pp. 2206-2217.
2. Hesselink, L. Analysis of photorefractive stratified volume holographic optical elements. // Journal of the Optical Society of America B. – 1994. – Vol. 11, N. 9. – pp. 1800-1808.
3. Aimin, Y., Liren, L. Bragg diffraction of multilayer volume holographic gratings under ultrashort laser pulse readout. // Journal of the Optical Society of America A. – 2009. – Vol. 26, N. 1. – pp. 135-141.
4. Malallah, R. Improving the uniformity of holographic recording using multilayer photopolymer Part I Theoretical analysis / R. Malallah, H. Li, Y Qi, D. Cassidy, I. Muniraj, N. Al-Attar, J.T. Sheridan // Journal of the Optical Society of America A. – 2019. – Vol. 36, N. 3. – P. 320-334.
5. Дудник, Д.И. Влияние фотоиндуцированного изменения оптического поглощения на формирование многослойных неоднородных голографических дифракционных структур на основе фотополимерных материалов / Д.И. Дудник, С.Н. Шарангович // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г. – Минск: РИВШ, 2019. – С.26-27.
6. Yan, X. Influence of buffer layer and grating layer on diffraction of multilayer volume holographic grating / X. Yan, X. Wang, Y. Chen et al. // Applied Physics B. – 2019. – Vol 125(5). – P. 1-8.
7. Устюжанин, С.В. Векторная модель дифракции света на электрически-управляемых неоднородных дифракционных структурах в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах / С.В. Устюжанин, С.Н. Шарангович // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. – 2007. – №2(16). – С. 192–197

Зарождение гексагональной и кубической фаз GaN на наноструктурированной подложке Si(100)

Коненкова Е. В.¹, Бессолов В.Н.¹, Коненков С.Д.¹, Родин С.Н.¹, Середова Н.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: lena.triat@ioffe.rssi.ru

Нитрид галлия гексагональной модификации h-GaN активно используется при создании оптоэлектронных приборов, однако наличие внутренних электрических полей препятствует повышению квантовой эффективности некоторых приборов. Обычно кубический GaN выращивается с помощью эпитаксии на подложках GaAs, MgO, 3C-SiC.

В последнее время уделяется повышенное внимание к синтезу c-GaN на кремниевых структурированных подложках Si(100) методом MOCVD. По крайней мере известны две модели, объясняющие возникновение кубической модификации GaN при синтезе на структурированной подложке Si(100).

Согласно модели, предложенной S.R.J.Brueck [1], синтез GaN протекает в гексагональной фазе, которая индуцирует вторичную V-образную канавку с противоположными гранями (0001). Фазовый переход *h-c* происходит по дну всей вторичной канавки из-за наличия противоположных GaN(0001) граней.

В модели, предложенной С.Ваурам [2] было отмечено, что, если два фронта роста *h*-фазы сливаются под углом 109.5° , то возможно формирование *c*-GaN между границами роста гексагональной фазы.

В данной работе сообщается об обнаружении кубического – *c*-GaN при синтезе полуполярного GaN(10-12) на наноструктурированной подложке кремния – NP-Si(100) и предлагается новая модель зарождения кубической фазы, которая основывается на зарождении слоя AlN в наноразмерной V-образной канавке Si(100) при сопряжении плоскостей AlN(10-10) и *c*-GaN по механизму “magic mismatch”.

Синтез слоев AlN и GaN проводился методом MOCVD на поверхности подложки, у которой V-образные канавки были сформированы с периодом около 100 нм, и имели наклонные грани близкие к Si(111). Структуры состояли из слоя AlN толщиной 10 – 30 нм, нелегированного слоя GaN толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$.

В спектрах люминесценции при $T = 80\text{K}$ GaN проявляются полосы с максимумами: $h\nu = 3.44 \text{ эВ}$, который мы связываем с межзонной рекомбинацией, $h\nu = 3.41 \text{ эВ}$, который возникает при возникновении дефектов упаковки BSF и $h\nu = 3.20 \text{ эВ}$, $h\nu = 3.16 \text{ эВ}$, которые можно отнести к излучению межзонной и донорно-акцепторной рекомбинации кубического нитрида галлия.

Модель люминесценции кубического GaN может быть связана с особенностями зарождения слоя GaN на слоях AlN, возникших из-за наноструктурированной подложки Si(100). Действительно, при малых скоростях роста и поскольку диффузия адатомов Al невысока, происходит формирование нанокристаллов AlN у которых присутствуют грани (10-12), (0001) и (10-10). Мы полагаем, что происходит формирование кристаллов *c*-GaN по механизму “magic mismatch”, когда сопрягаются три элементарных ячейки AlN(10-10) с двумя элементарными ячейками кубического GaN(001). В этом случае величины несоответствия для двух направлений грани AlN(10-10) составляют величину $f_1=3.3\%$ and $f_2=9.4\%$.

Таким образом, предложенный подход перспективен для зарождения кубической фазы GaN на кремниевой подложке.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-00096).

Список литературы

1. Lee S. C. *et.all.*, J. Cryst. Growth Des. 16 (2016) 2183–2189.
2. Bayram C. *et.all.*, Advan.Funct.Mater., 24(28), (2014) 4492–4496.

Synthesis of composite single crystal structures on the basis of iron borate for fundamental studies and practical applications

Mogilnec Yu. A.¹, Seleznyova K.A.¹, Seleznev K.A.¹, Strugatsky M.B.¹, Yagupov S.V.¹

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Russia

e-mail: kira_seleznyova@mail.ru

Iron borate FeBO_3 is a unique “transparent magnet” that combines a spontaneous magnetization at room temperature and transparency in the visible region of the spectrum [1]. It possesses a calcite structure with spatial symmetry group C_{2v} . From the standpoint of magnetic structure, FeBO_3 is a two-sublattice easy-plane trigonal antiferromagnet with weak ferromagnetism [1]. It is quite sensitive to external magnetic fields, pressures, temperature, *etc.* This fact makes FeBO_3 of a great interest for possible practical applications and fundamental research. Such crystals can be used as elements of magnetic memory, magneto-optical and magnetoacoustic transducers, sensors of weak magnetic fields, pressure and temperature.

The isomorphic substitution of a part of Fe^{3+} ions by ions of other metals makes it possible to modify the physical properties of iron borate and form new ones. For instance, diamagnetically diluted crystals $\text{Fe}_{1-x}\text{Me}_x\text{BO}_3$ (Me = Ga, Al) allow fine-tuning such characteristics as a magnetocrystalline anisotropy, exchange and Dzyaloshinskii-Moriya interaction, the Neel temperature, *etc.* Decreasing of the latter one is extremely important for applications of iron borate based crystals as a unique monochromators for synchrotron Mössbauer spectroscopy [2]. Moreover, in this case extremely strict requirements are imposed on the quality of these crystals that necessitates a standard procedure of crystal synthesis to be modified. In $\text{FeBO}_3\text{:Ni}$ photomagnetic properties are observed, namely, a light-induced dynamic instability and photomagnetic memory [3]. The microscopic nature of these properties is still under the question. In order to elucidate this issue we proposed to synthesize and study by EPR $\text{Ga}_{1-x}\text{Ni}_x\text{BO}_3$ single crystals with $x \sim 0.01$. In these materials Ni ions are located in the diamagnetic matrix of Ga ions; this matrix is isostructural to Fe one in FeBO_3 . Thus, paramagnetic Fe ions «do not interfere» studying the magnetic state of Ni.

In the present work, the series of abovementioned single crystals were synthesized using developed by us modified flux growth technique. It should be noted that for crystals with different compositions the development of specific temperature crystallization mode was required. In as much as cooling of the crystals in the solution melt leads to mechanical stresses and destruction of them, we substantially modified the process of extracting of synthesized samples from a crystallization setting. As a result, two technological modes were developed: (i) crystallization in open and (ii) closed crucibles. During the first one the synthesis was carried out using a seed holder; in the latter mode the solution-melt was drained from a crucible at high temperatures immediately after finishing of crystal growth. Both modes required the modernization of crystallization setting, but, at the same time, improved the quality of the synthesized crystals. Using a seed holder made it possible to synthesize thin magnetic film of iron borate on a diamagnetic gallium borate substrate. In this case, the seed crystal is GaBO_3 , and a thin film of FeBO_3 is synthesized by liquid-phase epitaxy route. Such a structure will make it possible to carry out fundamental studies of the nature of surface magnetism in FeBO_3 and can be considered as a magnetic memory element [4].

Fundamental studies of the synthesized structures allows one to get insight in the magnetic properties of trigonal magnets, moreover, these properties can be fine-tuned that opens up great opportunities for the practical application of such materials.

This work was partially supported by the RFBR in the framework of scientific projects Grant no. 19-32-90054 (thin magnetic films), 18-32-00210 “mol_a” ($\text{Ga}_{1-x}\text{Ni}_x\text{BO}_3$ single crystals), 19-29-12016 “mk” ($\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x\text{BO}_3$ single crystals) and by the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Development Program for 2015-2024 Grant no. VG04/2019 ($\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x\text{BO}_3$ single crystals and modernization of crystallization setting).

Номер проекта РФФИ: 19-32-90054, 18-32-00210, 19-29-12016

Деформация ленточных аморфных металлических сплавов при синергическом действии нагрузки и импульсного электрического тока

Яковлев А.В.¹, Федотов Д.Ю.¹, Федоров В.А.¹, Плужникова Т.Н.¹

¹Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина

e-mail: DAK-83@mail.ru

Аморфные металлические сплавы (АМС) и изделия из них находят широкое применение, подвергаясь в ходе эксплуатации различного рода воздействиям: механическому, электромагнитному, тепловому, радиационному и т.д. Исследования АМС ведутся с середины прошлого века, однако до сих пор не разработана единая модель структуры и свойств данных материалов. Результаты исследований свойств АМС, подверженных различного рода воздействиям носят противоречивый характер. Исходя из этого, исследование изменения свойств и структуры АМС под влиянием различного рода воздействий является одной из актуальных задач физики неупорядоченных сред.

Цель работы – определить процессы, происходящие в нагруженных АМС и вызывающие сброс механической нагрузки в момент воздействия импульсов электрического тока.

Материалами для проведения исследований были взяты АМС на основе кобальта с различным содержанием основы, полученные методом спиннингования. В ходе работы применяли образцы с размерами $90 \times 3,54 \times 0,02$ мм. Одноосное растяжение образцов осуществляли на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565 со скоростью движения траверсы 0,1 мм/мин. Во время деформации образца через него пропускали импульсы электрического тока путем разрядки конденсатора. Плотность тока, протекающего через образцы, варьировали от $1 \cdot 10^8$ до $1 \cdot 10^9$ А/м². Использовали импульсы с длительностью ~ 5 мс.

Для всех исследованных сплавов получены диаграммы нагружения $s(e)$ при синхронном пропускании импульсного тока разной величины. Одновременно регистрировали соответствующие температурные зависимости нагрева образцов. Из диаграмм установлены значения $\Delta\sigma$ и ΔT , полученные при пропускании импульсного электрического тока для всех сплавов. Используя закон теплового расширения и закон Гука для удлинения, получаем следующие значения: согласно закону Гука, который применим к упругой деформации, наблюдаемой в нашем случае $\Delta l_p = (\Delta\sigma \times l_0)/E$. Найденные значения удлинений лежат в интервале $12,7 \times 10^{-5}$ м – $55,15 \times 10^{-5}$ м в зависимости от состава сплавов. После сброса, напряжение восстанавливается к исходному значению. Расчет по закону теплового расширения дает другие значения $\Delta l_T = \alpha \times l_0 \times \Delta T$, которые лежат в интервале $1,44 \times 10^{-5}$ м –

$6,84 \times 10^{-5}$ м в зависимости от состава сплавов. Доля спада механического напряжения за счет термического расширения достигает ~ 11 % от общей величины сброса механического напряжения. Из полученных результатов следует, что дополнительное изменение длины, полученное за счет общего сброса механического напряжения, на 78 % превышает значение, полученное при термическом расширении. Это свидетельствует о том, что помимо термического расширения в образцах происходят другие обратимые процессы ответственные за сброс механического напряжения. Это могут быть, например, конкурирующие процессы направленной структурной релаксации, процессы топологического упорядочивания, которые, вероятнее всего, ответственны за такое поведение механического напряжения у исследуемых материалов.

Таким образом, величина сброса механического напряжения, полученная за счет импульсов электрического тока, в аморфном сплаве, зависит от элементного состава сплавов, и обусловлена не только термическим расширением, но и протеканием других обратимых процессов, обусловленных спецификой воздействия на аморфные сплавы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-01-00513).

Номер проекта РФФИ: № 18-01-00513

Исследование влияния условий роста на толщину переходных слоев в напряженных сверхрешетках InAs/GaSb

Николаев А. А.¹, Левин Р.В.², Неведомский В.Н.², Пушный Б.В.²

¹СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

²ФТИ

e-mail: aanikolaev1@stud.etu.ru

Для создания фотоприемников ближнего и среднего ИК-диапазонов (до 15 мкм) перспективными материалами являются напряженные сверхрешетки на основе системы материалов InAs/GaSb. Использование сверхрешеток InAs/GaSb в приборах позволяет понизить скорость оже-рекомбинации, и как следствие повысить рабочую температуру [1].

В настоящее время часто используют для роста сверхрешеток InAs/GaSb метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2]. Альтернативным и более производительным вариантом выращивания сверхрешеток InAs/GaSb является метод МОС-гидридной эпитаксии (МОС ГФЭ). Проблемой МОС ГФЭ является получение сверхрешеток с малыми толщинами переходных слоев, что в свою очередь сказывается на качестве получаемых материалов.

Целью работы являлось проведение комплекса исследований начальных стадий роста, которые влияют на резкость гетерограниц, а, следовательно, и на величину возникающих напряжений, от которой зависит величина эффективной ширины запрещенной зоны напряженных сверхрешеток.

Эксперименты по выращиванию сверхрешеток InAs/GaSb проводились на установке МОСГФЭ AIXTRON AIX-200. Структуры выращивались на подложках n-GaSb (001) при температуре роста 500°C. Давление в реакторе составляло 76 мм.рт.ст. Газ-носитель — очищенный водород с суммарным потоком через реактор 5,5 литров в минуту. Источники элементов для роста: триметилиндий (TMIn), триэтилгаллий (TEGa), триметилсурьма (TMSb), и арсин (AsH₃).

Было исследовано влияние на величину переходных слоев продувки реактора водородом для полной смены газовой среды в зоне роста. Выращивание каждого слоя начиналось с одновременной подачи: GaSb – TEGa и TMSb, а InAs – TMIп и AsH₃. Подача элементов прерывалась после каждого выращенного слоя, а водород продолжал подаваться. Время прерывания подачи реагентов изменялось в диапазоне 10-60 сек.

В результате исследования было установлено, что границы слоев InAs/GaSb имели переходные слои менее 0,7нм. Наименьшее значение толщины переходного слоя ~ 0,6 нм было получено при времени прерывания роста и продувки водородом равном 30 сек.

Исследовалась очередность подачи реагентов, а именно один из реагентов подавали на несколько секунд раньше другого, при этом скорости роста InAs и GaSb сделали примерно одинаковыми: 0,04 и 0,03 нм/сек соответственно. Минимальная толщина переходного слоя между InAs/GaSb наблюдалась при разнице времени подачи элементов в 2 секунды, выращивание слоя InAs заканчивали более поздним выключением AsH₃ по отношению к TMIп, а для GaSb выращивание начинали с первоочередной подачи TMSb по отношению TEGa.

В результате исследований были изготовлены структуры InAs/GaSb с толщиной переходного слоя ~ 0,6нм, при этом минимальные толщины слоев в сверхрешетках составили 2нм.

Список литературы

1. С. Н. Grein, P. M. Young, H. Ehrenreich, Appl. Phys. Lett. 61, 2905 (1992);
2. Razeghi, M., Nguyen, B-M. Advances in mid-infrared detection and imaging: a key issues review. Rep. Prog. Phys. 77, 082401 (2014).

Анизотропные плазмоны в структурах Au/GaAs(001) с нанокластерами золота

Берковиц В. Л.¹, Кособукин В.А.¹, Улин В.П.¹, Солдатенков Ф.Ю.¹ Левицкий В.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

²НТЦ тонкопленочных технологий

e-mail: vladimir.berkovits@mail.ioffe.ru

Создание структур металл-полупроводник с плазмонными наночастицами и изучение их физических свойств весьма актуально для приложений в оптоэлектронике, нанофотонике, фотовольтаике и других областях. В связи с этим в данной работе были созданы, диагностированы и исследованы оптическими методами структуры Au/GaAs(001), в которых обнаружены плазмоны, показывающие анизотропию свойств. Обнаружение и изучение плазмонной анизотропии стало возможным благодаря применению метода спектроскопии анизотропного отражения (АО).

Методом АО регистрируется спектральная зависимость сигнала

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_\alpha - R_\beta}{R_\alpha + R_\beta} \quad (1)$$

где R_α и R_β – коэффициенты отражения при нормальном падении света, поляризованного линейно вдоль кристаллографических направлений α и β на поверхности. Наличие ненулевого спектра АО (1) служит доказательством оптической анизотропии и уникальным

способом ее изучения для плазмонов в кластерах, образующихся на поверхности кубических полупроводников [1, 2]. Так, в спектрах АО нанокластеров In на поверхности InAs(001) были обнаружены интенсивные резонансные сигналы, обусловленные возбуждением анизотропных плазмонов [1]. Анализ спектров АО позволил оценить размеры кластеров индия и степень анизотропии поверхностной структуры In/InAs [1, 2].

В данной работе структуры Au/GaAs(001) создавались путем вакуумного отжига пленок Au толщиной ~10 нм, нанесенных на поверхность GaAs(001). Для предотвращения реакции золота с GaAs при нагреве поверхность кристалла покрывалась атомарно тонкой пленкой нитрида GaN [3]. При отжиге таких структур на поверхности и в прилежащем к ней объеме кристалла GaAs обнаружено образование двух типов нанокластеров Au, которым в спектрах обычного отражения соответствуют резонансные особенности с энергиями 2.1 и 1.6 эВ соответственно [3, 4].

Измеренные до отжига спектры АО структур Au/GaAs показывают наличие слабого сигнала $\sim 10^{-4}$. После кратковременного (5 мин) отжига при 350°C в спектре АО появляется широкая особенность около 2 эВ. Большая интенсивность, резонансный характер и положение особенности в спектре позволяют связать ее с анизотропными плазмонами нанокластеров Au, образовавшихся на поверхности GaAs при отжиге. Формирование нанокластеров Au подтверждается данными атомно-силовой микроскопии. При повторных отжигах у особенности вырастает низкоэнергетическое плечо, что связано с появлением второй особенности вблизи 1.6 эВ. Последняя обусловлена формированием в приповерхностной области кристалла кластеров Au, у которых энергия плазмонов понижена из-за влияния диэлектрической проницаемости GaAs.

Теоретический анализ проводился для модели анизотропных плазмонов в кластерах Au двух типов, образующих монослой на поверхности кристалла GaAs и под ней, соответственно. Каждый монослой моделировался трехосными эллипсоидами, заполняющими прямоугольную решетку [2]. Вычисленные спектры АО показывают особенности, которые по энергии близки к пикам, обнаруженным в спектрах отражения, но спектры АО имеют существенно иную форму, обусловленную анизотропией кластеров.

Эксперименты показали, что плазмоны нанокластеров Au, находящихся на поверхности кристалла GaAs и в прилежащем объеме, обладают сходной поляризационной анизотропией относительно направлений. Это означает, что в указанных направлениях слои с нанокластерами Au двух типов обладают одинаковой анизотропией характерных размеров. Обнаруженную анизотропию плазмонов в структурах Au/GaAs(001) можно связать с известным для кристаллов A_3B_5 различием химических свойств поверхности в направлениях [1-10] и [110]. Как следствие, форма нанокластеров Au определяется различием в этих направлениях скоростей диффузии адатомов Au по поверхности GaAs и скоростей химической реакции между Au и GaAs в прилежащем объеме. Обобщая результаты этой работы и работы [1] заключаем, что обнаруженная плазменная анизотропия есть общее свойство металлических нанокластеров, формирующихся на поверхности (001) кристаллов A_3B_5 .

Работа поддержана грантом РФФИ.

Список литературы

1. V.L. Berkovits, V.A. Kosobukin, V.P. Ulin, et al., Surf. Sci. 632, L9–L12 (2015)
2. V.A. Kosobukin, A.V. Korotchenkov, Phys. Solid State 58, 2536 – 2544 (2016)
3. V.L. Berkovits, V.A. Kosobukin, V.P. Ulin, et al., Semiconductors 52, 1849-1852 (2018)
4. V.L. Berkovits, V.A. Kosobukin, V.P. Ulin, et al., J. Phys: Conf. Ser. V. 1400, 055005 (2019)

Диэлектрические свойства сегнетоэлектрика бромида диизопропиламмония внедренного в пористые стекла

Милинский А. Ю.¹, Барышников С.В.¹, Чарная Е.В.², Ускова Н.И.²

¹Благовещенский государственный педагогический университет

²СПбГУ

e-mail: a.milinskiy@mail.ru

Исследования, проведенные для малых частиц, выявили существенные изменения их физических свойств при уменьшении размеров. Одним из способов получения малых частиц является внедрение исследуемого вещества в пористые материалы, характерный размер пор которых лежит в нанометровом диапазоне. Наноконкомпозиты на основе пористых матриц (пористое стекло, опал, пористый оксид алюминия и др.), заполненные сегнетоэлектриками, имеют перспективы практического применения в электронной технике [1-3]. Физические свойства таких наноструктур определяются размерами и геометрией сетки пор, взаимодействием частиц со стенками пор и между собой. Свойства полученных таким образом сегнетоэлектрических наноконкомпозитов могут существенно отличаться от свойств объемного материала.

В последние годы был открыт ряд органических соединений с полярной точечной группой при комнатной температуре и относительно высокой точкой плавления (~450 К). К таким сегнетоэлектрикам относится диизопропиламмония хлорид ($C_6H_{16}NCl$, DIPAC) $P_s \sim 8.2 \text{ мС} \times \text{см}^{-2}$, $T_c = 440 \text{ К}$ [4]; диизопропиламмония бромид ($C_6H_{16}NBr$, DIPAB) $P_s \sim 23 \text{ мС} \times \text{см}^{-2}$, $T_c = 426 \text{ К}$ [5]; диизопропиламмония иодид ($C_6H_{16}NI$, DIPAI) $P_s \sim 5.17 \text{ мС} \times \text{см}^{-2}$, $T_c = 378 \text{ К}$ [6]. В частности DIPAB имеет спонтанную поляризацию близкую к титанату бария, высокую температуру Кюри и демонстрирует хороший пьезоэлектрический отклик [7]. Эти атрибуты делают его альтернативой перовскитоподобным сегнетоэлектрикам и сегнетоэлектрическим полимерам. Исследованию размерных эффектов в сегнетоэлектриках семейства диизопропиламмония посвящено несколько работ [8-10].

В данной работе приводятся результаты исследований диэлектрических свойств органического сегнетоэлектрика DIPAB внедренного в пористые стекла со средним размером пор 100 нм.

Максимумы на кривых $\epsilon'(T)$ для объемного образца наблюдаются при температуре 425.8 К, что соответствует структурному переходу $P2_1 \rightarrow P2_1/m$. При охлаждении максимум ϵ' сдвигается в сторону низких температур примерно на 3-4 К. Температурный гистерезис согласуется с первым родом фазового перехода.

Диэлектрические аномалии в области фазового перехода для наноконкомпозитов менее выражены по сравнению с объемными образцами. Активационный рост диэлектрической проницаемости в наноконкомпозитах, по-видимому, обусловлен вкладом поляризации Максвелла-Вагнера, которая возникает за счет перераспределения зарядовой плотности на границах раздела пористого стекла и включений DIPAB.

Аномалия диэлектрической проницаемости, связанная с сегнетоэлектрическим фазовым переходом в наноконкомпозитах сдвинута в сторону низких температур на 5 К по сравнению с объемным образцом. Отметим также, что, наряду с понижением температуры фазовых переходов и значительным размытием переходов, в наноконкомпозитах увеличивается температурный гистерезис фазового перехода, что свидетельствует об усилении степени первородности в условиях наноконфайнмента.

Для установления температурной области существования сегнетоэлектрической фазы были исследованы нелинейные диэлектрические свойства объемного DIPAB и

нанокompозитов на его основе. Согласно результатам, полученным при нагреве, для объемного и нанокompозитного DIPAB высокие значения коэффициента $\gamma_{3\omega}$ наблюдаются от комнатной температуры до 426, 421 К соответственно. Выше указанных температур коэффициент третьей гармоники меняется незначительно, что связано с нахождением образцов в параэлектрическом состоянии.

Таким образом, в данной работе проведены диэлектрические исследования бромида диизопропиламмония, внедренного в пористые стекла. Исследования выявили увеличение гистерезиса и смещение температуры Кюри к низким температурам.

Список литературы

1. J.F. Scott, F.D. Morrison, M. Miyake, et al. Nano-Ferroelectric Materials and Devices. *Ferroelectrics* 336, 237 (2006).
2. Ronald C. G. Naber, Kamal Asadi, Paul W. M. Blom, Bert de Boer. Organic Nonvolatile Memory Devices Based on Ferroelectricity. *Advanced Materials*. Volume 22, Issue 9 Pages 933-945 (2010)
3. Y. Yuan, T.J. Reece, P. Sharma, S. Poddar, S. Ducharme, A. Gruverman, Y. Yang, J. Huang Efficiency enhancement in organic solar cells with ferroelectric polymers. *Nature Materials*. T. 10, № 4. С. 296-302 (2011).
4. D.-W. Fu, W. Zhang, H.-L. Cai, J.-Z. Ge, Y. Zhang, and R.-G. Xiong. *Adv. Mater.* 23, 5658 (2011).
5. D.-W. Fu, H.-L. Cai, Y. Liu, Q. Ye, W. Zhang, Y. Zhang, X.-Y. Chen, G. Giovannetti, M. Capone, J. Li, and R.-G. Xiong. *Science* 339, 425 (2013).
6. Jiang C, Tong W-Y, Lin H, et al. Effect of counter anions on ferroelectric properties of diisopropylammoniumcation based molecular crystals. *Physic Status Solidi A*. 2017;214:1700029.
7. Y. Li, K. Li, J. He. *Chem. Phys. Lett.* 689, 174 (2017)
8. C. Thirnal, P.P. Biswas, Y.J. Shin, T.W. Noh, N.V. Giridharan, A. Venimadhav, and P. Murugavel. *Jour. of App. Phys.* 120, 124107 (2016).
9. S.V. Baryshnikov, E.V. Charnaya, A.Yu. Milinskiy, V.A. Parfenov, I.V. Egorova. *Phase Transitions* 91, 293 (2018).
10. Барышников С.В., Милинский А.Ю., Чарная Е.В., Егорова И.В. *ФТТ* 61, 273 (2019).

Номер проекта РФФИ: 19-29-03004.

Электрокаталитическая активность наноструктурированных пленок на основе палладия

Петриев И. С.¹, Пушанкина П.Д.¹, Луценко И.С.¹, Глазкова Ю.С.¹, Мальков Т.И.¹

¹КубГУ

e-mail: petriev_iliya@mail.ru

Мембраны на основе палладиевых сплавов обладают высокой селективностью по водороду, высокой термической стабильностью и механической стойкостью. [1] Одним из способов интенсификации переноса водорода через такие мембраны является увеличение площади активной поверхности. Посредством этого происходит ускорение поверхностных стадий переноса водорода – хемосорбции, диссоциации. Также существенную роль

могут играть характеристики структурной организации модифицирующего слоя: энергетическая гетерогенность поверхности, природа поверхности по отношению к активным адсорбционным центрам.

Целью данного исследования являлось получение высокоразвитых структур-модификаторов переноса водорода через палладийсодержащие мембраны и исследование кинетических характеристик транспорта водорода. Подобная модификация приводит к интенсификации процесса массопереноса в температурном диапазоне от 0 до 100 °С, что позволяет снизить энергетические затраты в процессе получения высокочистого водорода, а также использовать полученные мембраны для создания высокоэффективного низкотемпературного топливного элемента.

Разработан метод модификации поверхности пленок сплава Pd – 23% Ag и синтеза нанодисперсного палладиевого покрытия, улучшающего газокинетические характеристики транспорта водорода. Исследованы газотранспортные параметры мембран с их модифицированными поверхностями. Пленки Pd – Ag с поверхностями, модифицированными наночастицами палладия, продемонстрировали плотность потока водорода до 0,1 ммоль / (с·м²) при низких температурах (<100 °С), давлениях (<0,6 МПа) и при достаточно низкой толщине палладиевой мембраны (<10 мкм).

Скорость проникновения водорода для достаточно тонких палладиевых мембран (<10 мкм) при низких температурах (<90 °С) и давлениях (<0,6 МПа) ограничивается диссоциативно-ассоциативными процессами на межфазных границах. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что нанесение на поверхность металлической мембраны наноструктурированного палладиевого покрытия может ускорять лимитирующую стадию, тем самым значительно увеличивая скорость переноса водорода. Известно, что нанодисперсные структуры на поверхностях мембран усиливают их адсорбционную способность, а также влияют на каталитическую активность этих материалов в реакциях с участием водорода [2]. И, помимо всего прочего, такая высокоразвитая поверхность модификатора позволяет снизить барьер диссоциации для молекул водорода на поверхности мембраны, что в свою очередь увеличивает скорость проникновения водорода через палладиевую мембрану.

Каталитическая активность покрытий исследована в реакциях электрохимического окисления метанола, имеющих важное практическое значение в связи с разработкой электрокатализаторов для топливных элементов. Окисление метанола проявляется на циклических вольт-амперограммах в виде характерных пиков тока, имеющих место при изменении потенциала каждого из исследуемых электродов как в анодном, так и в катодном направлении [3]. На анодной ветви вольтамперограмм пик тока при окислении метанола проявляется в интервале потенциалов ~ -0.2 – 0.2V относительно электрода сравнения, достигая максимального значения тока при 0,023V, а на катодной — в интервале потенциалов ~ 0.3 – -0.45V, при максимальном значении тока на -0,34V. Электрокаталитическая активность электродов с покрытиями, сформированными путем электрохимического осаждения из водного раствора H₂PdCl₄, существенно превышает активность немодифицированного палладиевого электрода в реакции окисления метанола.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Краснодарского края исследовательского проекта № 19-42-235001.

Список литературы

1. Peters T., Caravella A. // Membranes. 2019. V. 9. № 25. P. 1-5.
2. Lytkina A., Orekhova N., Petriev I. et. al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. P. 13310-13322.

3. Qin Y.-L., Zhang X.-B., Wang J. et. al. // J. Mater. Chem. 2012. V. 22. P. 14861-14863.

Номер проекта РФФИ: 19-42-235001 p_Наставник; 2.
№ 19-42-233004 p_мол_a

Определение состава в переменных слоях методом ПЭМ

Снигирев Л. А.¹, Кириленко Д.А.¹, Берг Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: leonidsnigirev17@gmail.com

Полупроводниковые гетероструктуры с изменяющимся элементным составом по толщине эпитаксиальных слоев находят все более широкое применение при создании полупроводниковых приборов [1-3]. Поскольку толщина таких слоев зачастую не превышает 1 мкм, то для анализа распределения в них остаточных деформаций и элементного состава требуются методы с пространственным разрешением не хуже, по крайней мере, 100 нм, среди которых наиболее подходящим является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Среди методов ПЭМ для определения деформаций предложены и применяются дифракция в сходящемся пучке [4-6], анализ геометрической фазы [7-8], нанодифракция [9-10]. Обладая пространственным разрешением на уровне 1-10 нм, эти методы требуют сложной процедуры обработки данных и/или аппаратурной модификации электронного микроскопа.

Ранее для исследования поведения остаточных деформаций в метаморфных слоях *InGaAs* нами была развита методика, основанная на использовании классического режима дифракции электронов с ограниченного участка, размер которого определяется селекторной апертурой [11]. В данной работе эта методика усовершенствована для учета изменения деформированного состояния образца в результате его утонения до толщины, прозрачной для электронного пучка в микроскопе, и применена для определения профиля элементного состава метаморфного слоя *In_xGa_{1-x}As* ($x = 0,05 - 0,8$) толщиной 1 мкм.

В экспериментах использовался электронный микроскоп JEOL JEM2100F с ускоряющим напряжением 200 кВ и пространственным разрешением по точкам 0.23 нм. Для получения картин SADP применялась апертура, ограничивающая на исследуемом образце участок диаметром 100 нм. Образцы утонялись для электронной микроскопии в поперечном сечении по обычной процедуре предварительной механической шлифовки-полировки и финишного ионного распыления.

Профили распределения компонентов деформаций ϵ_{xx} (в плоскости, параллельной поверхности исследуемого слоя) и ϵ_{zz} (вдоль нормали к поверхности) по толщине слоя строились по серии картин SADP, полученных при последовательном перемещении апертуры с шагом 20-30 нм. Определение межплоскостных расстояний в исследуемом слое осуществлялось посредством измерения расстояния до соответствующего рефлекса от центра дифракционной картины с использованием аналогичного расстояния на картине SADP от подложки GaAs в качестве репера. Поскольку при утонении образца для электронно-микроскопических исследований в нем происходит частичная упругая релаксация внутренних напряжений, необходим пересчет измеренных компонентов деформации к их состоянию в исходно массивном образце. Для этого использовалась простая модель, основанная на трансформации изначально двuosных напряжений несоответствия в

одноосные на большей части исследуемого слоя в утоненном образце. В результате оказывается возможным получить уточненные значения компонентов деформации вдоль толщины структуры и определить постоянную кристаллической решётки ненапряженного (свободного) слоя, исходя из обобщённого закона Гука. С использованием известной постоянной решётки свободного слоя восстанавливался профиль индия, который в исследуемом образце оказался близок к корневой зависимости.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Список литературы

1. Choi H., Jeong Y., Cho J., Jeon. M.H., J. Cryst. Growth, vol. 311, 1091, 2009
2. Fitzgerald E.A., Xie Y.H., Green M.L., Brasen D., Kortan A.R., Michel J., Mii Y.J., Weir B.E., Appl. Phys. Lett., vol. 59 (7), 811–813, 1991
3. Solov'ev V.A. et al., Semiconductors. 2018. vol. 52, № 1. P. 120–125.
4. Zuo J.M., Ultramicroscopy, vol. 41, 211, 1992
5. Armigliato A., Balboni R., Carnevale G. P., Pavia G., Piccolo D., Frabboni S., Benedetti A. and Cullis A.G., Appl. Phys. Lett., vol. 82, 2172, 2003
6. Houdellier F., Roucau C., Clerment L., Rouvie`re J.L. and Casanove M.J., Ultramicroscopy, vol. 106, 951, 2006
7. HyÈtch M.J., Putaux J-L. and Pernisson J-M., Nature, vol. 423, 270, 2003
8. Bert N.A., Chaldyshev V.V., Cherkashin N.A., Nevedomskiy V.N., Preobrazhenskii V.V., Putyato M.A., Semyagin B.R., Ushanov V.I., Yagovkina M.A., J. Appl. Phys., vol. 125, 14 Art. No: 145106, 2019
9. Usuda K., Numata T. and Takagi S., Mater. Sci. Semicond. Process., vol. 8, 155, 2005
10. Favia P., Bargallo Gonzales M., Simoen E., Verheyen P., Klenov D. and Bender H., J. Electrochem. Soc., vol. 158, H438, 2011
11. Sorokin S.V. et al., J. Cryst. Growth., vol. 455, 83–89, 2016
12. Baidakova M. V et al., Technical Physics Letters, vol. 42, № 5,464-467, 2016

Углеродные наноструктуры на базе SiC для устройств микро- и наноэлектроники

Резван А. А.¹, Климин В.С.¹, Коц И.Н.¹, Морозова Ю.В.¹, Прокофьева В.В.¹

¹Южный федеральный университет

e-mail: arezvan@sfedu.ru

SiC является перспективным материалом микро- и наноэлектроники, данный материал находит свое применение как в современных МЭМС, так и в силовых элементах. Основная проблема формирования функциональных элементов на основе SiC является низкая производительность существующих технологий и методов обработки. В связи с чем, данная экспериментальная работа направлена на рассмотрение использования комбинации методов фокусированных ионных пучков и плазмохимического травления для получения полевых эмиссионных структур на основе наноразмерного углеродного слоя на поверхности SiC [1-4].

Серия экспериментов проводилась на пластинах SiC, предварительно прошедшего химическую очистку. Данные пластины помещали в вакуумную камеру модуля фокусирующих ионных пучков и ориентировали так, чтобы поток ускоренных ионов попадал на подложку в направлении нормали. Благодаря этому процессу на поверхности исследуемых образцов был сформирован массив из элементов, представляющих собой заостренные катоды.

Наноразмерный углеродный слой был получен методом плазмохимического атомного слоевого травления. SF₆ использовался в качестве фтор-содержащего газа, благодаря чему была получена возможность травления приповерхностного слоя SiC. В то же время их кристаллическая решетка удаляла только Si и образовывала тонкий углеродный слой на поверхности образцов. Для проведения контроля параметров получаемых структур осуществлялся контроль топологии поверхности на каждой итерации при помощи метода сканирующей электронной микроскопии.

По окончании экспериментальной серии была проведена оценка ряда параметров полученных структур. Тем самым было определено, что геометрия массива соответствует заданным параметрам и были получены структуры с глубиной 900 нм и минимальным размером структуры 280 нм. Кроме этого было показано, что эти структуры имеют одинаковые электрические параметры углеродных нанотрубок, однако полученная технология позволяет формировать эмиссионные структуры при более низких температурах и более коротких временах подготовки.

Эта технология может применяться для формирования современных вакуумных микроэлектронных устройств, а также для формирования датчиков давления и газа.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МК-3512.2019.8. Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. Murdick D A, Wadley H N G and Zhou X W Phys. Rev. B 75 125318 (2007)
2. Amrani A, Djafari Rouhani M and Mraoufel A Appl. Nanosci. 1 59 (2011)
3. Kley A, Ruggerone P and Scheffler M Phys. Rev. Lett. 79 5278 (1997)
4. D.G. Deppe et al, Appl. Phys. Lett. 56, 315 (1990)

Получение тонких плёнок сплавов кремний-вольфрам совместным магнетронным распылением однокомпонентных мишеней

*Сердобинцев А. А.¹, Стародубов А.В.^{1,2}, Кожевников И.О.¹, Павлов А.М.¹, Галушка В.В.¹,
Рыскин Н.М.^{2,1}*

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского, ²СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
e-mail: alexas80@bk.ru

В последние годы существенно возрос интерес к направлению исследований, связанному с использованием метаматериалов в вакуумной электронике СВЧ, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов [1]. Метаматериалы — это искусственно созданные среды, построенные из специальным образом сформированных микро- и наноразмерных

структур, которые имеют электромагнитные свойства, отличающиеся от любых веществ естественного происхождения. Наиболее яркая отличительная черта метаматериалов в том, что они могут характеризоваться (как одновременно, так и раздельно) отрицательными величинами электрической и магнитной проницаемости. В работе [2] предложено использовать диэлектрические подложки с метаматериалом для ЛБВ планарной геометрии (с ленточным электронным пучком). В качестве преимуществ указанного подхода авторы выделяют увеличение коэффициента связи (более чем на 50%), а также уменьшение затухания (более чем на 20%) в меандровой линии по сравнению с планарной замедляющей системой без метаматериала. В работе [3] предложено использовать поглотитель электромагнитных волн на основе метаматериала. Очевидно, что для устройств вакуумной микроэлектроники предпочтительно использовать материалы, которые характеризуются стойкостью к высоким температурам. Представляется перспективным исследование способов формирования метаматериалов из элементов, созданных на основе термостойких сплавов. Кроме того, исследование возможности управления электрофизическими свойствами (в первую очередь, проводимостью) таких сплавов также представляет интерес, так как это позволит управлять свойствами метаматериала в целом.

Одним из возможных кандидатов на роль термостойких сплавов с управляемой проводимостью представляются сплавы вольфрама и кремния. Кроме того, сплавы Si-W представляют интерес для формирования отрицательных электродов литий-ионных батарей из-за своей высокой ёмкости и повышенной устойчивости [4]. Также к их достоинствам можно отнести стойкость к высоким температурам, что существенно расширяет возможности их обработки и модифицирования [5].

В настоящей работе представлены результаты исследований по формированию тонких плёнок сплавов Si-W методом магнетронного распыления при одновременной работе двух магнетронных источников. В качестве рабочего газа использовался аргон, температура подложки поддерживалась на уровне 200 °С в процессе напыления. Варьируемым параметром являлась мощность магнетрона с вольфрамовой мишенью при постоянной мощности магнетрона с кремниевой мишенью (500 Вт). Была получена серия из пяти образцов на подложках из предметного стекла и кварца. Мощность вольфрамового источника изменялась от 22 Вт до 70 Вт с шагом 12 Вт. Полученные плёнки обнаруживают хорошую адгезию к стеклу и кварцу. Сопротивление полученных образцов составило от 1 кОм до 220 кОм, при этом зависимость сопротивления от мощности вольфрамового магнетрона имеет сильно нелинейный характер. Таким образом, методика совместного магнетронного распыления кремниевой и вольфрамовой мишеней даёт возможность эффективно управлять электрической проводимостью получаемых тонких плёнок. Кроме того, совместное магнетронное распыление позволяет получать пленки термостойких сплавов различного состава без использования высоких температур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-07-00929.

Список литературы

1. G. Shvets. Plenary Talk: Applications of electromagnetic metamaterials to vacuum electronics devices and advanced accelerators, IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, CA, 2014, pp. 3-3.
2. Bai, N., Shen, M., & Sun, X. Investigation of Microstrip Meander-Line Traveling-Wave Tube Using EBG Ground Plane. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(5), 1622–1627.
3. Bai, N., Feng, C., Liu, Y., Fan, H., Shen, C., & Sun, X. Integrated Microstrip Meander Line Traveling Wave Tube Based on Metamaterial Absorber. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(7), 2949–2954.

4. Hyun-seung Kim, Jongjung Kim, Jae Gil Lee, Ji Heon Ryu, Jaekwang Kim, Seung M. Oh, Songhun Yoon. Novel silicon–tungsten oxide–carbon composite as advanced negative electrode for lithium-ion batteries. *Solid State Ionics*, 2018, 314, 41-45.
5. Yijia Liu, J. Craig Bennett, and M. N. Obrovac. Ball Milled Si-W Alloys: Part II. Thermal Behavior and Performance in Li Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 2019, 166 (13), A2791-A2796.

Высокотемпературная ползучесть титана в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях

Нарыкова М. В.¹, Кадомцев А.Г., Бетехтин В.И., Токмачева-Колобова А.Ю.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Maria.Narykova@mail.ioffe.ru

Известно [1], что начиная с некоторых температур в металлических материалах с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой начинается процесс укрупнения зерен и, соответственно, меняются механические характеристики. Нами была поставлена задача провести высокотемпературные испытания на ползучесть в таком температурно-силовом диапазоне, где процессом рекристаллизации зерен можно было пренебречь. Одной из важных задач исследования являлась возможность сравнить особенности процессов ползучести для крупнозернистого (КЗ) и УМЗ состояний технически чистого титана ВТ1-0.

УМЗ состояние в образцах технически чистого титана марки ВТ1-0 было сформировано по оригинальной технологии путем сочетания поперечно-винтовой прокатки с продольной сортовой прокаткой [2] – в виде прутков диаметром 8 мм и длиной не менее 500 мм. Размер зерен для УМЗ состояния составлял около 190 nm. Однородная рекристаллизованная структура ВТ1-0 была получена из УМЗ структуры выдержкой при $T=550$ °С в течении одного часа, размер зерне для КЗ состояния составлял 2,35 μm . Для определения температурных режимов испытания образцов титана ВТ1-0 были дополнительно проведены детальные исследования устойчивости структуры материала при нагреве в интервале температур 150-700°С длительностью от 1 до 1000 часов. Анализ всех полученных данных позволил с достаточной точностью определить, что оптимальная температура испытания для титана ВТ1-0 (УМЗ состояние) близка к 350°С, если время испытания не превышает несколько сотен часов. Отметим, что изменения структуры титана в крупнозернистом состоянии не изменяется в существенно большем температурном интервале. Фазовый состав в УМЗ состоянии и после всех отжигов представлен одной фазой – α -титан. С увеличением температуры и длительности отжигов в УМЗ ВТ1-0 существует тенденция снижения уровня микронапряжений. Установлено, что в исходном состоянии после прокатки и отжига 350°С, 3 ч в материале присутствует неярко выраженная текстура – наблюдается преимущественная ориентировка зерен в плоскости (100). Небольшое снижение уровня внутренних напряжений, обнаруживаемое по данным рентгеноструктурных исследований, по-видимому, связано с уменьшением локальных микронапряжений на границах зерен. Последнее обнаруживается по изменению контраста границ зерен после длительных отжигов.

Основная часть испытаний при растяжении в режиме ползучести была проведена при температуре 350°C. Время испытания варьировалось от нескольких секунд до нескольких суток. Обработка полученных данных позволила получить значения энергии активации процесса разрушения как для КЗ, так и для УМЗ. Оказалось, что эти энергии существенно различны: для КЗ состояния – 100 kcal/mol, а для УМЗ – 80 kcal/mol, то есть энергия активации процесса разрушения УМЗ титана ниже, чем у КЗ.

Установлено, что в условиях ползучести при 350 °С в течение 44 часов исходного рекристаллизованного КЗ титана VT1-0 происходит измельчение зеренной структуры вблизи поверхности разрушения, вплоть до субмикрорекристаллического масштаба (размер зерен находится в интервале 100-200 nm, при исходном размере зерен порядка 2 мкм). При этом форма зерен в указанных областях близка к глобулярной. На удалении от поверхности разрушения более 3 мкм, форма зерен становится вытянутой.

В ультрамелкозернистом состоянии имеет место аналогичная, но менее выраженная картина. На расстоянии 2 мкм от поверхности разрушения морфология зерен изменяется с глобулярной на пластинчатую, как и в рекристаллизованном крупнозернистом состоянии. Судя по изгибным экстинкционным контурам имеет место внутренние напряжения в кристаллической решетке материала.

Выявлены критические параметры дефектной структуры, соответствующие переходу к макроразрушению при ползучести. В случае ползучести как КЗ и УМЗ материалов важнейшим критическим параметром перехода к макроразрушению оказалось достижение в зоне разрушения суммарного объема микротрещин и микропор порядка 1%.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00221).

Список литературы

1. Andrievski R.A., Glezer A.M. Size effects in properties of nanomaterials // Scripta Materialia. – 2001. – Т. 44. – № 8-9. – pp. 1621-1624.
2. Иванов М.Б., Пенкин А.В., Колобов Ю.Р., Голосов Е.В., Нечаенко Д. А. Теплая поперечно-винтовая прокатка в волках конической формы как метод интенсивной пластической деформации// Деформация и разрушение материалов. – 2010. – №9. – С. 13-18.

Номер проекта РФФИ: 19-12-00221

Исследования режимов формирования нанокристаллических плёнок ZnO:Ga методом магнетронного распыления

Гелдаш А.А.¹, Левенец Л.Э.¹, Гусев Е.Ю.¹, Джуплин В.Н.², Агеев О.А.^{1,2}

¹ЮФУ

²НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ

e-mail: andrewgeldash@gmail.com

Магнетронное распыление является одним из наиболее перспективных и широко применяемых методов формирования тонких нанокристаллических плёнок различных материалов для применений в микро- и нанoeлектронике [1]. Сама технология основывается на нанесении тонкой плёнки на подложку с помощью катодного распыления мишени в плазме магнетронного разряда – диодного разряда в скрещенных полях [2].

Основной целью данной работы было исследование режимов формирования тонких нанокристаллических плёнок ZnO:Ga методом магнетронного распыления на постоянном токе. Основной задачей исследования было получение тонких прозрачных проводящих плёнок со значением удельного сопротивления менее $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см, которые применимы в качестве контактов для наноструктур фоточувствительных элементов. Выбор ZnO:Ga обусловлен подходящими электрофизическими и оптическими свойствами этого материала [3, 4]. Однако свойства тонкой плёнки, особенно при толщинах порядка нескольких десятков нанометров, могут отличаться от свойств массивного материала [1].

Выявлено, что при увеличении мощности источника постоянного напряжения с 100 Вт до 170 Вт толщина пленки ZnO:Ga увеличивается с 350 нм до 800 нм, удельное сопротивление плёнок уменьшалось с $1,303 \cdot 10^{-2}$ Ом·см до $3,851 \cdot 10^{-3}$ Ом·см, подвижность носителей заряда увеличивалась с $3,23 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ до $6,53 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, концентрация носителей заряда увеличивалась с $1,57 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до $2,48 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Так же было выявлено, что при увеличении толщины плёнки, диаметр зёрен на её поверхности увеличивался с 50-80 нм до 150-250 нм, что в дальнейшем обуславливает увеличение коэффициента преломления плёнки.

Полученные нанокристаллические плёнки ZnO:Ga, могут быть использованы в качестве прозрачных контактных слоёв к различным наноструктурам. Применение нанокристаллических плёнок ZnO:Ga является альтернативой использования тонких плёнок ИТО в качестве высокотемпературных контактных слоёв.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-37-90139, № 19-38-60052, № 18-28-11019 МК. Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. Агеев О.А., Коноплев Б.Г. и др., Нанотехнологии в микроэлектронике, М. Наука, 177-192, 2019;
2. Kelly, P.J., Arnell, R.D., Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, Vacuum, 56, 159-172, 2000;
3. K. Ellmer, Magnetron sputtering of transparent conductive zinc oxide: relation between the sputtering parameters and the electronic properties, J. Appl. Phys., 33, 17, 2000;

Номер проекта РФФИ: 19-37-90139; 19-38-60052; 18-28-11019 МК.

Исследование спектров комбинационного рассеяния света в нанокристаллическом материале, полученном методом импульсного лазерного осаждения

Елисеев И. А.¹, Смирнов А.Н.¹, Давыдов В.Ю.¹, Платонов А.В.¹, Явсин Д.А.¹, Гуревич С.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: zoid95@yandex.ru

Пленки, сформированные из наночастиц углерода на различных подложках, в течение последних десятилетий являются предметом активного изучения, так как они находят

применение в широком спектре различных приборов: суперконденсаторов, сенсоров, топливных элементов, аккумуляторов и т.д. [1]. К основным методикам, позволяющим получать такие пленки, относятся катодно-дуговое осаждение, магнетронное распыление при высоком давлении [2], сверхзвуковое кластерное пучковое осаждение и импульсное лазерное осаждение (ИЛО) [3]. Целью данной работы было определение микроструктуры наноуглеродного материала, изготовленного методом ИЛО, перспективного для использования в качестве электродного материала в суперконденсаторах [4]. Для диагностики пленок использовался метод спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

Основными структурными параметрами пленок, определяемыми методом спектроскопии КРС, являются средний размер кристаллитов, доля sp^3 -связей и содержание примесей. Для определения этих параметров было проведено моделирование экспериментально измеренных спектров КРС в области $1000\text{-}1700\text{ см}^{-1}$ с использованием четырех компонент: G ($\sim 1580\text{ см}^{-1}$), D ($\sim 1350\text{ см}^{-1}$), $D3$ ($\sim 1500\text{ см}^{-1}$) и $D4$ ($\sim 1200\text{ см}^{-1}$). На основе анализа интенсивности, ширины и положения данных компонент с использованием подхода "аморфизационной траектории" [5] были сделаны выводы о типе микроструктуры (стадии аморфизации) данных пленок и о преобладающем типе гибридизации в связях углерод-углерод. Средний размер кристаллитов определялся с использованием соотношений, приводимых в литературе для соответствующего типа материала [5, 6].

Согласно данным спектроскопии КРС, в зависимости от типа микроструктуры образцы разделились на две категории. Образцы из первой категории представляли собой пленки, состоящие из наночастиц графита с размерами от 5.5 до 12 нм [6]. Образцы, относящиеся ко второй категории, представляли собой переходный материал между нанокристаллическим графитом и так называемым аморфным sp^2 -углеродом ($a\text{-C}$ [5]). Следует отметить, что $a\text{-C}$ отличается от нанокристаллического графита преобладанием в кристаллической решетке топологического беспорядка, а именно присутствием пятиугольных и семиугольных углеродных колец, а также большим количеством оборванных связей. Средний размер кристаллитов в образцах второй категории составлял порядка 4-5 нм [5].

Таким образом, с использованием данных спектроскопии КРС была проанализирована структура образцов, сформированных из наночастиц углерода, полученных методом ИЛО при различных условиях. Было показано, что все образцы представляют собой углерод с абсолютным преобладанием sp^2 -гибридизации, при этом образцы из первой категории представляют собой нанокристаллический графит, а образцы второй категории, выращенные на конечном этапе оптимизации технологических параметров, представляют собой переходный материал между нанокристаллическим графитом и $a\text{-C}$. Кроме того, был оценен средний размер кристаллитов в исследуемых образцах с учетом стадии аморфизации, на которой они находятся. Полученные результаты помогли связать структурные параметры с электрическими характеристиками пленок и выявить технологические условия, необходимые для синтеза наноуглеродных пленок с наилучшими характеристиками для использования в качестве электродного материала в суперконденсаторах.

Список литературы

1. Ferrari A.C., Robertson J., Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 362, 2477, 2004
2. Виноградов А.Я., Грудинкин С.А., Беседина Н.А. и др., Структура и свойства полученных методом магнетронного распыления тонких графитоподобных пленок, *ЖТФ*, том. 52, 775, 2018
3. Voevodin A.A., Donley M.S., *Surf. Coatings Technol.*, Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition: A critical review, vol. 82, 199, 1996

4. Гуревич С.А., Горохов М.В., Кожевин В.М. и др., Формирование аморфных наночастиц углерода методом лазерного электродиспергирования, Письма в ЖТФ, том 44, 57, 2018
5. Ferrari A.C., Robertson J., Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, Phys. Rev. B., vol. 61, 14095, 2000
6. Saççado L.G., Takai K., Enoki T. et al, General equation for the determination of the crystallite size L_a of nanographite by Raman spectroscopy, Appl. Phys. Lett., vol. 88, 1, 2006

Формирование КНН в зависимости от топологии плёнки металла-катализатора в процессе металл-стимулированного химического травления с-Si

Ермина А. А.^{1,2}, Жарова Ю.А.², Большаков В. О.^{1,2}, Толмачёв В.А.²

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: annaermina97@gmail.com

Проведено исследование МСХТ кремния для создания слоев разупорядоченных кремниевых нанонитей (КНН). Установлены условия и режимы для получения слоев на обеих стадиях реализуемой технологии, которые включают (1) химическое осаждение на подложке Si массива самоорганизующихся наночастиц Ag в качестве маски-катализатора и (2) химическое травление КНН на различную глубину от 110 до 470 нм [1].

Изучены оптические свойства и морфология плёнки металла-катализатора (Ag) в зависимости от времени осаждения и концентрации раствора. Так как топология и рост КНН в процессе МСХТ зависят от состояния плёнки серебра, поэтому можно прогнозировать получение кремниевых наноструктур уже на начальном этапе процесса МСХТ [2].

Для характеристики образцов на всех стадиях МСХТ применена спектральная эллипсометрия, с помощью которой при использовании двух подходов обработки измеренных данных (эллипсометрических углов): определение диэлектрических функций (первый подход) [2]. В расчетных спектрах мнимой части диэлектрической функции (ϵ_2) для толщин Ag слоев от 5 до 60 нм формируется пик объемного плазмонного резонанса, возникающий в продольной моде, которая распространяется вдоль плоскости подложки. Во втором подходе производились расчеты толщины и параметров фракций композитных слоев в многослойной модели с помощью аппроксимации эффективной среды Максвелла Гарнетта и Бруггемана для двухкомпонентных слоев.

Образцы с наночастицами серебра с разной морфологией были исследованы с помощью спектрофотометрии на отражение в диапазоне длин волн от 200 до 600 нм для угла наклона света близкого к нормальному ($\sim 9^\circ$). Следует отметить, что наблюдаемые в расчетах и экспериментально с помощью эллипсометрии при наклонных углах падения проявления объемного плазмона на представленных спектрах отражательной спектрофотометрии не обнаружены, что объясняется отсутствием продольной моды в слоях при нормальном падении света на образец.

Исследование процесса металл-стимулированного химического травления (МСХТ) кремния и получаемых на его основе вертикальных нитеобразных наноструктур на

поверхности монокристаллического кремния является основой для создания композитных наноструктур путем осаждения в них наночастиц Ag с плазмонными эффектами. Полученные результаты показали, что композитные структуры Ag-Si являются перспективными для получения плазмонных эффектов как в видимой, так и в ИК области спектра.

Список литературы

1. H. Han, Z. Huang, W. Lee, Metal-assisted chemical etching of silicon and nanotechnology applications. *Nanotoday* 2014, 9, 271
2. Zharova Yu., Ermina A., Tolmachev V., Pavlov S., Koshtyal Yu. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. Vol. 216. No. 17. (2019)
3. V.A. Shvets et al. Ellipsometry as a high-precision technique for subnanometer-resolved monitoring of thin-film structures. *Nanotechnologies in Russia*, Vol. 4, Nos. 3–4, pp. 201–214 (2009)

Численное моделирование текстурированного электрода из углеродных нанотрубок

Митин Д.М.^{1,2}, Воробьев А.А.², Раудик С.А.², Можаров А.М.², Мухин И.С.²

¹СПбПУ

²СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

e-mail: mitindm@mail.ru

Развитие оптоэлектронных устройств ставит новые задачи по созданию прозрачных проводящих электродов. Прозрачные электроды находят применение в солнечных элементах, фото- и светоизлучающих диодах, сенсорных дисплеях, «умных» окнах и др. Высокое оптическое пропускание, низкое электрическое сопротивление и гибкость – главные критерии, которые предъявляются к таким электродам.

В настоящее время наиболее широко используемыми прозрачными электродами являются проводящие оксиды, в частности, оксид индия и олова (ITO). ITO отличается низким удельным сопротивлением, высоким коэффициентом пропускания в видимом спектре (14 Ом/кв при прозрачности 86 %) [1]. Однако для достижения низкого сопротивления необходим высокотемпературный отжиг ITO. Кроме того, ITO хрупок и обладает плохими механическими свойствами, что существенно ограничивает его применение, особенно в гибких приложениях.

В качестве замены ITO можно использовать углеродные нанотрубки (УНТ). УНТ обладают высоким коэффициентом оптического пропускания в широком диапазоне от видимого до ближнего инфракрасного диапазона, а также низким сопротивлением [2–5]. Механическая упругость УНТ обеспечивает возможность создания гибких устройств [6].

На сегодняшний день сопротивление и пропускание УНТ еще не сопоставимы с таковыми у ITO (40 Ом/кв при прозрачности 90%) [7]. Следовательно, крайне важно исследовать возможности улучшения характеристик УНТ-электродов. Как правило, увеличение коэффициента пропускания слоя достигается за счет увеличения его сопротивления и наоборот. Одним из способов улучшения свойств прозрачного электрода является текстурирование, иными словами, формирование прозрачных окон в сплошном слое УНТ. Текстурированный рисунок на поверхности УНТ повысит прозрачность имеющегося слоя, что позволит уменьшить оптические потери без значимого ухудшения физико-

электрических характеристик электрода. Таким образом, создание текстуры на поверхности УНТ позволит найти оптимум между необходимой проводимостью и прозрачностью УНТ. На сегодняшний день имеется весьма ограниченное количество сведений касательно текстурирования одностенных УНТ.

Основной задачей работы являлось выявление зависимости сопротивления (R_{etch}) и оптического пропускания (T_{etch}) текстурированного электрода от формы ячеек и исходного сопротивления сплошного слоя. В рамках моделирования были рассмотрены 3 вида формы ячейки, формирующей текстурированный слой, – треугольник, квадрат и шестиугольник. Размеры ячеек (период, ширина полоска) выбирались таким образом, чтобы геометрическая прозрачность текстурированного слоя T_{etch} , то есть отношение площадей вытравленной и невытравленной области, была одинаковой для ячеек каждой формы. Величина T_{etch} была выбрана равной 95%, что соответствует типичной прозрачности металлической контактной сетки, используемой в фотоэлектрических преобразователях. Исходные значения R_{base} и T_{base} для сплошного слоя УНТ были взяты из работы [7], где приведены рекордные значения сопротивления и пропускания УНТ.

Для расчета сопротивления электрода рассматривался сегмент, соответствующий текстурированному слою УНТ размером 2.5×2.5 мм. К противоположным сторонам сегмента прикладывалось напряжение 1В. В результате численного решения уравнений Пуассона и непрерывности были получены значения токов, протекающих в данном сегменте. Сопротивление электрода рассчитывалось из полученных значений токов для ячеек различной формы. Было показано, что сопротивление текстурированного электрода не зависит от формы ячейки.

Для достижения максимальной проводимости текстурированного электрода для его изготовления необходимо использовать УНТ с наименьшим базовым пропусканием. Сопротивление сплошного электрода из сплошного слоя УНТ с прозрачностью 95% составляет 72 Ом/кв, в то время, как сопротивление текстурированного УНТ электрода с той же прозрачностью достигает значений на 20% ниже.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60008.

Список литературы

1. Maniyara R.A., Mkhitarian V.K., Chen T.L., Ghosh D.S., Pruneri V. An antireflection transparent conductor with ultralow optical loss (<2 %) and electrical resistance (<6 Ω sq⁻¹) // *Nat. Commun.* 2016. V. 7, № 1. P. 13771.
2. van de Lagemaat J., Barnes T.M., Rumbles G., Shaheen S.E., Coutts T.J., Weeks C., Levitsky I., Peltola J., Glatkowski P. Organic solar cells with carbon nanotubes replacing In₂O₃:Sn as the transparent electrode // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88, № 23. P. 233503.
3. Wu Z. Transparent, Conductive Carbon Nanotube Films // *Science* (80-). 2004. V. 305, № 5688. P. 1273–1276.
4. Lee Y.H., Kim S.G., Tománek D. Catalytic Growth of Single-Wall Carbon Nanotubes: An Ab Initio Study // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 78, № 12. P. 2393–2396.
5. Nasibulin A.G., Kaskela A., Mustonen K., Anisimov A.S., Ruiz V., Kivistö S., Rackauskas S., Timmermans M.Y., Pudas M., Aitchison B., Kauppinen M., Brown D.P., Okhotnikov O.G., Kauppinen E.I. Multifunctional Free-Standing Single-Walled Carbon Nanotube Films // *ACS Nano*. 2011. V. 5, № 4. P. 3214–3221.
6. Gilshteyn E.P., Lin S., Kondrashov V.A., Kopylova D.S., Tsapenko A.P., Anisimov A.S., Hart A.J., Zhao X., Nasibulin A.G. A One-Step Method of Hydrogel Modification by Single-Walled Carbon Nanotubes for Highly Stretchable and Transparent Electronics // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018. V. 10, № 33. P. 28069–28075.

7. Tsapenko A.P., Goldt A.E., Shulga E., Popov Z.I., Maslakov K.I., Anisimov A.S., Sorokin P.B., Nasibulin A.G. Highly conductive and transparent films of HAuCl₄-doped single-walled carbon nanotubes for flexible applications // Carbon N. Y. 2018. V. 130. P. 448–457.

Номер проекта РФФИ: 19-38-60008

Исследование влияния модуля Юнга поликристаллического кремния на статические и динамические характеристики элементов микромеханических акселерометров

Житяева Ю. Ю.¹, Гусев Е.Ю.², Агеев О.А.^{1,2}

¹ НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ

² ЮФУ

e-mail: zhityaeva@sfnedu.ru

Одним из перспективных направлений развития современной техники является создание надежных инерционных датчиков, в частности микро- и наномеханических акселерометров, с минимальными размерами и улучшенными функциональными характеристиками [1, 2]. В технологии поверхностной микрообработки в качестве структурных слоев широкое распространение получили пленки поликристаллического кремния благодаря своим электрическим и механическим свойствам. Однако, из-за высокой чувствительности структуры поликристаллического кремния к технологическим параметрам процесса осаждения, механические свойства, в частности модуль Юнга, могут отличаться от стандартных значений [1]. В связи с постоянным уменьшением габаритных размеров микромеханических элементов, это может влиять на их чувствительность и надежность. Таким образом определение влияния изменения механических свойств материала пленок структурных слоев на функциональные характеристики чувствительных элементов инерционных датчиков является актуальной задачей.

Целью данной работы является оценка влияния изменения модуля Юнга пленок поликристаллического кремния на характеристики чувствительного элемента трёхосевого микромеханического акселерометра емкостного типа методом численного моделирования.

В работе проведены расчеты отклонения и резонансной частоты чувствительного элемента микромеханического акселерометра. Для этого была разработана параметрическая модель конструкции акселерометра, диапазоном ускорения в пределах ± 10 g, представленной в работе [2]. Чувствительный элемент из поликристаллического кремния включает в себя инерционную массу квадратной формы, подвешенную с четырех сторон с помощью упругих подвесов, и системы электродов встречно-штыревого типа. Значение модуля Юнга пленок поликристаллического кремния варьировалось в диапазоне от 120 до 250 ГПа. Выбор столь широкого интервала обоснован экспериментальными данными работ по исследованию свойств пленок поликристаллического кремния, полученного методом плазмохимического осаждения из газовой фазы [3]. При этом толщина пленок поликристаллического кремния варьировалась от 1 до 6 мкм.

Определена зависимость отклонения инерционной массы и электродов от значения модуля Юнга при ускорении от 1 до 10 g. Определены закономерности влияния изменения модуля Юнга приводит на смещение резонансных частот, отклонения, а также чувствительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-11019 МК) с использованием оборудования научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. French P.J., Polysilicon: a versatile materials for microsystem, Sensors and Actuators A: Physical, V. 99 (1-2), 3-12, (2002).
2. Нанотехнологии в микроэлектронике, под ред. О.А. Агеева, Б.Г. Коноплева, М.: Наука, 511 с, (2019).
3. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ilina M.V., Bykov A.V., Grain size and doping effect on structure and electromechanical properties of polycrystalline silicon for MEMS applications, Journal of Physics: Conference Series, V. 741(1), 012001, (2016).

Номер проекта РФФИ: 18-29-11019 МК

Рост нанопроволок Ga (In) AsP с помощью Sn из паровой фазы в квазизамкнутом объеме

Карлина Л. Б.¹, Vlasov A.S.¹, Soshnikov I.P.^{1,2,3}, Smirnova I.P.¹, Levin A.A.¹ Boiko M.E.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Академический университет им. Ж.И. Алферова

³Институт аналитического приборостроения

e-mail: karlin@mail.ioffe.ru

Нитевидные наноструктуры(ННК) представляют значительный интерес для современной электроники. Выращивание ННК с использованием альтернативных золоту катализаторов, обусловлено необходимостью получения материала, не содержащего золота в качестве примеси, которая может приводить к неконтролируемому появлению дефектов с глубокими уровнями в выращенных структурах [1, 2].

Впервые проведены экспериментальные исследования каталитического роста наноструктур согласно механизму пар- жидкость – твёрдое на поверхности GaAs(100) активированной оловом в квазиравновесных условиях в квазизамкнутом объёме из насыщенных паров источников Sn-GaP и Sn-InP [3].

Экспериментально изучено влияние температуры роста и экспозиции процесса на характер морфологии полученных структур в диапазон температур 550-590⁰С. Продемонстрировано формирование нитевидных нанокристаллов в изучаемых условиях.

Рентгеноструктурные измерения, проведенные на дифрактометре BRUKER D2 показали, что все, выращенные на поверхности GaAs (100) ННК твердых растворов GaInAsP, преимущественно имеют структуру типа сфалерит. Определены основные параметры решетки фаз твердых растворов и характерные размеры нанокристаллитов.

Исследования поверхностной морфологии методом растровой электронной микроскопии показывают присутствие как латеральных, так и вертикальных ННК различной высоты и диаметра. Анализ размеров ННК указывает на преимущественно диффузионный тип механизма роста [4].

Спектры Рамановского рассеяния демонстрируют присутствие четырех фононных мод, соответствующих колебаниям связи Ga-P, In-P, Ga-As, и In-As. Анализ спектров Рамановского рассеяния позволяет сделать оценку содержания фосфора в ННК на уровне

70%. Отсутствие ярко выраженного фонон-плазмонного взаимодействия в спектрах рассеяния свидетельствует об относительно невысоком уровне легирования полученных ННК, несмотря на использование олова в качестве катализатора роста.

Характер роста, структурные и оптоэлектронные свойства, синтезированных ННК сравниваются с аналогичными материалами, полученными с Au катализатором.

Результаты проведенных исследований показывают, что Sn является перспективным материалом для ряда применений в производстве солнечных фотопреобразователей.

Рентгенодифракционные исследования выполнены на оборудовании федерального ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Список литературы

1. Sudarat Lee, Wen Wen, Quintin Cheek, Stephen Maldonado *Journal of Crystal Growth* 482 (2018) 36–43
2. A. Fontcuberta i Morral *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* · September 2011, 1-10
3. Карлина, ЛБ; Власов, АС; Шварц, МЗ; Сошников, ИП; Смирнова, ИП; Комисаренко, ФЭ; Анкудинов, АВ 2019, ФТП, т.53, 12, : 1714-1717
4. Dubrovskii, VG; Cirilin, GE; Soshnikov, IP; Tonkikh, AA; Sibirev, NV; Samsonenko, YB; Ustinov, VM 2005, *Phys. Rev. B*, v. 71, 20

Эпитаксиальный рост GaAs на Si(001) с аморфизированными участками

Ерёменко М. М.¹, Балакирев С.В.¹, Солодовник М.С.¹, Черненко Н.Е.¹, Агеев О.А.¹

¹ИНЭП ЮФУ

e-mail: mmeremenko@gmail.com

Получение высококачественных светоизлучающих структур III/V на кремнии является одной из важных современных проблем оптоэлектроники и нанофотоники [1]. Однако для качественного эпитаксиального роста материалов III/V на Si подложках необходимо решить ряд существенных проблем, включающих рассогласование решеток, различные коэффициенты теплового расширения и рост полярного полупроводника III/V на неполярном Si, которые вызывают образование различных типов дефектов, таких как пронизывающие дислокации, микротермические трещины и антифазные домены. Несмотря на то, что для улучшения структурных и функциональных характеристик оптических компонентов III/V на Si используется широкий спектр методов [1-3], требуются совершенно новые подходы для снижения дефектности получаемых структур.

В данной работе было исследовано влияние дозы Ga, имплантированного в Si, и на основе изображений, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, была рассчитана степень заполнения областей для выявления оптимальных параметров поверхностной аморфизации. Экспериментальные образцы были получены с использованием системы молекулярно-лучевой эпитаксии SemiTEq STE 35. Исследования проводились на подложках Si(001) с аморфными участками. Аморфизацию осуществляли имплантацией атомов Ga в Si методом фокусированных ионных пучков. Удаление собственного

окисла с поверхности Si проводилось при 900°C в течение 30 минут [2]. Затем был нанесен высокотемпературный (600°C) буферный слой GaAs.

Выявлено, что осаждение GaAs происходит в основном на аморфизованных областях. При минимальной дозе имплантации Ga, равной 1 пКл/мкм², осаждение GaAs на аморфизованных участках происходит в виде отдельных кристаллитов. Увеличение дозы имплантации приводит к срачиванию кристаллитов GaAs и дальнейшему заполнению областей. При дозах 1, 3, 7, 21 пКл/мкм² степень заполнения аморфизованных участков составила 67, 91, 99 и 95% соответственно.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-477.2019.8. Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. Tang M. et al., Integration of III-V lasers on Si for Si photonics, Prog. Quant. Electron., vol. 66, 1–18, 2019
2. S. Chen et al., Electrically pumped continuous-wave III–V quantum dot lasers on silicon, Nature Photon, vol. 10, 307–311, 2016
3. Y Wan et al., Appl. Phys. Lett., 107, 081106 (2015)

Интеркалирование графена, выращенного на карбиде кремния, атомами железа и кобальта

Гребенюк Г.С.¹, Лобанова Е.Ю.², Пронин И.И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: georgijmail@gmail.com

Графен, представляющий собой монослой графита, благодаря своим уникальным свойствам и огромному потенциалу практических приложений стал в последние годы объектом обширных исследований. Его часто рассматривают как основу будущей нанoeлектроники и спинтроники и считают кандидатом на замену кремния в интегральных микросхемах. Перспектива интеграции графена в различные устройства сильно зависит от способности синтезировать и модифицировать графен на подходящей подложке, которая не будет ухудшать его электронные, оптические и термические свойства [1]. Эпитаксиальный рост на карбиде кремния дает возможность формирования высококачественного графена на полупроводниковой подложке, который впоследствии может быть использован для применения в различных областях [1, 2]. Дальнейший прогресс требует усовершенствования методов получения графена, управления его электронной структурой и систематического изучения его свойств. Одним из подходов для решения данных проблем является модификация графена посредством его контакта с ферромагнитными материалами. В качестве ферромагнетиков в работе были использованы сверхтонкие (менее 2 нм) пленки железа и кобальта, которые были сформированы с помощью интеркаляции графена атомами Fe и Co. Формирование и исследование указанных графеновых наноструктур имеет фундаментальную значимость для контролируемой модификации электронного строения и магнитных свойств графена.

Эксперименты были проведены в условиях сверхвысокого вакуума на российско-германской линии синхротронного излучения в Берлине (BESSY II). В качестве образцов использовались пластины 4H-SiC(0001), покрытые однослойным графеном и аттестованные по методике, описанной в работе [3]. Кроме того, между графеном и подложкой находится буферный слой атомов углерода, который также влияет на свойства графена. На первой стадии эксперимента образцы подвергались очистке путем прогрева при температуре 500°C. Интеркалирование графена атомами железа, и кобальта проводилось путем нанесения на поверхность образцов тонких пленок этих материалов при комнатной или повышенной температурах и последующего их отжига в течение 10 min. В экспериментах был использован комплекс современных методов анализа поверхности, который включал дифракцию медленных электронов, фотоэлектронную спектроскопию высокого разрешения с использованием синхротронного излучения и магнитный линейный дихроизм для характеристики магнитных свойств сформированных структур.

Интеркалирование нанесенных на графен слоев железа начиналось после отжига образцов при температурах выше 350°C. При этом обнаружено, что интеркалированные атомы Fe локализуются не только между графеном и буферным слоем, покрывающим SiC, но и под самим буферным слоем. Оптимальные условия интеркалирования реализуются в диапазоне 400–500°C, т.к. при более высоких температурах система становится нестабильной из-за химического взаимодействия интеркалированного железа с карбидом кремния. Отжиг пленок Co, напыленных на графен при комнатной температуре, в отличие от пленок Fe, не приводит к интеркалированию графена кобальтом. Формирование интеркаляционной системы графен–кобальт–SiC обнаружено при нанесении атомов Co на образцы, нагретые до температур выше 400°C. Этим способом под графеном сформированы пленки кобальта толщиной до 2 nm и показано, что они намагничиваются вдоль поверхности при толщинах более 1.3 nm. Атомы кобальта при этом локализуются между буферным слоем и подложкой, что приводит к трансформации буферного слоя и образованию на поверхности SiC двухслойного графена. Обнаружено, что интеркалирование графена кобальтом сопровождается химическим взаимодействием атомов Co с карбидом кремния, приводящим к синтезу силицидов кобальта. При температурах более 500°C рост пленок кобальта под графеном лимитируется диффузией атомов Co в объем карбида кремния.

Авторы выражают признательность В.Ю. Давыдову, И.А. Елисееву, С.П. Лебедеву и А.А. Лебедеву за возможность использования изготовленных и аттестованных ими образцов.

Список литературы

1. M. Beshkova, L. Hultman, R. Yakimova, Vacuum 128 (2016) 186-197
2. K. Emtsev, A. Bostwick, K. Horn, et al., Nat. Mater. 8 (2009) 203–207
3. В.Ю. Давыдов, Д.Ю. Усачёв, С.П. Лебедев, А.Н. Смирнов, и др., ФТП 51 (2017) 1116

Получение углеродных наностенок методом магнетронного высокочастотного распыления графитовой мишени в атмосфере аргона

Грудинкин С.А.¹, Виноградов А.Я.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: grudink.gvg@mail.ioffe.ru

Углеродные наностенки (УНС) представляют собой пластины многослойного графена толщиной от единиц до десятков нанометров, расположенные перпендикулярно поверхности подложки [1]. УНС обладают электропроводностью, сравнимой с электропроводностью графита. Массив УНС на подложке образует трёхмерную структуру с высокой удельной поверхностью и высоким аспектным соотношением, большой протяжённостью свободных краёв графеновых слоёв. Благодаря своим свойствам УНС могут найти применение в суперконденсаторах, устройствах преобразования солнечной энергии, автоэмиссионных катодах, газовых сенсорах и биосенсорах, а также в качестве носителей катализатора и шаблона для создания наноструктур [2, 3].

УНС синтезируют методами химического газофазного осаждения. В большинстве работ для получения УНС в качестве рабочего газа используется смесь одного из газообразных углеводородов и водорода. Роль атомарного водорода заключается в удалении из состава материала аморфной углеродной фазы и предотвращении вторичного зародышеобразования УНС.

Возможно получение УНС методами, в которых отсутствует водород в газовой фазе, например, высокочастотным (ВЧ) магнетронным распылением графита в плазме аргона [4]. Изучение ключевых факторов, определяющих микроструктуру УНС при различных параметрах магнетронного осаждения представляет значительный интерес, как с практической точки зрения, так и для построения модели формирования УНС.

В представляемой работе методом ВЧ магнетронного распыления графитовой мишени в плазме тлеющего разряда в аргоне получены УНС на подложке из кристаллического кремния. Методами комбинационного рассеяния света, атомно-силовой и электронной микроскопии исследовано влияние параметров технологического процесса и времени осаждения на скорость роста, морфологию и структуру полученных УНС. Установлено, что УНС минимальной толщины ~20 нм и с максимальной высотой стенок ~300 нм получаются при температуре подложки 500 – 600 °С и при минимальных давлении аргона и ВЧ мощности, при которых ещё существует стабильное горения разряда. Снижение температуры подложки, увеличение давления аргона, ВЧ мощности и толщины пленки приводит к увеличению толщины УНС и уменьшению пространства между ними вплоть до срастания УНС и формирования сплошной графитоподобной пленки. Определены границы области значений ВЧ мощности и времени роста, при которых происходит переход от роста УНС к росту графитоподобных пленок с неупорядоченной структурой.

Предложена модель роста УНС методом ВЧ магнетронного распыления графитовой мишени в аргоне. В соответствии с моделью, обнаруженное при больших ВЧ мощностях подавление роста УНС обусловлено травлением атомами аргона поверхности стенок. Наблюдаемое со временем роста срастание УНС происходит, когда длина диффузии адсорбированных атомов углерода вдоль плоскости стенки становится соизмерима с её размером, и на поверхности стенок начинают активно формироваться центры вторичного зародышеобразования УНС.

Работа выполнена с использованием средств госбюджета по теме госзадания 0040-2019-0012.

Список литературы

1. Santhosh N. M., Filipic G., Tatarova E., Baranov O., Kondo H., Sekine M., Hori M., Ostrikov K., Cvelbar U. Oriented carbon nanostructures by plasma processing: recent advances and future challenges. *Micromachines*, 9, 565, 2018
2. Hiramatsu M., Hori M. Carbon nanowalls: synthesis and emerging applications. (Springer Science & Business Media, 2010)
3. Srivastava S. K., Kumar V., Vankar V. D. Carbon Nanowalls: A potential 2-Dimensional material for field emission and energy-related applications. in *Nanomaterials and Their Applications* 27–71 (Springer, 2018)
4. Guzmán-Olivos F., Espinoza-González R., Fuenzalida V. Nanocrystalline carbon flakes deposited by RF magnetron sputtering. *Mat. Let.*, 167, 242, 2016

Исследование оптических свойств массивов ННК GaP_{1-x}N_x в гибкой полимерной матрице

Коваль О. Ю., Сапунов Г.А., Фёдоров В.В.

СПБАУ им. Ж. И. Алфёрова

e-mail: o.yu.koval@gmail.com

Разработка гибких оптоэлектронных устройств и наноразмерных источников света является одной из основных задач современной полупроводниковой технологии [1]. III-V нитевидные нанокристаллы (ННК) на основе тройного твердого раствора GaP_{1-x}N_x являются многообещающей платформой для создания подобных устройств благодаря возможности варьирования ширины запрещенной зоны в диапазоне энергий от 1,7 до 2,2 эВ [2].

В данной работе представлены результаты исследования оптических свойств как единичных ННК GaP_{1-x}N_x/GaP, перенесенных на вспомогательную кварцевую подложку, так и гибких полимерных мембран с инкапсулированными GaP_{1-x}N_x/GaP ННК. Гетероструктурированные ННК GaP_{1-x}N_x/GaP были выращены на подложке Si(111) с использованием молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота. Массивы ННК были инкапсулированы в полидиметилсилоксановую (PDMS) матрицу с использованием нового метода G-центрифугирования, а затем отделены от кремниевой подложки.

Оптические измерения от исходных синтезированных массивов ННК GaP_{1-x}N_x/GaP/Si(111) и от инкапсулированных (отделенных) GaP_{1-x}N_x/GaP ННК в PDMS матрице были выполнены при низкой температуре (5К). На спектрах фотолуминесценции (ФЛ) обоих образцов, полученных при 5К, наблюдается широкий сигнал в диапазоне энергий от 1,9 до 2,3 эВ. Однако, на спектрах ФЛ от массивов ННК на их ростовой подложке демонстрируется наличие тонкой структуры: яркие полосы, которые можно отнести к локализованным N-уровням в запрещенной зоне GaP [3]. Микрофотолуминесцентные исследования единичных GaP_{1-x}N_x/GaP ННК были проведены при комнатной температуре (300К) и демонстрируют появление широкого сигнала ФЛ в спектральном диапазоне между 1,7 – 2,25 эВ, что демонстрирует перспективы создания желто-зеленых гибких светоизлучающих приборов. Было показано, что осцилляции модулированного сигнала ФЛ обусловлены резонансами Фабри–Перо, на противоположных гранях единичных ННК,

что позволит создать наноразмерные волноводы для будущих устройств нанофотоники [4].

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-90232).

Список литературы

1. Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Sibirev N. V., Fetisova M. V., Moiseev E. I., Kryzhanovskaya N. V., Koval O. Yu., Ubyivovk E. V., Mozharov A. M., Cirilin G. E., Mukhin I. S., Growth and Characterization of GaP/GaPAs Nanowire Heterostructures with Controllable Composition, *Phys. Status Solidi Rapid Res. Lett.*, 13 (11), 1900350, 2019
2. Baillargeon J. N., Cheng K.-Y., Hoefler G., Pearah P., Hsieh K.-C., Luminescence quenching and the formation of the GaP_{1-x}N_x alloy in GaP with increasing nitrogen content, *Applied Physics Letters*, 60, 2540, 1992
3. Buyanova I. A., Pozina G., Hai P. N., Thinh N. Q., Bergman J. P., Chen W. M., Mechanism for rapid thermal annealing improvements in undoped GaN_xAs_{1-x}/GaAsGaN_xAs_{1-x}/GaAs structures grown by molecular beam epitaxy, *Applied Physics Letters*, 77, 2325, 2000
4. Assali S., Van Dam D., J. E. M. Haverkort, Bakkers E. P. A. M., High refractive index in wurtzite GaP measured from Fabry-Pérot resonances, *Applied Physics Letters*, 108, 173101, 2016

Номер проекта РФФИ: 19-32-90232

Особенности процесса формирования самокаталитических GaP ННК на Si (111)

Федина С. В., Сапунов Г. А., Фёдоров В. В.

СПБАУ РАН

e-mail: fedina.serg@yandex.ru

Эпитаксиальные массивы нитевидных нанокристаллов (ННК) на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 являются перспективным материалом современной оптоэлектроники. При формировании ННК по механизму пар-жидкость-кристалл, наиболее широкие возможности контроля морфологии массивов ННК открываются при использовании каталитических частиц сторонних материалов – как правило, капель Au, предварительно осажденного на ростовую подложку. Однако, материал катализатора может встраиваться в решетку растущего ННК, из-за чего образуются дефекты с глубоким уровнем, уменьшающие время жизни носителей заряда и увеличивающие вероятность безызлучательной рекомбинации [1]. Формирование ННК по самокаталитическому механизму, когда в качестве катализатора используя элемент III-группы самого ННК (например, Ga для GaP) исключает загрязнение A^3B^5 соединений, однако накладывает серьезные ограничения на диапазон возможных ростовых параметров и как следствие морфологию формируемых массивов ННК.

Целью данной работы было определить влияние ростовых условий (температуры подложки, величины и отношения молекулярных потоков) и методов физико-химической подготовки подложки Si(111) на поверхностную плотность, форму и размеры

самокаталитических ННК GaP формирующихся в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si (111). Морфология массивов ННК исследовалась методами сканирующей электронной микроскопии.

Установлено, что плотность нуклеации ННК немонотонно зависит от отношения потоков V/III групп – для каждой выбранной ростовой температуры существует оптимальное отношение V/III при которой наблюдается максимальная поверхностная плотность ННК. Так, при $T_{\text{роста}}=630\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличение отношения V/III с 12 до 18 приводит к увеличению плотности ННК с 0.07 до 0.32 мкм⁻², в то время как дальнейшее увеличение отношения V/III до 30 приводит к падению поверхностной плотности с 0.32 до 0.17 мкм⁻². Определено, что существенное влияние на морфологию массивов ННК оказывает структура поверхностного окисла подложки – модификация процедуры очистки поверхности подложек по методу Шираки и выбор оптимальной температуры отжига позволяет увеличить поверхностную плотность ННК с 0.32 до 1.08 мкм⁻². При этом на чистой поверхности Si(111) 7×7, свободной от поверхностного окисла формирование ННК не наблюдается – происходит рост планарного слоя.

Список литературы

1. Дубровский В. Г., Цырлин Г. Э., и Устинов В. М., Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: синтез, свойства, применения. Обзор. *Semiconductors*, 43(12), 1585-1629, 2009

Исследование влияния изменения показателя преломления внешней среды на оптический отклик серебряных наночастиц

Невоит В. И.¹, А.И. Лихачев¹, А.В. Нащекин¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vask_97@mail.ru

Материалы с металлическими наночастицами (НЧ) обладают уникальными оптическими свойствами [1], что делает их востребованными в современных оптоэлектронных устройствах широкого применения. Облучение НЧ светом приводит к возбуждению локализованного плазмонного резонанса (ЛПР) – резкого усиления поля на поверхности НЧ, связанного с возбуждением в НЧ коллективных колебаний электронов проводимости. При этом частота колебаний зависит от диэлектрической константы среды вокруг частиц. При взаимодействии НЧ, например, с биологическим объектом, происходит сдвиг спектрального положения ЛПР, связанный с изменением анализируемого вещества. Селективность обеспечивается нанесением на поверхность стекол с НЧ специальных белков, комплементарных анализируемому веществу. На основе таких материалов можно создавать сенсоры биохимического назначения.

В работе были использованы покровные стёкла толщиной 200 мкм. Синтез НЧ со средним размером 25 нм на поверхности стекол проводился методом ионного обмена из расплава AgNO₃ (5 вес.%) + NaNO₃ (95 вес.%) с последующим восстановлением в парах воды [2]. В результате ионного обмена в приповерхностном слое стекла формируется слой, обогащенный ионами серебра, толщиной порядка нескольких микрон [3]. Для минимизации влияния внешних условий, а также механического закрепления НЧ, что важно

при контакте с жидкостью, была разработана процедура их фиксации путем покрытия тонкой плёнки полиамида 6 с толщинами 20-350 нм.

Ввод излучения осуществлялся в геометрии «на просвет». Измерения были проведены в двух различных конфигурациях: с использованием широкополосного источника излучения (галогенная лампа) и с использованием узкополосного источника излучения (лазерный диод). Измерение сигнала на выходе исследуемой системы осуществлялось методом синхронного детектирования. В качестве внешней среды были использованы водные растворы NaCl с концентрациями 0.9 % и меньше. В случае широкополосного источника на спектрах поглощения наблюдался сдвиг полосы плазмонного резонанса в зависимости от изменения показателя преломления анализируемой среды ($n = 1.333 \div 1.344$). Чувствительность системы составила порядка 400 нм / единицу показателя преломления. При использовании узкополосного источника излучения наблюдался отклик на изменение показателя преломления жидкости в системе. Полученный отклик коррелирует с результатами первой части работы.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования стеклянных подложек со структурой типа «волновод-наночастицы серебра» при введении излучения в геометрии «на просвет» для создания высокочувствительных сенсоров биологических и химических веществ. Оработана методика покрытия наночастиц серебра тонкими пленками полиамида 6 с целью защиты от воздействия внешней среды и последующей функционализации поверхности биосенсора за счет наличия необходимых амидных и свободных амина и карбоксильных групп. Показана возможность использования узкополосного источника излучения для детектирования спектрального отклика ЛППР на изменение показателя преломления внешней среды, что, в перспективе, позволит создавать компактные системы детектирования для биосенсоров на основе металлических наночастиц.

Список литературы

1. В.В. Климов, Наноплазмоника, Физматлит, Москва, (2009).
2. П.А. Образцов, А.В. Нащекин и др. ФТТ, 55, №6, стр. 1180–1186, (2013).
3. А.И. Лихачев, А.В. Нащекин и др. ЖТФ. 89, стр. 456–459, (2019).

Микроструктура полуполярных слоёв GaN($h0-hl$), синтезированных на нанопофилированных подложках Si(001)

Мясоедов А.В.¹, Берт А.Н., Бессолов В.Н.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: amyasoedov88@gmail.com

В настоящее время нитрид галлия является одним из основных материалов полупроводниковой оптоэлектроники в коротковолновой области спектра, а приборные структуры на основе его твёрдых растворов находят применение в самых различных областях. Ввиду отсутствия коммерчески доступных подложек для гомоэпитаксии, синтез подавляющего большинства таких структур осуществляется гетероэпитаксией на подложках $c\text{-Al}_2\text{O}_3$, $H\text{-SiC}$ и Si(111). В то же время, с точки зрения интеграции в кремниевую электронику, перспективным направлением представляется осуществление синтеза нитридных структур с использованием подложек Si(001). Однако, синтез GaN непосредственно

на точно ориентированных подложках Si(001), ввиду симметрии четвёртого порядка, приводит к формированию поликристаллических плёнок с очень грубыми поверхностями [1].

В данной работе приводятся результаты исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) микроструктуры слоев GaN, осажденных на нанопрофилированную подложку NP-Si(001) методом хлоридно-гидридной газофазной эпитаксии (ХГФЭ) при $T_s \approx 1050$ °C и на комбинированную подложку 3C-SiC/NP-Si(001) методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) при $T_s \approx 1025$ °C.

Нанопрофилирование подложки Si с ориентацией (001) $\pm 0.5^\circ$ осуществлялось по технологии Wostec [2], позволившей сформировать периодически фасетированную поверхность со структурой хребтов и канавок, ориентированных вдоль направления $[1\bar{1}0]$, с периодом ~ 90 nm при высоте «нанохребта» ~ 70 nm. На такой поверхности открываются фасетки (111) и $(\bar{1}\bar{1}1)$, которые должны задавать полуполярную ориентацию поверхности растущего слоя GaN. Для получения комбинированных подложек на NP-Si(001) методом топомического замещения [3] наносился тонкий слой кубического SiC, который также содержал фасетки {111}.

Исследование микроструктуры образцов осуществлялось на электронном микроскопе Philips EM420 при ускоряющем напряжении 100 kV. Образцы для ПЭМ были приготовлены каждый в двух поперечных ортогональных сечениях (110) и $(1\bar{1}0)$ подложки Si по общепринятой процедуре предварительной механической шлифовки-полировки и финишного ионного распыления.

В результате анализа электронно-микроскопических изображений и картин дифракции электронов установлено, что слой GaN, синтезированный методом (ХГФЭ) на подложке 3C-SiC/NP-Si(001), имеет следующие ориентационные соотношения с подложкой: $[0001]_{\text{GaN}} \parallel [001]_{\text{Si}}$ и $(11\bar{2}0)_{\text{GaN}} \parallel (220)_{\text{Si}}$ и состоит из слегка развёрнутых относительно друг друга зёрен с полярной ориентацией. При этом зёрна полуполярной ориентации не обнаруживаются. Слой является однородным по толщине и обладает гладкой морфологией поверхности в рамках поля зрения. Дефектная структура характеризуется прорастающими дислокациями и дефектами упаковки (ДУ) в базисной плоскости.

Для слоя GaN, полученного методом ГФЭМОС на подложке NP-Si(001), установлено, что он состоит из полуполярных зёрен GaN, имеющих преимущественную ориентацию, у которых направление GaN[0001] отклонено от направления Si $[\bar{1}\bar{1}1]$ на угол $\sim 4.5^\circ$ в сторону от подложки. В обоих сечениях слой обладает неоднородной толщиной при относительно гладкой морфологии поверхности отдельных зёрен.

Для слоя GaN, полученного методом ГФЭМОС на комбинированной подложке 3C-SiC/NP-Si(001), установлено, что вблизи интерфейса с 3C-SiC слой GaN состоит из зёрен различной направленности с ориентационными соотношениями $[0001]_{\text{GaN}} \parallel \langle 111 \rangle_{\text{Si}}$, из которых впоследствии начинают доминировать зёрна одной ориентации с направлением $[0001]_{\text{GaN}} \parallel [\bar{1}\bar{1}1]_{\text{Si}}$, т.е. задаётся не нанопрофилированной поверхностью подложки, а определяется слоем 3C-SiC. В сечении (110) зёрна формируют пилообразный профиль поверхности и характеризуются сравнительно более высокой плотностью ДУ в базисной плоскости относительно образца без слоя SiC.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что использование NP-Si(001) подложек позволяет формировать полуполярные слои GaN определённой ориентации, а использование слоя SiC нивелирует ориентационное действие наноструктурированной Si подложки.

Список литературы

1. Schulze F., Dadgar A., Biasing J. and Krost A., *J. Cryst. Growth*, vol. 272, 1-4, 496-499, 2004
1. Smirnov V. K., Kibalov D.S., Orlov O.M. and Graboshnikov V. V., *Nanotechnology*, vol. 14, 7, 709–715, 2003
2. Kukushkin S.A. and Osipov A.V., *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engin.*, vol. 387, 012044, 2018

Оптимизация технологии роста 3C-SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме

Лебедев А.А.¹, Никитина И.П.¹, Шахов Л.В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: shakh.leo@gmail.com

Привлекательность карбида кремния для полупроводниковой электроники хорошо известна и обоснована теоретически, а значительные успехи в технологии за последние 20 лет позволили создать на основе SiC практически все основные типы полупроводниковых приборов. За счёт широкой запрещенной зоны, большой теплопроводности, высокой термической, химической и радиационной стойкости, карбид кремния (SiC) является весьма перспективным материалом для силовой электроники. Для создания приборов наиболее интересен кубический политип, в связи с большой подвижностью ($1200 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) [1], и дрейфовой скоростью насыщения электронов ($2.7 \times 10^7 \text{ см/с}$), высоким значением критического поля пробоя ($3 \times 10^6 \text{ В/см}$) в сочетании с широкой запрещенной зоной (2.39 эВ) объясняют целесообразность использования 3C-SiC для производства полупроводниковых приборов различного назначения (силовых, СВЧ-электроника, устройств, рассчитанных на работу в экстремальных условиях).

В настоящее время для выращивания эпитаксиальных слоев 3C-SiC используются две технологии – рост на подложках кремния [2] и рост на подложках гексагональных политипов. Но при росте обоими способами образуются структурные дефекты. В первом случае, из-за низких температур роста, ограничиваемых температурой плавления Si подложки, в слое образуется большое количество дислокаций [3-4]. Эти структурные дефекты не позволяют изготавливать на основе данных эпитаксиальных слоев полупроводниковые приборы. При росте на подложках гексагональных политипах [5-6] дислокаций образуются мало, но возникают двойниковые границы как результат эпитаксии кубического материала на гексагональном. Эти границы двойников, также, как и дислокации в первом случае, не дают использовать данные пленки для изготовления приборов.

Цель настоящей работы – оптимизация технологии роста эпитаксиальных плёнок кубического карбида кремния (3C-SiC) и получение слоев высокого структурного качества.

В наших ростовых экспериментах использовалась установка сублимационной эпитаксии в вакууме [7], применявшаяся ранее для получения гомоэпитаксиальных слоев SiC на основе подложек гексагональных политипов. Рост эпитаксиальных слоев 3C-SiC проводился при температурах $1800 \div 2000 \text{ оС}$, время роста составляло 1-2 часа. В качестве источника для роста использовался коммерческий SiC с размером зерен $\sim 10 - 20 \text{ мкм}$. В ряде экспериментов в состав источника добавляли кремний (2% от общей массы источника) с

аналогичным размером зерна. Рост проводился на промышленно выпускаемых подложках 6H-SiC производства фирмы «Нитридные кристаллы» [8]. Непосредственно перед началом роста также осуществлялось сублимационное травление подложки «in situ» для удаления нарушенного механической полировкой слоя и очистки поверхности подложки.

Исследование полученных эпитаксиальных слоев, выращенных на подложках 6H, проводилось методом фотолюминесценции и оптической микроскопии, просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ).

Помимо экспериментов с гетерополитипным ростом, исследуется новый подход к росту 3C-SiC, пытающийся сочетать достоинства двух ранее разработанных технологий роста, без наследования их недостатков [9]. В рамках этого подхода мы используем пленку 3C-SiC, предварительно выращенную методом CVD на подложке кремния. Такая пленка имеет большую плотность дислокаций, но не содержит двойниковых границ, так как происходит рост кубического эпитаксиального слоя на основе кубической же подложки. Затем выращенная 3C-SiC/Si структура со стороны пленки 3C-SiC приклеивается на подложку гексагонального SiC а подложка кремния удаляется химическим путем. Полученная структура используется для дальнейшего роста слоя 3C-SiC методом сублимации в вакууме, но уже при значительно более высоких температурах (~ 1850 С)

Полученные образцы исследуются методом фотолюминесценции и оптической микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Результаты исследований будут представлены на конференции.

Список литературы

1. M.E.Levinshtein, S.L.Rumyantsev, and M.S.Shur, Editors: "Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe", John Wiley & Sons, Inc.2001
1. S.Nishino, J.Powel, N.A.Will, Appl.Phys.Lett, 42, 460 (1983)
2. N. Piluso, A. Severino, M. Camarda, A. Canino, A. La Magna, and F. La Via APPLIED PHYSICS LETTERS 97, 142103_2010_
3. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Д.Б. Вчерашний, С.А. Обухов, Н.А. Феоктистов Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 10 стр 81-88
4. Ю.А.Водаков, Г.А..Ломакина, Е.Н.Мохов, В.Г.Одинг. ФТТ, 19, 1812, (1977).
5. A.A. Lebedev, Semicond. Sci. Technol. 21, R17 (2006)
6. N.S.Savkina et al. Mat.Science & Eng. B77 (2000) 50.
7. S.Yu.Karpov, A.V.Kulik, Zhmakin, Yu.N. Makarov, E.N. Mokhov, M.G. Ramm, M.S. Ramm, A.D. Roenkov, Yu.A. Vodakov. Journal of Crystal Growth 211 (2000) 347-351.
8. P. Schuh, M. Schöler, M. Wilhelm, M. Syväjärvi, G. Litrico, F. La Via, M. Mauceri, P.J. Wellmann, Journal of Crystal Growth 478 (2017) 159–162

Разработка установки фотоэлектрохимического травления для получения пористого кремния с латеральноградиентной пористой текстурой

Мирошниченко О. В.¹, Спивак Ю.М.

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: olegmir97@mail.ru

Получение пористого кремния со сложной, многослойной, вариативной текстурой является востребованным для создания приборных структур широкого спектра назначения в сенсорике, МЭМС, нелинейной оптике, медицине, альтернативной энергетике и др. [1-3]. При этом, как правило, формирование многослойной или градиентнопористой текстуры достигается путем вариации технологических условий электрохимического анодного растворения монокристаллического кремния (состав электролита, плотность тока анодирования) [1, 2] или при использовании монокристаллического кремния с эпитаксиальными слоями кремния с другим типом легирующей примеси или ее концентрации [4]. Особенностями таких способов формирования является то, что при этом формируются слои или градиентные области с различными характеристиками пористости, причем различия наблюдаются в направлении нормали к поверхности пластины.

Нами было обнаружено [3], что при стимуляции электрохимического травления моно-кристаллического кремния n-Si (111) лазерным излучением (HeNe лазер, 632 нм, 1100мВт) происходит существенное изменение текстуры формируемого пористого слоя в латеральном направлении: при отсутствии фотостимуляции формируется мезопористый слой с типичным размером пор 30-40 нм и сечением кремниевого скелета 10-15 нм, а при фотостимуляции лазерным излучением – мезо-макропористый кремний: с размерами мезопор 30-40 нм и макропор 2-3 мкм. Выявлено, что изменение интенсивности подсветки от центра пятна к краю (в пределах одного эксперимента) влияет на строение поверхности пористого слоя сильнее, чем изменение интенсивности источника света. Показана возможность формирования вертикальных слоев пористого кремния (изменение параметров пористой структуры происходит в латеральном направлении) в подложках n-типа проводимости при использовании подсветки анодной стороны пластины кремния в процессе анодирования. Такой тип пористой структуры был бы актуален как для вышеперечисленных применений пористого кремния, так и для создания наночастиц сложной морфологии для направленного транспорта нескольких лекарственных веществ.

Для успешного применения фотостимулированного электрохимического травления в данной работе поставлена задача разработать специализированный лабораторный стенд с точным позиционированием лазерного луча, воспроизводимым управлением распределением максимумов интенсивности стимулирующего излучения по поверхности подложки, при этом необходимо обеспечить равномерное распределение электрического поля по площади подложки. Предполагается, что управлением положением лазерного луча в пространстве и верхним электродом будет обеспечиваться шаговыми двигателями 17HS4401S-300 Nema17, угловой шаг которых составляет $1.8 \pm 5\%$. Это позволяет оперировать величинами смещений порядка долей миллиметра. Корпус установки будет выполнен из фторопласта. Специальные химически стойкие маски будут обеспечивать управление областями анодной обработки кремниевой пластины. Конструкция электрохимической ванны позволит производить быструю замену образцов, что позволит повысить производительность. Лабораторный стенд будет апробирован для получения серий образцов латерально градиентнопористого кремния.

Список литературы

1. Е.А. Гостева, В.В. Старков, Ю.Н. Пархоменко и др. Международный Научный Журнал Альтернативная Энергетика и Экология, т. 19-21, 16-25, 2017.
1. В.В. Старков, Д.В. Иржак, Д.В. Рошупкин // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – №. 10. – С. 34-38.
2. Спивак Ю.М., Травкин П.Г., Мошников В.А В сб. материалов IX Международной конференции «Кремний-2012», Санкт-Петербург, 9-13 июля 2012, Санкт-Петербург, 2012, с. 263-264.
3. А.С. Леньшин, В.М. Кашкаров, П.В. Середин, ЖТФ, том 84, вып. 2, 70-75, 2014.

Исследование параметров микропористой структуры цеолитных композиций сравнительными сорбционными методами анализа

Мараева Е.В.¹, Кононова И.Е.¹, Скорникова С.А.², Мошников В.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²ИРНТУ

e-mail: jenvmar76@gmail.com

В настоящее время цеолиты и материалы на их основе находят широкое применение в качестве адсорбентов и катализаторов процессов нефтепереработки. Известно, что развитая система микропор цеолитов из-за диффузионных ограничений оказывает существенное влияние на скорость реакций, катализируемых цеолитами [1, 2]. В связи с этим актуальной задачей является исследование объема микропор и внешней удельной поверхности целостных композиций (внешней – т.е. не включающей микропоры, так как они при исследовании заполняются жидким адсорбатом), в том числе с привлечением сравнительных методов анализа.

Чтобы использовать активную поверхность цеолитного катализатора более эффективно, в нем создают дополнительную систему более крупных пор заданного размера – так называемую иерархическую систему микро-мезо-макропор. Цеолитные материалы с развитой системой пор создаются при помощи формирования каталитической композиции цеолит-связующее (матрица). В качестве последнего чаще всего используют оксид алюминия. Природа связующего, так же, как и природа самого цеолита, оказывают существенное влияние на пористую структуру сформованного материала.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния природы связующего на параметры микропористой структуры формируемых цеолитных композиций. Для изучения параметров микропористой структуры в настоящей работе использовались сравнительные сорбционные методы анализа, включая α -метод Синга и t -метод де Бура. В данных методах заложен принцип сравнения эталонного, не имеющего микропор, и исследуемого образца.

Для исследования была выбрана серия цеолитных композиций, содержащих цеолиты структурных типов ZSM-5, и BEA. В докладе обсуждаются особенности влияния природы связующего, типа, используемого пептизатора и доли диоксида кремния в цеолите на объем микропор и значение внешней удельной поверхности исследуемых цеолитных композиций.

Список литературы

1. Е. В. Пархомчук, К. А. Сашкина, В. Н. Пармон. Новые гетерогенные катализаторы на основе цеолитов с иерархической системой пор, Нефтехимия, том 56, № 3, 214-221, 2016
2. И.Е. Кононова, Е.В. Мараева, С.А. Скорникова, В.А. Мошников. Влияние связующего на пористую структуру цеолитных композиций и их каталитическую активность, Физика и химия стекла, том 46, № 2, 184-195, 2020

Морфологические, оптические и оптоэлектронные свойства InGaN наноструктур развитой морфологии, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии

Гридчин В. О.¹, Котляр К.П.¹, Резник Р.Р.¹, Бородин Б.Б.², Крыжановская Н.В.¹, Алексеев П.А.², Цырлин Г.Э.¹

¹СПБАУ РАН

²ФТИ

e-mail: gridchinfo@yandex.ru

В настоящее время InGaN вызывает повышенный интерес для создания источников видимого диапазона излучения [1] и возобновляемых источников энергии [2] благодаря тому, что является прямозонным материалом и обладает шириной запрещенной зоны, варьируемой от 0.7 до 3.43 эВ [3]. В частности, благодаря своим уникальным свойствам InGaN является перспективным материалом для использования в качестве фотоэлектродов и проведения окислительно-восстановительных реакций между кислородом и водородом. Однако, по причине отсутствия собственных подложек, синтез качественных InGaN эпитаксиальных слоёв затруднен в силу значительного различия постоянных решёток и коэффициентов термического расширения между InGaN и другими полупроводниковыми материалами, что является причиной возникновения высокой плотности дефектов различной природы в InGaN слоях. Одним из решений данной проблемы является синтез непланарных InGaN наноструктур сложной формы. Благодаря развитой морфологии, механические напряжения в полупроводниковых наноструктурах, вызванные различием постоянных решёток и коэффициентов термического расширения, релаксируют, и количество дефектов значительно уменьшается [4].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по синтезу нелегированных и легированных кремнием InGaN наноструктур с развитой морфологией на неподготовленной поверхности Si(111), а также исследованию их физических свойств. Синтез экспериментальных образцов осуществлялся с помощью установки молекулярно-пучковой эпитаксии Riber Compact 12, оснащенной эффузионными источниками индия, галлия и плазменным источником азота. Морфологические и оптические свойства образцов исследовались методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и фотolumинесценции (ФЛ). вольт-амперные характеристики (ВАХ) были исследованы с помощью установки атомно-силовой микроскопии.

Исследования морфологических свойств, синтезированных образцов, показали, что InGaN наноструктуры обладают сложной морфологией. На начальной стадии роста

формируется массив нанокколонок высокой плотности. На следующем этапе формируются трёхмерные структуры типа «nanoflowers» (структуры с разветвленной морфологией).

Результаты исследований оптических свойств показали, что синтезированные InGaN наноструктуры демонстрируют спектры ФЛ при комнатной температуре в широких диапазонах длин волн 420-700 нм для легированных и 450-950 нм для нелегированных образцов. При этом, положение пика ФЛ для легированных и нелегированных образцов составляет 540 и 620 нм, соответственно.

Исследования ВАХ выращенных образцов свидетельствуют о наличии фотопроводимости под действием лазера с энергией излучения 1.8 эВ. Полученные ВАХ имеют характерные зависимости близкие к омическим.

Таким образом, в результате данной работы были синтезированы легированные и нелегированные InGaN наноструктуры разветвлённой морфологии на неподготовленной поверхности Si(111), исследованы их морфологические, оптические и оптоэлектронные свойства, а также исследована возможность применения таких структур в качестве электродов для фотоэлектрохимических ячеек.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00768 мол_а).

Список литературы

1. Moustakas, T. D., et al. «Growth and device applications of III-nitrides by MBE.» *Journal of crystal growth* 227, 20 (2001);
1. Li, J., J. Y. Lin, and H. X. Jiang. «Direct hydrogen gas generation by using InGaN epilayers as working electrodes.» *Applied Physics Letters* 93, 162107 (2008);
2. Yam, F. K., and Z. Hassan. «InGaN: An overview of the growth kinetics, physical properties and emission mechanisms.» *Superlattices and Microstructures* 43, 23 (2008);
3. Dubrovskii, V. G., G. E. Cirlin, and V. M. Ustinov. «Semiconductor nanowhiskers: synthesis, properties, and applications.» *Semiconductors* 43, 1539 (2009);

Номер проекта РФФИ: 18-32-00768 мол_а

Исследование оптических свойств и эпитаксиального формирования фотовольтаических гетероструктур GaP(NAs)/Si

Сапунев Г. А.¹, Коваль О.Ю.¹, Федоров В.В.¹, Большаков А.Д.¹

¹СПБАУ РАН

e-mail: sapunovgeorgiy@gmail.com

Твердый раствор GaP(NAs) — это единственная полупроводниковая III/V прямозонная система, которая может быть выращена на кремнии согласованно по параметру решетки [1]. Данный факт обосновывает возможность монолитной интеграции оптоэлектронных и фотонных устройств с кремниевыми интегральными схемами [2]. Достичь высокой эффективности и приборного применения таких структур препятствует образование антифазных доменов. Их границы негативно влияют на кристаллическое качество и оптические свойства. [3]

Мы синтезировали приборные PIN гетероструктуры p-GaP/i-GaPNAs/n-GaP/Si(001) методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота. Анализ атомно-силовой микроскопии показал, что разработанная методика роста сильно

подавляет образование антифазных доменов внутри азотсодержащих слоев и сохраняет планарную морфологию поверхности. Мы провели рентгеноструктурный анализ, чтобы определить параметры решетки и определить элементный состав слоев. Спектры фотолюминесценции структур, измеренные при комнатной температуре, имеют широкое излучение в диапазоне длин волн 570-770 нм с хвостом в инфракрасном диапазоне, вызванным излучательной рекомбинацией на N-связанных дефектах.

Методами пост-ростовых технологий, на основе синтезированных гетероструктур созданы прототипы фотоэлектрических преобразователей. Измерены электрических и спектральных характеристики, определена эффективность прототипов с использованием имитаторов солнечного излучения.

Список литературы

1. Вуянова I. A., Pozina G., Bergman J. P., Chen W. M., Xin H. P., and Tu C. W., Time-resolved studies of photoluminescence in GaN_xP_{1-x} alloys: Evidence for indirect-direct band gap crossover, *Applied physics letters*, 81(1), 52-54, 2002
2. Koval O. Y., Fedorov V. V., Kryzhanovskaya N. V., Sapunov G. A., Kirilenko D. A., Pirogov E.V., Filosofov N.G., Serov A.Y., Shtrom I.V., Bolshakov A.D. and Mukhin I.S., Structural and optical characterization of dilute phosphide planar heterostructures with high nitrogen content on silicon, *CrystEngComm*, 22(2), 283-292, 2020
3. Bolshakov A.D., Fedorov V.V., Koval O.Y., Sapunov G.A., Sobolev M.S., Pirogov E.V., Kirilenko D.A., Mozharov A.M. and Mukhin I.S., Effective Suppression of Antiphase Domains in GaP (N)/GaP Heterostructures on Si (001), *Crystal Growth & Design*, 19(8), 4510-4520, 2019

Механизмы токопереноса в пленках поливинилового спирта с включениями многостенных углеродных нанотрубок

Васин С. В.¹, Ефимов М.С.², Сергеев В.А.^{1,2}, Фролов В.И.^{1,2}

¹УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

²Ульяновский государственный технический университет

e-mail: s.vasin@outlook.com

Исследованы вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики пленок поливинилового спирта (ПВС) с включением многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), нанесенных на кремниевые подложки, а также на стеклянные подложки с проводящим слоем ИТО. Использовались синтезированные методом МОСVD МУНТ с диаметром 40-80 нм. Для улучшения совместимости МУНТ с матрицей полимера трубки функционализировали (ф-МУНТ) прививкой на поверхности полярных карбоксильных групп (COOH) при обработке сильными кислотами [1]. Пленки наносились на подложки методом вытягивания из раствора (dip-coating), с последующей сушкой на воздухе при температуре 80°C. Для формирования исследуемых структур на поверхность полученных пленок методом термического испарения в вакууме наносились алюминиевые контакты. Измерения проводились в диапазоне температур от 270 до 350 К.

Высокочастотные (100 кГц) вольт-фарадные характеристики (ВФХ) контрольных структур имеют типичный для МДП-структуры вид. Плотность заряда составляет в

пленке ПВС составляет величину порядка 10^9 см². Добавление в пленку ПВС МУНТ приводит к сдвигу ВФХ в область положительных значений, что свидетельствует о компенсации части положительного заряда при формировании композита. В то же время вид кривой в области отрицательных напряжений смещения становится характерным для режима глубокого обеднения, реализуемого обычно при неравновесном обеднении полупроводника. Такой вид ВФХ характерен для МДП-структур с туннельно-тонким диэлектриком [2] и обуславливается возрастанием токов утечки, которые препятствуют формированию инверсного слоя и приводят к монотонному падению емкости с ростом обратного смещения.

ВАХ структур с МУНТ имеют явно выраженный нелинейный характер, что указывает на наличие механизма токопереноса, характерного для барьерных или туннельных структур. Установлено, что добавление в ПВС всего лишь 1% МУНТ приводит к увеличению тока на 2 порядка при фиксированном обратном смещении и на 4 порядка при фиксированном прямом смещении. Показано, что при прямом смещении структуры с МУНТ имеют положительный температурный коэффициент сопротивления.

Подобное поведение может быть объяснено в рамках модели «прыжкового» токопереноса в композитах с включениями проводящих частиц [3]. Поскольку используемые нами концентрации МУНТ (1%) недостаточны для включения перколяционного механизма проводимости [4], возможным механизмом переноса тока в данном случае является туннелирование носителей тока между проводящими частицами (в нашем случае МУНТ). Вероятность туннелирования экспоненциально зависит от произведения расстояния туннелирования на высоту барьера. Нагрев пленки ПВС приводит к ее тепловому расширению и увеличению расстояния между МУНТ. Проведенные нами оценки показали, что учет лишь одного теплового расширения матрицы полимера позволяет добиться согласия с результатами эксперимента при значениях коэффициента линейного теплового расширения $\sim 10^{-4}$ К⁻¹, что несколько превышает известные значения для ПВС. Уменьшение проводимости с ростом температуры также может объясняться изменением межфазного барьерного слоя между полимерной матрицей и МУНТ [5] и, соответственно, увеличением второго множителя в показателе экспоненты в выражении для вероятности туннелирования. Еще одним механизмом, ответственным за уменьшение тока с увеличением температуры, может быть уменьшение проводимости самих МУНТ, поскольку ранее было показано [6], что массивы из отожженных и функционализированных кислотами МУНТ проявляют металлические свойства.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-42-730011.

Список литературы

1. Климов Е.С., Бузаева М.В., Давыдова О.А., Макарова И.А., Светухин В.В., Козлов Д.В., Пчелинцева Е.С., Бунаков Н.А. Некоторые аспекты синтеза многостенных углеродных нанотрубок химическим осаждением из паровой фазы и характеристики полученных материалов, Журнал прикладной химии, т. 87, № 8, с. 1128-1132, 2014.
1. Ma S. J., Guo W. L. Mechanism of carbon nanotubes aligning along applied electric field, Chinese Phys. Lett., vol. 25, no. 1, pp. 270–273, 2008.
2. Ambrosetti G., Balberg I., Grimaldi C. Percolation-to-hopping crossover in conductor-insulator composites, Phys. Rev. B, vol. 82, no. 13, p. 134201, Oct. 2010.
3. Chebil A., Doudou B. Ben, Dridi C., Dammak M. Synthesis characterization, optical and electrical properties of polyvinyl alcohol/multi-walled carbon nanotube nanocomposites: A composition dependence study, Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol., vol. 243, no. April, pp. 125–130, 2019.

4. Misurkin I. A. Mechanism of conductivity in molecular systems and polymer nanocomposites, Russ. J. Phys. Chem. A, vol. 85, no. 12, pp. 2183–2186, Dec. 2011.
5. Сергеев В. А., Климов Е. С., Фролов И. В. Влияние функционализации на электропроводность и шумовые характеристики массивов многостенных углеродных нанотрубок, Журнал технической физики, т. 89, № 8, с. 1223, 2019.

Номер проекта РФФИ: 19-42-730011

Исследования режимов формирования нанокристаллических пленок ZnO:In методом импульсного лазерного осаждения

Вакулов З.Е.¹, Гелдаш А.А.², Джуплин В.Н.³, Агеев О.А.^{2,3}

¹ИОНЦ РАН

²ЮФУ

³НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ

e-mail: zvakulov@sfnedu.ru

Импульсное лазерное осаждение (ИЛО) на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных методов получения нанокристаллических оксидных пленок путем конденсации на поверхности подложки продуктов взаимодействия лазерного излучения с материалом мишени. Основным преимуществом ИЛО является высокая степень соответствия стехиометрии формируемых пленок материалу мишени. Кроме того, высокая степень пересыщения при конденсации продуктов абляции приводит к интенсивному зародышеобразованию по всей поверхности подложки и высокой морфологической однородности формируемой пленки, что важно при формировании прозрачных тонких слоев [1–3].

Основной целью данной работы являлось исследование влияния режимов формирования нанокристаллических пленок ZnO:In, методом ИЛО на их электрофизические параметры.

Нанокристаллические пленки ZnO:In были получены с использованием установки ИЛО Pioneer 180 (Neocera Inc., США), входящей в состав нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 (НТ-МДТ, Россия).

Режим формирования пленки ZnO:In характеризуется значениями длины волны лазерного излучения $\lambda=248$ нм, плотности энергий на поверхности мишени 1,5 Дж/см², количества импульсов 50000, энергии лазерных импульсов 10 Гц, давления Ar $1 \cdot 10^{-4}$ Торр, расстояния мишень-подложка 75 мм, скорости охлаждения образцов 2 °С в мин. Изменяемым параметром была температура подложки: 150, 300 и 400 °С.

В результате исследования выявлено, что при увеличении температуры подложки с 150 °С до 400 °С уменьшается толщина пленки ZnO:In с 190 нм до 50 нм, объемное удельное сопротивление пленок уменьшалось с 1,171 Ом·см до $2,4 \cdot 10^{-2}$ Ом·см. Подвижность носителей тока при этом увеличивалась с 2,5 см²/(В·с) до 6,46 см²/(В·с). Концентрация носителей тока увеличивалась со значения $2,12 \cdot 10^{18}$ см⁻³ до значения $4,01 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Так же было выявлено, что при температуре 300 °С и 400 °С пленка на поверхности состоит из зерен диаметром 5–10 нм, что сказывается на уменьшении значения коэффициента преломления плёнки.

Полученные нанокристаллические пленки ZnO:In могут быть использованы в качестве прозрачных проводящих контактных слоев к различным наноструктурам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-37-90139, № 19-38-60052, № 18-28-11019 МК. Результаты были получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. Pican S., Caglar Y., Caglar M., Demirci B., Polycrystalline indium-doped ZnO thin films: preparation and characterization, *J. Optoelectron. Adv. M.*, 10, 2592, 2008;
2. Vakulov Z.E., Zamburg E.G, Khakhulin D.A. et al. Thermal stability of ZnO thin films fabricated by pulsed laser deposition, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 66, 21-25, 2017;
3. Chirakkara S., Nanda K.K., Krupanidhi S.B., Pulsed laser deposited ZnO:In as transparent conducting oxide, *Thin Solid Films*, 519, 3647, 2011;
4. Dikovska A. Og., Atanasov P.A., Vasilev C.Thin et al., ZnO Films Produced by Pulsed Laser Deposition, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 7, 1329, 2005;

Номер проекта РФФИ: 19-37-90139; 19-38-60052; 18-28-11019 МК.

Теплопроводность объемных наноструктурированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$

Taghiyev M.M.^{1,2}, Абдинова Г. Д., Абдуллаева И.А.

¹Азербайджанский государственный экономический университет

²Институт физики НАН Азербайджана

³Институт радиационных проблем НАН Азербайджана

e-mail: mail_tagiyev@mail.ru

Твердые растворы систем Bi-Sb являются наиболее эффективными материалами для создания различных низкотемпературных термо- и магнитотермоэлектрических преобразователей энергии. Особенно перспективными в этом направлении являются высокопрочные экструдированные материалы на основе этих систем. Для получения материала с необходимыми параметрами, следует установить закономерности влияния состава, режима, размера зерен, легирования на концентрацию носителей заряда и условия рассеяния электронов и фононов, приводящие к достаточно высокому отношению подвижности носителей тока к решеточной теплопроводности μ/χ_p , которое непосредственно влияет на термоэлектрическую эффективность материала. В последние годы начались интенсивные исследования низкоразмерных полупроводниковых структур, а также возможности повышения термоэлектрической эффективности материалов за счет использования размерных эффектов как классических, так и квантовых. В этом смысле интересен подход, основанный на применении объемных наноструктурированных материалов. Эти материалы представляют интерес и с точки зрения изучения влияния рассеяния электронов и фононов на границах наночастиц на транспортные свойства полупроводниковых материалов. Поэтому исследование теплопроводности в наноструктурированных экструдированных образцах с различными размерами зерен, прошедших и непрошедших отжиг в широком интервале температур, представляет определенный научный и практический интерес.

Учитывая вышесказанное, с целью изучения влияния наноразмерных эффектов на рассеяние электронов и фононов, приводящее к изменению теплопроводности, получены объемные наноструктурированные экструдированные материалы на основе порошков с размерами зерен 2×10^5 ; 950; 650; 380; 30 и 15 нм твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ и исследованы их теплопроводности в интервале $\sim 80, 300\text{K}$.

Выяснено, что с уменьшением размеров зерен в экструдированных образцах наблюдается рост общей теплопроводности и уменьшение фононной теплопроводности (c_p). С уменьшением размеров кристалликов растет концентрация границ, что приводит к росту концентрации и усилению рассеяния, т.е. уменьшению подвижности электронов в образцах.

При экструзии, за счет пластической деформации в образцах параллельно образованию текстуры и возникают различные дефекты в отдельно взятых зернах. Дефекты, созданные границами зерен, являются центрами рассеяния для носителей тока и уменьшают их подвижность. Степень текстуры при экструзии, рекристаллизация и разориентация частиц при отжиге, электрические и тепловые параметры будут зависеть от размеров частиц в образце.

Совместный анализ электрических и тепловых параметров, исследованных образцов показывает, что в рассеивании фононов в них при $\sim 80\text{K}$ преобладающую роль играет текстура, а электроны при $\sim 80\text{K}$, в основном, рассеиваются на структурных дефектах. С ростом размеров зерен концентрация структурных дефектов и носителей заряда уменьшается. Это сопровождается уменьшением электронной части (χ_e) и ростом фононной части (χ_p) теплопроводности.

При термообработке происходит частичное разрушение текстуры и «залечивание» структурных дефектов, которые приводят к уменьшению концентрации носителей заряда тока, и решеточная теплопроводность при этом растет.

Таким образом, зависимость теплопроводности объемно наноструктурированных экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ от размеров зерен и отжига удовлетворительно объясняется изменениями, происходящими в структуре образцов при экструзии и термообработке и хорошо, коррелируется.

Создание композиционного материала алюминий-ГНП с высокой твердостью и низкой теплопроводностью

Заваринский В. И.¹, Возняковский А.А.¹, Кидалов С.В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: z1997vova@yandex.ru

Углеродные наноструктуры такие как малослойный графен (МГ) активно используются исследователями при создании новых композиционных материалов (КМ) на основе алюминия. Несмотря на то, что в отличии от однослойного бездефектного графена МГ представляет из себя пачки графеновых листов (до 10 штук) он может значительно улучшать механические, прочностные и теплофизические свойства исходных металлических матриц при использовании в относительно небольших количествах (до 10 масс. %) Эффективность МГ как наполнителей при создании композитов обусловлена высокими характеристиками, так теплопроводность, измеряемая параллельно к поверхности,

достигает до 5000 Вт/(м·К), модуль Юнга до 1ТПа. Однако, из-за технической сложности синтеза МГ по существующим технологиям, себестоимость МГ остается крайне высокой и тормозит его внедрение в промышленность, в т.ч. и для получения металлокомпозитов. Поэтому множество научных групп по всему миру ищут все новые методы синтеза МГ.

Для получения МГ мы использовали метод самораспространяющийся высокотемпературного синтеза (СВС). СВС метод представляет собой экзотермический химический процесс типа горения, протекающий в автоволновом режиме по смеси реагентов с образованием твердых конечных продуктов. Температура в узко локализованной зоне синтеза (волне реакции) может достигать 2000°C. Основное достоинство СВС методик перед другими энергоемкими технологиями заключается в использовании выделяющегося тепла химических реакций для получения продукта, технической простоты и высокие скорости протекания синтеза [1]. В качестве исходного вещества для синтеза МГ был использован биополимер целлюлоза (ч.д.а.).

Синтезированный с помощью СВС метода МГ был использован в качестве модифицирующей добавки при создании композита на основе алюминия. Для этого порошок алюминия смешивали с МГ посредством использования смесителя гравитационного типа “пьяная бочка”, а также ультразвукового диспергатора, с целью достижения равномерного распределения МГ в объеме алюминиевой матрицы. Концентрация МГ составляла 0,5-6 масс. %. После получения гомогенизированных смесей алюминий-МГ заданной концентрации, было произведено их компактирование с помощью методики горячего пресования в камере высокого давления (1ГПа, 400-1200°C, 10-60 сек.).

В результате введения МГ в алюминиевую матрицу нам удалось повысить твердость композита до 2 раз по сравнению с исходным алюминием, а также добиться снижения теплопроводности до 20 раз, сохранив при этом сравнимую с исходным алюминием низкую плотность в $2,7 \pm 0,05$ г/см³. Полученный эффект роста твердости может быть объяснен армированием алюминиевой матрицы и равномерным распределением нагрузки через МГ по всему объему материала. Снижение теплопроводности композита объясняется хаотическим распределением МГ по объему матрицы.

Нами было экспериментально показано, что с помощью СВС метода возможно получать МГ, который может эффективно применяться в качестве модифицирующей добавки при создании композитов на основе алюминия.

Выполнение работы поддержано грантом РФФИ №18-29-24129 мк

Список литературы

1. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение, – Торус Пресс, 2007.

Исследование коллоидных нанокристаллов сульфида серебра-индия

Мазинг Д.С.¹, Шугабаев Т.М., Александрова О.А., Мошников В.А.

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: dmazing@yandex.ru

Коллоидные нанокристаллы (НК) тройных халькогенидных соединений I-III-VI (CuInS_2 , CuInSe_2 , AgInS_2) являются перспективным материалом для ряда областей науки и техники. Будучи менее токсичной альтернативой нанокристаллам на основе бинарных халькогенидов кадмия и свинца, они обладают дополнительными преимуществами. Среди них большой Стоксов сдвиг фотолюминесценции, снижающий эффект перепоглощения, большие показатели поглощения, а также длительные времена жизни фотолюминесценции, что представляет интерес для исследований с временным разрешением. При этом эффективность фотолюминесценции для пассивированных неорганической оболочкой частиц, получаемых в органических растворителях, может достигать 80-90%. С технологической точки зрения оптическими свойствами нанокристаллов данного типа можно управлять не только варьированием размера частиц, но и стехиометрией состава ядра. Главным недостатком системы являются более широкие спектры фотолюминесценции с полушириной, слабо зависящей от размерного распределения частиц. При этом механизм испускания НК тройных халькогенидных соединений I-III-VI остается предметом активных исследований [1, 2].

В данной работе реализован синтез люминесцентных коллоидных НК Ag-In-S и Ag-In-S/ZnS в водных растворах с использованием L-глутатиона и меркаптопропионовой кислоты в качестве лигандов. Осуществление синтеза в воде позволяет получать нанокристаллы, подходящие для работы в биологических средах, без необходимости дополнительной гидрофиллизации поверхности, а малый размер лигандов облегчает транспорт носителей заряда в слоях частиц. Полученные образцы были исследованы методами спектроскопии фотолюминесценции, спектроскопии поглощения, рентгенофазового анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии.

Работа выполнена с привлечением средств гранта РФФ № 17-79-20239.

Список литературы

1. Berends A. C. et al. Optoelectronic Properties of Ternary I-III-VI₂ Semiconductor Nanocrystals: Bright Prospects with Elusive Origins //The journal of physical chemistry letters. – 2019. – Т. 10. – №. 7. – С. 1600-1616.
2. Stroyuk O. et al. Origin and dynamics of highly efficient broadband photoluminescence of aqueous glutathione-capped size-selected Ag-In-S quantum dots //The Journal of Physical Chemistry C. – 2018. – Т. 122. – №. 25. – С. 13648-13658.

Получение композита с магнитооптическими свойствами МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ

Снежная Ж.Г.¹, Апанасевич А.В.¹, Сокура Л.А.^{1,2}, Латыпова К.Н.¹, Романов А.Е.¹

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: geneviev-v@yandex.ru

В последние годы наблюдается тенденция замены классических датчиков тока, работающих на эффекте Холла, на магнитооптические, принцип работы которых основан на эффекте Фарадея. Магнитооптические датчики тока обладают рядом преимуществ, в частности, они являются компактными устройствами, позволяющими с высокой точностью измерять переменные и постоянные токи в широком диапазоне [1]. На данный момент актуальной задачей является повышение чувствительности таких датчиков тока. Одним из способов повышения чувствительности является использование материалов с наибольшей величиной константы Верде. Таким материалом, например, является сульфид европия EuS, на длине волны проходящего света 625 нм его константа Верде равна 0,0089 град/см·Э [2-3].

Однако сульфид европия EuS является сложным для синтеза материалом. Процесс получения EuS – это многоступенчатая технология, требующая применение высоких температур и ядовитых газов [4-5]. В данной работе представлены результаты по получению композита, содержащего частицы сульфида европия EuS, полученного при помощи золь-гель технологии. Кроме того, что золь-гель технология является очень экономичным методом, она позволяет получать EuS без использования высоких температур и ядовитых газов.

В качестве чувствительного элемента датчика тока предлагается использовать композитную структуру, состоящую из частиц сульфида европия EuS, введенных в прозрачную полимерную матрицу из полиметилметакрилата. В ходе работы разработана технология синтеза золь-гель методом и получены экспериментальные образцы сульфида европия EuS. Для контроля состава частиц EuS проводился рентгеноструктурный анализ и исследование люминесценции получаемых образцов. Данные рентгеновской дифракции показали наличие сульфида европия EuS в композите, а исследование спектров люминесценции полученных образцов продемонстрировало характерные сульфиду европия EuS пики.

Список литературы

1. Евстафьев А.И., Ураксеев М.А., Электротехнические и информационные комплексы и системы. № 1, т. 9, 2013;
1. Y. Hasegawa, Chem. Lett. 2013, 42, 27;
2. S. Thongchant, Y. Hasegawa, K. Tanaka, K. Fujita, K. Hirao, Y. Wada, Sh. Yanagida, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003) pp. L 876–L 878;
3. R. Reisfeld, T. Saraidarov, Optical Materials 28 (2006) 64–70;
4. A. Tanaka, H. Kamikubo, M. Kataoka, Y. Hasegawa, T Kawai, Langmuir 2011, 27(1), 104–108.

Расчет и формирование мембран из монокристаллического кремния методом анизотропного жидкостного травления

Малохатко С. В.¹, Житяева Ю.Ю.², Гусев Е.Ю.¹, Агеев О.А.^{1,2}

¹ЮФУ

²НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ

e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru

В настоящее время существует достаточно большое количество датчиков, основным конструктивным элементов которых является мембрана [1, 2]. Геометрические параметры мембраны определяются необходимостью обеспечения функциональных характеристик в зависимости от области применения устройства. Современное развитие приложений, использующих ультразвуковую визуализацию, предполагает интеграцию электронной системы обработки не с единичным элементом, а с матрицей миниатюрных мембран [1, 2]. Таким образом, актуальной задачей является разработка технологически простых способов изготовления матриц мембран с относительно широким диапазоном геометрических параметров.

Цель работы заключается в формировании методом анизотропного жидкостного травления массива мембран из монокристаллического кремния толщиной 30-50 мкм с латеральными размерами от 100 до 1000 мкм.

В качестве подложки использовали пластину из монокристаллического кремния КЭФ (100) толщиной 320 мкм. Затем на обеих сторонах подложки формировали маскирующее оксидное покрытие в два этапа: термическое окисление (640 нм) и плазмохимическое осаждение (1 мкм) [2]. Геометрические размеры полей фотошаблона рассчитывали с помощью программ MathCAD и ACES. Топологический рисунок в маскирующее покрытие переносили методом контактной фотолитографии. Анизотропное травление монокристаллического кремния проводили в 30% растворе гидроксида калия при температуре 70°C на глубину 270-290 мкм.

Расчетные и экспериментальные значения массивов квадратных окон в маскирующем покрытии составили 500-1400 мкм. Экспериментально установлено, что скорость травления монокристаллического кремния в направлении <100> находилась в диапазоне 1,2-1,8 мкм/мин, что коррелирует с [3]. В результате изготовлен массив мембран из монокристаллического кремния толщиной 30-50 мкм с латеральными размерами 100-1000 мкм и определены оптимальные условия его формирования. В дальнейшем планируется исследовать резонансные частоты сформированных мембран.

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации технологического процесса изготовления датчиков мембранного типа, использующих в качестве основного материала монокристаллический кремний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-11019 мк) с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

Список литературы

1. Griggio F., Demore C.E.M., Kim H., Gigliotti J., Qiu Y., Jackson T.N., Tutwiler R.L., Cochran S., Trolrier-McKinstry S.E., Micromachined diaphragm transducers for miniaturised ultrasound arrays, IEEE International Ultrasonics Symposium, 1-4, 2012.
2. Нанотехнологии в микроэлектронике / Под ред. О.А. Агеева, Б.Г. Коноплева. М.: Наука, 2019. 511 с.

3. Kirt R.W., Muller R.S., Etch rates for micromachining processing, Journal of microelectromechanical systems, vol. 5 (4), 256-269, 1996.

Номер проекта РФФИ: 18-29-11019 МК

High-frequency monolayer graphene conductivity equivalent circuit and Zitterbewegung

Ктиторов С. А.¹, Фирсова Н.Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ktitorov@mail.ioffe.ru

Characteristic features of the monolayer graphene make it extremely promising object of a study. One of the interesting effects is the intriguing Zitterbewegung (ZB) (or the trembling motion from German) of the Dirac electrons in graphene, which is the non-relativistic analog of the predicted by E. Schrödinger phenomenon for the relativistic electrons in the free space. It is considered here in relation to the high-frequency complex conductivity of the monolayer graphene. The frequency dispersion of this conductivity is modeled by the equivalent circuit formed by a set of LC oscillators. It was shown by E. Schrödinger that ZB was a fast oscillating motion of elementary particles, in particular electrons that obey the Dirac equation in the free space. ZB phenomenon was explained as a result of analysis of the wave packet solutions of the Dirac equation for electrons. It was concluded that the interference between the positive and negative energy states produced what appeared to be a fluctuation (at the speed of light) of the position of an electron around the mean value with the frequency f . A connection between the Zitterbewegung of the conductivity electrons wave packet formed by the Fermi-Dirac distribution and the high-frequency complex conductivity of graphene is established. Thus we have found that the electromagnetic resonance properties of the monolayer graphene can be simulated by the set of the equivalent oscillatory circuits. This is useful in order to give illustrativeness to electromagnetic processes that is particularly important for incorporation of graphene into the electronic systems. It is shown that the analyzed formula for the high-frequency monolayer graphene complex conductivity assumes a transparent physical picture: the first term is the Drude inductive reactance, the second term presents the parallel connected to this inductance set of (parallel connected) series LC oscillators with relative contribution of which is determined by the weight function k^{-1} . Thus, we have an infinite network comprising an inductivity L and an infinite continuum number of oscillators (the series oscillatory circuits) with inductivity L and capacity C . Above the threshold, there exists definitely an oscillator with the resonance frequency f coinciding with f_{ZB} . As a result of this resonance, an active resistance appears in the monolayer graphene for $k > k_{ZB}$. So the nature of the active resistance of the monolayer graphene is ZB.

Влияние времени электрохимического анодного травления на морфологию поверхности окисленного фосфида индия

Спивак Ю. М.¹, Гребенщикова Е.А.², Чернов Е.А.¹, Самсонов В.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: ymkanageeva@yandex.ru

Формирование оксидного покрытия на поверхности фосфида индия является актуальным при создании на его основе приборных структур, таких как МОП-элементы, структуры на основе диодов Шоттки и др. Особенно это актуально для устройств, работающих при повышенных температурах, т.к. анодный оксид на пластинах из фосфида индия позволяет улучшить рабочие характеристики прибора: повысить напряжение отсечки, уменьшить обратные токи, снизить шумы и др. Технологически простым, гибким и дешевым методом создания оксида является электрохимическое анодное окисление. Однако при анодном окислении фосфида индия на его поверхности может формироваться несколько различных оксидных фаз (In_2O_3 , P_2O_5 и InPO_4) [1, 2]. Влияние технологических условий анодирования на фазовый состав оксидных фаз в настоящее время остается дискуссионным.

Методы на основе атомно-силовой микроскопии являются эффективными не только при детальном исследовании морфологии поверхности, но позволяют качественно исследовать различные свойства и характеристики поверхности с высоким латеральным разрешением, а при комбинировании нескольких подходов становится возможной диагностика фазового состава многокомпонентных наноструктурированных материалов [3, 4].

Данная работа посвящена исследованию влияния времени анодирования на характеристики поверхности оксидного слоя на поверхности InP . Электрохимическому анодному травлению подвергался монокристаллический фосфид индия (InP) ориентации (100), n-типа, с концентрацией основных носителей $n=10^{16}\text{см}^{-3}$. Варьируемым параметром являлось время анодирования: от 30 сек до 2 мин. Атомно-силовая микроскопия проводилась с использованием зондовой нанолaborатории Интегра Терма (NT-MDT) в контактном режиме. Определены количественные характеристики особенностей поверхности. Обнаружены особенности изменения рельефа поверхности и специфические области при средних временах анодирования, при увеличении времени анодирования морфология поверхности сглаживается.

Список литературы

1. Е.А. Гребенщикова, В.В. Евстропов, Н.Д. Ильинская и др. ФТП, том 49, вып. 3, 376-378, 2015 г.
2. Korotchenkov G.S., Bejan N.P. Correlation between chemical composition of transitional layer and electrical-physical properties of Me-n-InP Schottky barriers// IEEE – 1998 – p.301-304.
3. В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, Н. В. Пермяков. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
4. Ю.М. Спивак. В.А. Мошников, «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования», № 1, 97-102, 2010.

Магнитокалорический эффект в сплавах на основе Ni-Mn-In, подвергнутых термобарической обработке

Емельянова С. М.¹, Дьячкова Т.В.²Гютюнник А.П.²Зайнулин Ю.Г.²Марченков В.В.^{1,3}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева

²Институт химии твердого тела

³УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

e-mail: emelyanova@imp.uran.ru

Электрические и магнитные свойства сплава тесно связаны с состоянием его микроструктуры. В частности, формирование нанокристаллической структуры в материале чаще всего достигается путем применения различных видов интенсивной пластической деформации: равноканального углового прессования и интенсивной пластической деформации кручением. Изменить структурное состояние сплава можно также с помощью термобарической обработки (ТБО) – обработки материалов в условиях высокой температуры (до 2000 К) и большого квазигидростатического давления (до 10 ГПа).

Возможность практического применения в качестве рабочего тела в магнитных рефрижераторах обуславливает повышенный интерес к материалам, обладающим большим магнитокалорическим эффектом (МКЭ). С учетом вышесказанного, объектами исследования в настоящей работе выбраны сплавы Гейслера Ni_{47-x}Mn_{42+x}In₁₁ (x = 0; 1; 2), поскольку в сплавах этой системы наблюдается достаточно большой МКЭ [1]. Целью данной работы было исследование влияния ТБО на их физические свойства: электросопротивление, намагниченность и магнитокалорический эффект.

Исследованные сплавы были приготовлены в дуговой печи в атмосфере аргона, полученные слитки отжигались при температуре 1100 К в течение 24 часов с последующим охлаждением с печью. Элементный анализ, проведенный с помощью сканирующего электронного микроскопа (Inspect F, FEI Company), показал, что химический состав образцов с хорошей точностью соответствует заданному. Рентгеноструктурные исследования, выявили присутствие во всех образцах структуры L2₁. ТБО проводили на гидравлическом прессе ДО-137А со стандартной камерой высокого давления типа «тороид» при давлении P = 9 ГПа и температуре T = 1373 К. Измерения электросопротивления выполнялись стандартным четырехзондовым методом в интервале температур от 4.2 до 300 К. Намагниченность измерялась на СКВИД-магнетометре (MPMS XL7, Quantum Design) при температурах от 4.2 до 330 К в магнитных полях до 10 кЭ.

В результате проведенных исследований установлено, что применение ТБО существенно изменяет микроструктуру сплава, величину и вид температурных зависимостей электросопротивления. Так, для сплава Ni₄₅Mn₄₄In₁₁ значение электросопротивления возросло с 1.22 мОм·см до 6.6 мОм·см, а вид температурной зависимости изменился с «полупроводникового» на «металлический». Значение намагниченности насыщения при T = 4.2 К возросло с 41.6 эме/г до 60.6 эме/г, а коэрцитивная сила – с 250 Э до 600 Э. В сплавах Ni₄₇Mn₄₂In₁₁ и Ni₄₆Mn₄₃In₁₁ проведение ТБО приводит к снижению величины ΔS, однако при этом наблюдается расширение температурного интервала (до 50 К), в котором значение величины ΔS принимает максимальное значение. Для сплава Ni₄₅Mn₄₄In₁₁ величина ΔS до и после ТБО практически не изменилась (ΔS ≈ 3,5 Дж/(кг·К)), но произошло значительное смещение ее максимума по температурной шкале с 200 К до 300 К. Таким образом, термобарическую обработку можно рассматривать в качестве эффективного инструмента не только для изменения величины ΔS, но и для изменения ширины температурного интервала, в котором данная величина принимает наибольшее значение.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин», № АААА-А18-118020290104-2; тема «Новые функциональные материалы для перспективных технологий: синтез, свойства, спектроскопия и компьютерное моделирование», № АААА-А19-119031890025-9) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-02-00739).

Список литературы

1. А.К. Pathak, М. Khan, I. Dubenko, S. Stadler, N. Ali, Applied Physics Letters 90, 262504 (2007)

Номер проекта РФФИ: 18-02-00739

Технологические аспекты получения функциональных материалов, армированных нановолокнами

Скворцова А.Н.¹, Марков М.А.¹, Быкова А.Д.¹, Красиков А.В.¹, Перевислов С.Н.², Беляков А.Н.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

²СПбГТИ (ТУ)

e-mail: bykova.ad@gmail.com

Развитие технологии современного машиностроения требует разработки новых перспективных материалов. Новые материалы должны надежно работать в условиях высоких температур и арктического холода, при больших давлениях и в глубоком вакууме, в различных агрессивных средах. Применение легких композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов позволит снизить массу конструкции при сохранении эксплуатационных характеристик и уменьшении стоимости изделия. Для создания таких материалов разработана технология получения функционально – градиентных покрытий композиционных материалов на основе алюминий-углеродных нановолокон (АI – УНВ).

Углеродные нановолокна в работе получены методом газофазного синтеза непосредственно на поверхности алюминиевого порошка [1, 2]. Путем изменения концентрации катализатора Ni были получены композиционные материалы, содержащие от 0,63 до 2,2 мас. % углерода. Синтезированные порошки были изучены методом сканирующей электронной микроскопии, установлено, что углеродный продукт имеет трубчатую конструкцию и практически полностью покрывает частицы матрицы. Углеродные структуры имеют диаметр от 50 до 100 нм и длину более 1 мкм.

Композиционные порошковые материалы с содержанием 0,5, 1 и 1,5 мас.% углеродных нановолокон были использованы для создания покрытий путем холодного газодинамического напыления (ХГДН) на подложку из стали. Предварительно необходимо порошок измельчить путем шарового измельчения в планетарной мельнице на 400 об/мин в течении 20-30 минут. Методом механолегирования достигается максимальная дисперсия УНВ в матрицу алюминия с увеличением адгезионных и трибологических свойств покрытий.

В работе были исследованы компактные материалы из алюминиевого порошка с содержанием 1 % масс. УНВ, полученные методом холодного одноосного прессования и спекания при давлении 600 МПа и горячего прессования с последующим спеканием при температурах 720 и 980 °С и давлении 5 ГПа. Обнаружено, что при термической обработке после прессования микроструктура образцов имеет более равноосные зерна в

сравнении с холодным прессованием. Компактирование при горячем прессовании 980 °С приводит к разрушению углеродных волокон и образованию карбидных связей (Al_4C_3) [3].

Наиболее перспективным является материал, полученный после горячей экструзии заготовок из порошковых материалов с углеродными нановолокнами.

Разработанные технологические подходы введения углеродных нановолокон имеют реальную перспективу их практического использования, в том числе в тяжело нагруженных узлах трения судового оборудования и арматуры, элементов корпусных конструкций современного автомобилестроения, элементов систем управления, подвергающихся интенсивным механическим воздействиям, агрессивным химическим реагентам и биоповреждениям. Благодаря своим уникальным физико – химическим свойствам, даже небольшие добавки углеродных нановолокон в различные металлические матрицы позволит значительно улучшить механические и антикоррозионные свойства.

Список литературы

1. A.I. Rudskoy, Koltsova T.S., Tolochko O.V., Mikhailov V.G., Shakhov F.M. // Metal Science and Heat Treatment. 2014. V55. N 9-10, P. 564-558.
2. L.I. Nasibulina, Joentakanen T., Nasibulin A.G., Kauppinen E.I., Koltsova T.S., Tolochko O.V., Malm J.E.M., Karppinen M.J. // Carbon. 2010. V. 48 N 15. P. 4559-4562.
3. Скворцова А.Н., Лычева К.А., Возняковский А.А., Кольцова Т.С., Ларионова Т.В. // Materials Physics and Mechanics. 2016. V.1. N 25. P. 30-36.

Номер проекта РФФИ: 20-21-00024

Диэлектрическая релаксация в тонких слоях диоксида ванадия

Смирнова Л.М.¹, Кастро Р.А.

¹РГПУ им. А. И. Герцена

e-mail: lidasmirnova678@mail.ru

Целью научного исследования является изучение диэлектрических свойств тонких пленок диоксида ванадия. Выявление особенностей фото- и термо-поляризационных процессов при фазовом переходе в тонких пленках исследуемого материала.

Основными задачами работы являются:

1. Анализ данных особенностей строения и физических свойств исследуемого материала;
2. Получение нелегированных тонких пленок диоксида ванадия;
3. Исследование диэлектрических спектров нелегированных пленок диоксида ванадия;
4. Выявление откликов исследуемого материала на внешние факторы воздействия.

Диоксид ванадия в ряду оксидов металлов занимает особое место, поскольку ванадий является элементом с недостроенной d-оболочкой, и поэтому для него характерно наличие сильных корреляционных эффектов. Тонкопленочные оксидированные структуры находят широкое применение в электронике и оптоэлектронике. А основе таких приборов как термореле, ограничителей световых потоков используется фазовый переход металл – диэлектрик, совершающийся в нанокристаллических слоях при критической температуре

Тс. Способность управления данной температурой может вывести использование исследуемого материала в электронике и оптоэлектронике на новый уровень.

Методы диэлектрической спектроскопии позволяют проводить анализ электрофизических свойств как легированных, так и нелегированных пленок оксидов ванадия. К тому же, данный метод является не разрушающим. Алгоритм проведения анализа сводится к получению температурных зависимостей, регистрации частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь для разных температур с последующим анализом в рамках общепринятых существующих моделей диэлектрической релаксации в неупорядоченных системах. Диэлектрическая спектроскопия позволяет получить раздельную информацию о различных группах зерен, отличающихся своими физическими свойствами.

В результате комплексных исследований нанокристаллических пленок диоксида ванадия, включая в первую очередь исследования диэлектрических спектров с помощью новейшего и сверхчувствительного оборудования, проведен сравнительный анализ их свойств. Выявлены общие и отличительные свойства пленок, а также выполнена интерпретация полученных результатов на базе представлений о диоксиде ванадия как сильно коррелированном материале.

Список литературы

1. Олейник А.С. Плёнки диоксида ванадия в устройствах индикаторной техники и микроэлектроники: автореф. дис. д.ф.-м.н.: 05.27.01 / Олейник Анатолий Семенович. – Саратов, 2008 г. – 36 с.
2. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань 2008. 112 стр.
3. Ильинский А.В., Кастро Р.А., Никулин Е.И., Шадрин Е.Б // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 6. С. 877-882.

Номер проекта РФФИ: 20-07-00730

Анизотропия локального анодного окисления в тонких слоях MoSe_2

Бородин Б.Р.¹, Дунаевский М.С.^{1,2}, Бенимецкий Ф.А.², Алексеев П.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: brborodin@gmail.com

В последние годы дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) являются одними из самых исследуемых материалов. Такой интерес к ним связан с наличием ряда уникальных свойств, таких как перестраиваемая в широких пределах запрещенная зона, высокая энергия связи экситонов, высокое поглощение света (даже в монослоях) и многими другие свойствами [1–3]. Все это открывает возможность создания многообещающих устройств электроники и оптоэлектроники. Особенно интересной возможностью представляется комбинация нескольких слоистых материалов и формирование ван-дер-Ваальсовых гетероструктур. Однако, как показывают недавние исследования, ДПМ материалы имеют сильную анизотропию свойств как в направлении перпендикулярном слоям, так и внутри одного слоя [4]. Различная ориентация слоев в пространстве оказывает влияние на работу таких устройств. Например, работе [5] показано влияние ориентации слоев по направлениям («zigzag» или «arm-chair») на фотолуминесценцию MoSe_2 - WSe_2 гетероструктуры

для различных поляризаций. Таким образом, при создании и исследовании подобных устройств следует учитывать их кристаллографические направления. Поскольку данные материалы часто являются атомарно тонкими, для определения кристаллографии используется Рамановское рассеяние или сканирующая туннельная микроскопия. Однако мы сообщаем, что кристаллографические направления также могут быть определены в рамках методики локального анодного окисления. Целью данной работы было исследование анизотропии локального анодного окисления MoSe_2 и определение ориентации окисляемого слоя в плоскости.

Эксперимент производился на приборе Ntegra Aura (NT-MDT) с использованием Si и W_2C (NT-MDT) зондов с диаметром острия 10-30 нм в условиях контролируемой влажности. Тонкие слои MoSe_2 , полученные микромеханическим расслоением, переносились на Si-подложку, покрытую золотом. Далее на выбранных участках производилось локальное анодное окисление (ЛАО). Процесс ЛАО осуществляется следующим образом. В условиях повышенной влажности ($\text{RH} \approx 60\%$) на зонд подается импульс напряжения. Ток, протекающий через структуру, вызывает разделение воды и электрохимическое окисление области под зондом [6]. В ходе экспериментов проявилась анизотропия этого процесса по кристаллографическим направлениям. Она приводила к образованию окисленных областей в виде равносторонних треугольников, а не кругов, как можно было бы ожидать. Мы считаем, что такое окисление происходит по границе «zigzag», а расположение треугольника показывает ориентацию слоя в плоскости и может показывать кристаллографические направления.

Таким образом, в работе было исследовано локальное анодное окисление тонких слоев MoSe_2 . Показана анизотропия этого процесса по направлениям. Результаты работы позволяют рассматривать локальное анодное окисление, как один из возможных методов определения ориентации тонких слоев ДПМ в плоскости, а также их однородности на участках большой площади.

Список литературы

1. Lundt, N. *et al.* Monolayered MoSe_2 : a candidate for room temperature polaritonics. *2D Mater.* 4, 015006 (2016).
2. Yun, W. S., Han, S., Hong, S. C., Kim, I. G. & Lee, J. Thickness and strain effects on electronic structures of transition metal dichalcogenides: 2H-M X_2 semiconductors ($\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$; $\text{X}=\text{S}, \text{Se}, \text{Te}$). *Phys. Rev. B* 85, 033305 (2012).
3. Tonndorf, P. *et al.* Photoluminescence emission and Raman response of monolayer MoS_2 , MoSe_2 , and WSe_2 . *Opt. Express* 21, 4908–4916 (2013).
4. Chenet, D. A. *et al.* In-plane anisotropy in mono- and few-layer ReS_2 probed by Raman spectroscopy and scanning transmission electron microscopy. *Nano Lett.* 15, 5667–5672 (2015).
5. Ullah, F. *et al.* Growth and simultaneous valleys manipulation of two-dimensional MoSe_2 - WSe_2 lateral heterostructure. *ACS Nano* 11, 8822–8829 (2017).
6. Alekseev, P. *et al.* Local Anodic Oxidation of Graphene Layers on SiC. *Tech. Phys. Lett.* 44, 381–383 (2018).

Микроструктура и морфология двумерных массивов квантовых точек Ge в матрице Si/Al₂O₃

Сокура Л. А.¹, В.Н. Неведомский¹, М.В. Байдакова¹, А.А. Левин¹, А.В. Белолипецкий¹, И.Н. Ясиевич¹, А.В. Ершов², Н.А. Берг¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НГУ им. Н.И. Лобачевского

e-mail: sokuralily@mail.ru

Последнее десятилетие активно изучаются квантовые частицы типа «ядро/оболочка», поскольку в таких структурах можно управлять величиной эффективной запрещенной зоны путем изменения не только размеров самих нанокристаллов, но и их состава [1-2]. Наибольший интерес вызывают структуры с нанокристаллами Si-Ge в диэлектрической матрице. Первые результаты по экспериментальному получению квантовых точек Ge/Si «ядро/оболочка» в матрице из аморфного оксида алюминия методом магнетронного распыления представлены в [3-4].

В данной работе исследуются многослойные нанопериодические структуры, полученные на Si подложке методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Серии исследуемых образцов содержали два набора периодов нанослоев Al₂O₃/Ge и Al₂O₃/Si/Ge/Si. Эти периоды в образцах повторялись до 24 раз. Толщина нанослоев Ge и разделительных диэлектрических слоёв Al₂O₃ формировалась одинаковой и составляла 3 и 5 нм, соответственно, тогда как толщина барьерных нанослоев Si составляла 0 (образцы Al₂O₃/Ge), ~ 1 и 2 нм (образцы Al₂O₃/Si/Ge/Si). Морфология и микроструктура двумерных массивов квантовых точек Ge в оболочке Si и матрице Al₂O₃ до и после отжига в вакууме при температурах 700-900 °С исследовались методами рентгеновской рефлектометрии (РР) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Кривые РР, полученные от образцов, характерны для периодических многослойных плёнок и содержат Брэгговские максимумы вплоть до 4-ого порядка, отвечающие периоду слоёв, и толщинные осцилляции, соответствующие общей толщине плёнки. Наилучшее качество РР кривых показывает образец 16x(Al₂O₃/Si/Ge/Si) с толщиной слоя Si 2 нм. Рефлектограммы других образцов имели расщепление и уширение Брэгговских максимумов, отвечающее нарушению периодичности Ge слоёв вследствие недостаточной толщины барьерных Si слоёв. Формирование Ge точек начинается после отжига при 800 °С и явно выражено при 900 °С отжиге. В результате слияния Ge в точки интенсивность максимумов от периодичных слоёв заметно падает при сохранении толщинных осцилляций. Наблюдаемые изменения говорят о резком изменении планарности Si нанослоёв. Для образца 24x(Al₂O₃/Ge), отожжённого при 900 °С, на рефлектограмме наблюдается только один Брэгговский максимум и толщинные осцилляции, что говорит о резких структурных изменениях в узком диапазоне температур в этом образце и согласуется с результатами измерений комбинационного рассеяния света [5].

ПЭМ исследования образцов показали, что после отжига в структурах наблюдаются кристаллические включения Ge, окруженные аморфной матрицей. Размеры и количество наночастиц Ge определяются температурой отжига. После отжига в слоях Ge обнаруживаются частицы овальной формы, размеры толщиной ~ 5 нм и латеральным размером до 10 нм. Дифракционная картина отожженных образцов также показала наличие в аморфной матрице мелких кристаллитов с произвольной ориентацией.

Полученные данные будут способствовать оптимизации технологии получения квантовых точек Ge/Si "ядро/оболочка" в матрице из аморфного оксида алюминия методом электронно-лучевого испарения в вакууме.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 20-32-70048. Структурные исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Список литературы

1. Ю.Б. Болховитянов, О.П. Пчеляков, С.И. Чикичев. УФН, 171, 689 (2001);
2. E.M.F. Vieira, J. Martín-Sánchez, A. G. Rolo, A. Parisini, M. Buljan, I. Capan, E. Alves, N.P. Barradas, O. Conde, S. Bernstorff, A. Chahboun, S. Levichev, M.J.M. Gomes. J. Appl. Phys., 111, 104323 (2012);
3. M. Buljan, N. Radić, J. Sancho-Paramon, V. Janicki, J. Grenzer, I. Bogdanović-Radović, Z. Siketić, M. Ivanda, A. Utrobičić, R. Hübner, R. Weidauer, V. Valeš, J. Endres, T. Car, M. Jerčinović, J. Roško, S. Bernstorff, V. Holy. Nanotechnology, 26, 065602 (2015);
4. N. Nekić, J. Sancho-Parramon, I. Bogdanović-Radović, J. Grenzer, R. Huebner, S. Bernstorff, M. Ivanda, M. Buljan. Nanophotonics, 6, 1055 (2017);
5. О.М. Сресели, Н.А. Берг, В.Н. Неведомский, А.И. Лихачев, И.Н. Ясиевич, А.В. Ершов, А.В. Нежданов, А.И. Машин, Б.А. Андреев, А.Н. Яблонский. ФТП, 54, 129 (2020).

Номер проекта РФФИ: 20-32-70048

Создание виртуального прибора для обработки результатов сорбционных измерений при исследовании наностержней оксида цинка

Мараева Е. В.¹, Пермяков Н.В.¹, Кедрук Е.Ю.², Гриценко Л.В.², Абдуллин Х.А.³

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²Satbyev University, Казахстан

³Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан

e-mail: evmaraeva@etu.ru

Сорбционные методы анализа, как правило, используются для характеристики пористых материалов на мезопористом (диаметр 2-50 нм), а также микропористом (диаметр ≤ 2 нм) уровнях. Тем не менее, такая характеристика материала, как удельная поверхность, определяемая на основе анализа изотерм адсорбции инертных газов, в ряде случаев характеризует не только развитость поверхности, обусловленную пористой структурой материала, но и поверхность частиц раздробленной фазы дисперсной системы.

В этом случае данные сорбционного исследования позволяют проводить экспресс-оценку размеров наночастиц, при этом сорбционные методы анализа имеют некоторые преимущества по сравнению с другими методами. Среди них – возможность исследования большого объема материала в один прием (в отличие от локальных методов, где анализируются отдельные участки образца и результаты исследования усредняются), а также

возможность исследования материалов с большой шероховатостью, где другие методы анализа поверхности неприменимы или нежелательны.

Целью настоящей работы являлось создание виртуального прибора (компьютерной программы) для обработки результатов сорбционного анализа наноматериалов, в том числе для оценки размеров наночастиц на основе значения удельной поверхности. Полученные результаты оценки сопоставлялись с данными растровой электронной микроскопии. В качестве объекта исследования были выбраны выбранны фотокалалитически активные образцы оксида цинка [1], полученные при отжиге дигидрата ацетата цинка $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в муфельной печи. В процессе синтеза варьировались температура и продолжительность отжига. Для разработки программы использовалась среда LabView.

Определение размеров частиц проводилось в 2 стадии. Первая стадия заключалась в исследовании процессов адсорбции азота на выбранном наноматериале и определение удельной поверхности по методу Брунауэра, Эммета, Теллера (БЭТ). Исследования проводились на приборе Сорби MS, позволяющему исследовать параметры пористой структуры наноматериалов, в том числе определять удельную поверхность.

На второй стадии по значению удельной поверхности определялся средний размер частиц в рамках модели, что частицы являются наностержнями, о чем свидетельствовали данные растровой электронной микроскопии, с заданным соотношением длины и диаметра L/D. Соотношение L/D выбиралось на основе обработки экспериментальных данных растровой электронной микроскопии, индивидуально для каждой серии образцов, полученных при варьировании режимов отжига.

Расчет диаметра наностержней проводился по формуле:

$$D = \frac{4 \cdot n + 2}{d \cdot n \cdot S_{\text{BET}}},$$

где n – аспектное отношение, d- плотность, S_{BET} – удельная поверхность материала.

Разработанная программа позволяет автоматизировать процесс расчета размеров наностержней. Входными данными для анализа являются значение удельной поверхности образца, полученное методом БЭТ, плотность материала и аспектное отношение наностержней. Разработанная программа дополняет виртуальный прибор [2], предназначенный для оценки фрактальной размерности на основе данных сорбционного анализа.

Список литературы

1. Уалиханов Р.Е., Кедрук Е.Ю., Гриценко Л.В., Чичеро Дж., Абдуллин Х.А., Фотокалалитические свойства наноструктурированного оксида цинка, Вестник КазНИТУ, том 133, № 3, 542-548, 2019.
2. E. V. Maraeva, N. V. Permiakov, K. N. Khalugarova, E. V. Abrashova. Determination of the fractal dimension of mesopores in metal-oxide structures obtained via sol-gel synthesis, Journal of Physics: Conference Series, vol. 1400, 055021, 2019.

Первая экспериментальная формула ширины запрещенной зоны AlGaAs, обладающего вюрцитной кристаллографической фазой

Резник Р.Р.¹

¹СПБАУ РАН

e-mail: moment92@mail.ru

В настоящее время полупроводниковые материалы являются основой цифровых технологий. AlGaAs является одним из наиболее распространенных полупроводниковых материалов, используемых сегодня в солнечных элементах, лазерах, фотоприемниках, светодиодах и многих других приложениях. Например, Philips использует AlGaAs для генерации света красного и желтого диапазонов длин волн в светодиодах. Как и большинство полупроводников, AlGaAs может двумя типами кристаллической структуры – кубической и вюрцитной. И, как и большинство полупроводников, кубическая кристаллическая структура является наиболее распространенной, поэтому ее физические, электронные и оптические свойства хорошо известны. Тем не менее, полупроводники, обладающие кристаллической структурой вюрцита, могут обладать уникальными свойствами для современных приложений. Например, вюрцитный GaP обладает прямой запрещенной зоной и, таким образом, эффективно генерирует излучение зеленого диапазона. Следовательно, он может существенно повысить эффективность зеленых светодиодов, КПД которых на сегодняшний день намного ниже своего теоретического максимума. В свою очередь, на сегодняшний день, информация о вюрцитном AlGaAs в литературе практически не представлена. Важно отметить, что запрещенная зона вюрцита AlGaAs не была предсказана ни теоретически, ни экспериментально. Авторами настоящей работы методом молекулярно-пучковой эпитаксии был синтезирован ряд AlGaAs нитевидных нанокристаллов, обладающих вюрцитной кристаллографической фазой, с мольной долей Al в двёрдом растворе в диапазоне от 0,1 до 0,6, и в результате сравнительного структурного и оптического анализа впервые экспериментально получена формула для запрещенной зоны вюрцитного AlGaAs. Более того, было обнаружено, что интенсивность спектров фотолюминесценции от таких структур крайне высока, а время жизни носителей в структурах короткое. Эти факты позволяют сделать предположение о том, что AlGaAs, обладающий вюрцитной кристаллографической фазой, является материалом с прямой запрещенной зоной.

Работа была выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-32-00768 мол_a.

Номер проекта РФФИ: 18-32-00768 мол_a

Сравнительный анализ оптических и физических свойств InAs и InGaAs квантовых точек

Салий Р. А.¹, Минтаиров М.А.¹, Минтаиров С.А.¹, Надточий А.М.¹, Калюжный Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: r.saliy@mail.ioffe.ru

Сегодня получение квантовых точек (КТ) различными эпитаксиальными методами – это перспективное и быстроразвивающееся направление полупроводниковой нанотехнологии [1]. Одной из самых распространенных и изученных КТ систем для приборов на основе A^3B^5 остается $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ КТ, в которых значения x варьируются от 0,5 до 1. Такие КТ применяются в лазерах для получения приборов с низкой пороговой плотностью тока, высокой температурной стабильностью и более высоким усилением [2, 3]. Также изучаются подходы, которые позволят использовать такие КТ для улучшения фотоэлектрических параметров полупроводниковых фотопреобразователей [4]. Главными задачами при эпитаксиальном выращивании КТ, самоорганизующихся в режиме Странски-Крастанова, являются получение бездефектных, высокоплотных островков с предсказуемыми физическими параметрами, в частности, с высокой однородностью островков по размерам. Различные измерительные методы, такие как просвечивающая электронная микроскопия и атомно силовая микроскопия сегодня позволяют достаточно точно определять физические параметры КТ, однако являются ресурсоемкими и не позволяют получить информацию об оптических свойствах формируемых объектов. Метод фотOLUMИнесценции (ФЛ) в данном случае становится быстрым и качественным способом оценки физических и оптических свойств КТ, позволяя, в зависимости от полученных данных, корректировать параметры слоев КТ, не прибегая к микроскопическим исследованиям.

Целью данной работы было сравнение оптических и физических параметров слоев InAs и $In_{0,8}Ga_{0,2}As$ КТ, встроенных в матрицу GaAs, путем анализа спектров ФЛ. Для этого методом металлорганической газофазной эпитаксии были выращены гетероструктуры, представлявшие собой GaAs волновод в обкладках AlGaAs широкозонных барьеров и с КТ в активной области. Исследовались два типа КТ – InAs и $In_{0,8}Ga_{0,2}As$, для формирования которых осаждалось 1.7 и 2.0 монослоя затравочного материала соответственно. Затем, после прерывания роста, они зарацивались закрывающим слоем GaAs толщиной 5 нм.

Спектры ФЛ были измерены в нескольких режимах. При пониженной температуре в 20К для обоих типов КТ были получены спектры ФЛ, измеренные в широком диапазоне плотностей накачки лазера (от 0,3 до 150 мВт). Также были проведены температурные измерения ФЛ в диапазоне от 20 до 300К. Полученные спектры обоих типов КТ имели четыре ярко выраженных пика. Два пика на 840 и 930 нм отражали вклады в излучательную рекомбинацию матрицы GaAs и смачивающего слоя соответственно. Характеризация поведения двух оставшихся пиков в зависимости от температуры и уровня накачки лазера позволила сделать несколько выводов о физических параметрах и качестве формируемых КТ. Показано, что оба типа КТ обладают свойством бимодальности, при котором формируются две доминирующие популяции КТ с разными физическими размерами. Спектральные пики от КТ были аппроксимированы двумя кривыми Гаусса, отражающими вклады обеих популяций. Установлено, что в случае материала InAs преобладает популяция малых КТ. В случае $In_{0,8}Ga_{0,2}As$ преобладает популяция относительно больших островков, что коррелирует с увеличением затравочного материала, необходимого для формирования КТ. Построены зависимости положения пиков от температуры и выполнена их

аппроксимация при помощи формулы Варшни для объемных материалов [5]. Анализ зависимостей положения пиков ФЛ от температуры позволил установить, что $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ КТ демонстрируют лучшую равномерность по физическим размерам и содержат меньше дефектных кластеров и коалесцированных КТ, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации. Таким образом, было показано, что слои $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ КТ являются менее напряженными, по сравнению с InAs КТ и могут быть эффективно использованы, например, в технологии многократного складирования КТ в активной области полупроводниковых приборов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (соглашение 18-08-01281).

Список литературы

1. Wu J. et al., Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells, *Journal of Physics D Applied Physics*, 48, 363001, 2015.
2. Wu J. et al., Electrically pumped continuous-wave 1.3- μm InAs/GaAs quantum dot lasers monolithically grown on Si substrates, *IET Optoelectronics*, 8(2), 20-24, 2014.
3. Kageyama T. et al., Long-wavelength quantum dot FP and DFB lasers for high temperature applications, *Proc. Nov. In-Plane Semicond. Las. XI*, 8277, 2012.
4. Luque A. and Marti A., Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels, *Physical review letters*, 78(26), 5014-5017, 1997.
5. Varshni Y. P., Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, *Physica*, 34, 149, 1967.

Номер проекта РФФИ: 18-08-01281

Исследование оптических и структурных свойств трехмерных островков InGaPAs , сформированных методом замещения элементов пятой группы

Андрюшкин В.В.¹, Гладышев А.Г.^{1,2}, Бабичев А.В.^{1,2}, Новиков И.И.^{1,2}, Карачинский Л.Я.^{1,2}, Егоров А.Ю.¹

¹Университет ИТМО

²ООО «Коннектор Оптик»

e-mail: vvandriushkin@itmo.ru

В настоящее время большой интерес представляет создание источников одиночных фотонов и матричных микроизлучателей. Наилучшими кандидатами на роль активных областей для таких излучателей являются квантовые точки (КТ). Однако, в отличие от традиционных лазерных применений, в которых массивы КТ должны иметь высокую поверхностную плотность, к активным областям в указанных выше областях применения предъявляется противоположное требование – малая плотность КТ (менее $1 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$) [1]. Использование специальных технологических режимов эпитаксиального роста позволяет уменьшить плотность КТ InAs с типичного значения $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $\sim 1 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$.

В настоящей работе предложен новый метод формирования трехмерных квантово-размерных объектов (КТ) пониженной плотности путем упругой трансформации слоя InGaPAs на поверхности GaAs , формирующегося во время замещения фосфора в

эпитаксиальном слое InGaP на мышьяк, при выдержке этого слоя в потоке As при температурах 520-535°C. Для проведения исследований на подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) были изготовлены экспериментальные образцы гетероструктур, состоящие из буферного слоя GaAs, области сбора носителей заряда на основе GaAs толщиной 200 нм, ограниченной со стороны подложки и поверхности барьерными слоями AlGaAs толщиной 100 нм, и покрывающего слоя GaAs толщиной 5 нм. В центр области сбора носителей заряда помещался слой InGaP, решеточно-согласованный с подложкой, который трансформировался в массив трехмерных островков InGaPAs в потоке As во время остановки процесса МПЭ. Исследовалось влияние толщины слоя InGaP, температуры подложки и длительности выдержки в потоке мышьяка на оптические и структурные свойства формирующихся трехмерных островков.

На спектрах фотолюминесценции (ФЛ) помимо пиков от GaAs присутствуют пики в области 953-979 нм, соответствующие излучению от трехмерных островков InGaPAs. Длина волны максимума спектра ФЛ для образца, в котором слой InGaP толщиной 2 нм трансформировался при температуре 520°C в течение 5 минут, составила 973 нм. Ширина пика в спектре ФЛ, соответствующего излучению от трехмерных островков InGaPAs, измеренная на полувысоте (FWHM) составила 95 мэВ, что говорит о значительном разбросе трехмерных островков по размерам и/или составам. Увеличение температуры выдержки на 15°C приводит к длинноволновому сдвигу длины волны излучения трехмерных островков на 6 нм. При этом улучшается однородность массива островков, о чем свидетельствует уменьшение величины FWHM до 90 мэВ. Увеличение времени выдержки до 10 минут и толщины слоя до 3 нм приводит к коротковолновому сдвигу максимума ФЛ к длине волны 953 нм и увеличению интенсивности ФЛ и расширению пика ФЛ (FWHM = 97 мэВ).

На изображениях, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), отчетливо видны трехмерные островки. Было установлено, что трехмерные объекты имеют овальную форму, вытянутую вдоль направления [1-10]. При этом они часто выстраиваются в линию «один за другим» вдоль того же направления. Стоит также отметить, что вдоль ортогонального направления [110] таких эффектов не наблюдается, т.е. направления [110] и [1-10] не эквивалентны. Можно предположить, что данный факт связан с анизотропией скорости поверхностной диффузии во время выдержки слоя InGaP, которая обусловлена направленностью оборванных связей. На основе анализа ПЭМ изображений проведена оценка плотности трехмерных островков, которая составила 1.3×10^{10} см⁻². Ранее было показано [3], использование трехмерных островков позволяет повысить силу осциллятора, что, наряду с малой плотностью свидетельствует о возможности применения данного типа трехмерных островков для создания активных областей источников одиночных фотонов и матричных микроизлучателей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

Список литературы

1. P. Michler (ed.), *Single semiconductor quantum dots.*, Berlin: Springer, 231, (2009);
2. G. Trevisi, L. Seravalli, P. Frigeri S. Franchi, *Nanotechnology*, 20, (41), p 415607, (2009);
3. J. P. Reithmaier, G. Sek, A. Löffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L. V. Keldysh, V. D. Kulakovskii, T. L. Reinecke, A. Forchel, *Nature*, 432, (7014), p 197 — 200, (2004);

Особенности комбинационного рассеяния света и низкочастотного шума в чипах, изготовленных на основе пленок графена на подложках 4H-SiC

Елисеев И. А.¹, Усиков А.С.^{2,3}, Лебедев С.П.¹, Роевков А.Д.¹, Пузык М.В.⁴, Зубов А.В.³, Макаров Ю.Н.², Лебедев А.А.¹, Шабунина Е.И.¹, Дементьев П.А.¹, Смирнов А.Н.¹, Шмидт Н.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Nitride Crystals Inc., USA

³Университет ИТМО

⁴РГПУ им. Герцена

e-mail: zoid95@ya.ru

Уникальные свойства графена позволяют разрабатывать на его основе различные типы электронных приборов, в частности, био- и газовые сенсоры [1–4]. Изменение сопротивления графенового канала между двумя контактами в чипе биосенсора, при осаждении на него биомолекул, используется для регистрации предельно низких концентраций маркеров различных социально-значимых заболеваний (гепатит, онкология, ВИЧ) на ранней стадии. Для создания таких чувствительных сенсоров необходима воспроизводимая технология роста графена и глубокое понимание как свойств самого материала, так и процессов его взаимодействия с белковыми структурами. Однако, комплекс параметров графеновых пленок, обеспечивающих создание таких сенсоров, не выяснен в полной мере на сегодняшний день.

Целью данной работы являлось изучение свойств чипов на основе пленок монослойного графена с присутствием двуслойных включений, полученных путем термического разложения полуизолирующих подложек 4H-SiC. Для исследования применялся комплекс методик, включающий в себя атомно-силовую микроскопию (АСМ), Кельвин-зондовую микроскопию (КЗМ), комбинационное рассеяние света (КРС), а также исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ), и низкочастотного шума. Совместное использование методик АСМ и КЗМ обеспечивало контроль шероховатости поверхности графенового чипа и оценку распределения толщины слоев графена в той же самой области. Спектроскопия КРС давала информацию о структурном совершенстве пленки графена, величине и типе деформаций в пленке графена, а также концентрации свободных носителей заряда и количестве слоев графена [5–7].

Вид зависимостей спектральной плотности флуктуаций напряжения (S_v) или токового шума (S_i) от частоты в диапазоне 1-10⁴ Гц несет интегральную информацию об особенностях дефектной системы материала [8]. Появление на зависимости участка, не зависящего от частоты, свидетельствует об эффективно работающем единичном дефекте и позволяет оценить его параметры. Изменение показателя формы спектра (γ) в зависимости $S_v(f)$ вида $1/f^\gamma$ от 1 до 2.5 с одновременным увеличением значения S_v указывает на неоднородное распределение механических напряжений [8].

Исследования проводились на чипах, изготовленных из трех пластин графен/4H-SiC. Размер сенсорной площади поверхности графена в чипе составлял 1×1.5 мм². ВАХ всех чипов были линейными. Разброс значений сопротивления на первой пластине составлял 4% при среднем значении 8.3 кОм; на второй – 6% при 12.5 кОм и на третьей пластине – 2% при 4.9 кОм. Изучение зависимости значения спектральной плотности флуктуаций напряжения (S_v) от частоты выявило типичный для пленок графена вид зависимости $1/f$ для всех чипов, а также большой разброс (более четырех порядков) максимальных значений S_v на частоте 1 Гц.

Сопоставление этих результатов с экспериментальными данными, полученными с использованием АСМ, КЗМ и спектроскопии КРС на тех же самых чипах, выявило корреляцию между интегральными характеристиками низкочастотного шума и такими свойствами образцов, как величина и однородность распределения деформации и концентрации свободных носителей заряда, вид и доля областей двуслойного графена. Наименьшие значения S_v на частоте 1 Гц ($5 \times 10^{-14} \text{ В}^2 \text{ Гц}^{-1}$) оказались характерными для образцов высокого качества с наименьшими значениями шероховатости поверхности, незначительным разбросом величины деформации и концентрации свободных носителей заряда и минимальной долей включений двуслойного графена. Наибольшие значения ($S_v = 2 \times 10^{-9} \text{ В}^2 \text{ Гц}^{-1}$) были характерны для графена низкого качества. Таким образом, было показано, что данные о зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения от частоты и величина S_v на частоте 1 Гц могут быть использованы для классификации и отбраковки чипов с низким качеством графена, потенциально непригодных для взаимодействия с белковыми структурами. Классификация чипов по качеству графена позволит более эффективно продолжить работы по созданию биосенсоров.

Список литературы

1. Ferrari A.C., Bonaccorso F., Fal'ko V. et al, Science and Technology Roadmap for Graphene, Related Two-Dimensional Crystals, and Hybrid Systems, Nanoscale, vol. 7 (11), 4598, 2015
2. Lebedev A.A., Davydov, V.Yu., Novikov S.N. et al, Graphene-Based Biosensors, Tech. Phys. Lett., vol. 42, 729, 2016
3. Lebedev, A.A., Davydov, V.Yu., Usachov D.Yu. et al, Study of Properties and Development of Sensors Based on Graphene Films Grown on SiC (0001) by Thermal Destruction Method, J. Phys. Conf. Ser., vol. 951, 012007, 2018
4. Usikov A., Borodkin K., Novikov S. et al, Graphene/SiC Dies for Electrochemical Blood-Type Sensing, Proc. Est. Acad. Sci., vol. 68(2), 207, 2019
5. Ferrari A.C., Basko D.M., Raman Spectroscopy as a Versatile Tool for Studying the Properties of Graphene, Nature Nanotech., vol. 8(4), 235, 2013
6. Ding F., Ji H., Chen Y. et al, Stretchable Graphene: A Close Look at Fundamental Parameters through Biaxial Straining, Nano Lett., vol. 10(9), 3453, 2010
7. Eliseyev, I.A.; Davydov, V.Y.; Smirnov, A.N. et al, Raman Spectroscopy Estimation of the Carrier Concentration and the Value of Strain in Monolayer Graphene Films Grown on 4H-SiC, J. Phys. Conf. Ser., vol. 1400, 055037, 2019
8. Balandin A.A., Low frequency 1/f noise in graphene devices, Nature Nanotech., vol. 8(8), 549, 2013

Не требующие формовки мемристорные структуры на основе нанокристаллических пленок оксида цинка

Смирнов В.А.¹, Авакян А.А.¹, Томинов Р.В.¹

¹ИНЭП ЮФУ

e-mail: artem21071999@gmail.com

Современные компьютеры испытывают сложности в решении задач, связанных с связанными с неструктурированной классификацией данных и распознаванием образов, что

объясняется особенностью архитектуры вычислительных систем, основанной на физическом разделении процессора и памяти. Одним из возможных путей решения данной проблемы является переход компьютеров к нейроморфной архитектуре, представляющей собой множество мемристоров (синапсов), соединенных между собой проводящими контактами (синапсами) по кроссбар-архитектуре. Анализ литературных данных показал, что для изготовления мемристоров для нейроморфных систем наиболее подходящей является технология энергонезависимой резистивной памяти ReRAM, так как, по сравнению, с другими технологиями (FeRAM, PRAM, MRAM), обладает наиболее низким энергопотреблением, а также свойством мультибитности [1, 2]. Принцип действия ReRAM основан на мемристорном эффекте – изменении сопротивления тонкой оксидной пленки между состоянием низкого сопротивления (LRS) и состоянием высокого сопротивления (HRS) под действием внешнего электрического поля [3]. Также анализ литературных данных показал, что одним из наиболее перспективных материалов для изготовления элементов ReRAM является не требующая электроформовки нанокристаллическая пленка оксида цинка (ZnO), которая может быть получена при определенных режимах роста метода импульсного-лазерного осаждения [4, 5]. Однако использование нанокристаллических пленок ZnO для изготовления ReRAM в настоящее время ограничено недостаточной изученностью эффекта резистивного переключения в ней.

Для экспериментального исследования эффекта резистивного переключения методом импульсного лазерного осаждения на установке Pioneer 180 (Neocera Inc., США) были получены пленки нанокристаллического ZnO при следующих режимах: температура пластины: 500 °С, расстояние между мишенью и пластиной: 60 мм, давление O₂: 1 мТорр, энергия импульса: 400 мДж. Электрические измерения проводились с использованием системы измерений параметров полупроводников Keithley 4200-SCS (Keithley, США).

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что изменение сопротивления от HRS до LRS происходило при $3,1 \pm 0,3$ В, а с LRS на HRS при $-2,9 \pm 0,6$ В. Показано, что HRS равно $52,2 \pm 4,2$ кОм, LRS равно $1,9 \pm 0,5$ кОм, коэффициент HRS/LRS = 27 при напряжении чтения 0,8 В. Исследование зависимости HRS и LRS от количества циклов переключения показало, что HRS уменьшается от $52,2 \pm 4,2$ кОм до $43,1 \pm 3,1$ кОм, а LRS увеличивается с $1,9 \pm 0,5$ кОм до $2,2 \pm 0,3$ кОм. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении мемристорных структур на основе не требующих формовки нанокристаллических пленок оксида цинка.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-03041 _мк.

Список литературы

1. S. H. Jo et al., Nano letters, 10, 1297 (2010).
2. G. Indiveri et al., Frontiers in neuroscience, 5, 73 (2011).
3. В.А. Смирнов и др., Физика и техника полупроводников, 1, 77 (2019).
4. R.V. Tominov et al., IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 256, 012001 (2017).
5. R.V. Tominov et al., Technical Physics, 63, 1236-1241 (2018).

Исследование закономерностей влияния управляющих параметров локального анодного окисления на резистивное переключение оксидных наноструктур титана для изготовления нейроморфных систем

Шарапов Н. А.¹, Авилов В.И.¹, Смирнов В.А.²

¹Южный Федеральный Университет

e-mail: na5h4r@gmail.com

Стремительный рост объема обмениваемой информации в обществе приводит к тому, что современная вычислительная техника, базируемая на бинарной логике, имеет существенные ограничения при решении большого объема поставленных задач. В связи с этим возникает необходимость в разработке принципиально новых нейроморфных устройств, способных проводить обработку и анализ Big Data информации. Для изготовления таких устройств необходимо использовать быстродействующие и энергонезависимые элементы, к которым относятся мемристорные структуры на основе оксидов металлов, из которых перспективным является TiO_2 . Метод локального анодного окисления (ЛАО) позволяет формировать такие структуры без проведения дополнительной операции электроформовки. Поэтому актуальной задачей является исследование закономерностей режимов формирования и переключения оксидных наноструктур (ОНС) титана.

Для экспериментальных исследований использовалась тонкая пленка титана, сформированная методом магнетронного распыления на установке Auto 500 (BOC, Великобритания). Методом ЛАО с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro (НТ-МДТ, Россия) на поверхности структуры были сформированы ОНС титана с латеральными размерами 5×5 мкм. Затем были измерены их вольт-амперные характеристики в режиме зондовой спектроскопии и получены экспериментальные закономерности влияния управляющих параметров локального анодного окисления на переключение сопротивления ОНС титана.

В результате экспериментальных исследований было показано, что при уменьшении напряжения ЛАО пленки титана от 10 до 6 В наблюдается уменьшение сопротивления ОНС в состоянии HRS от $2,8 \times 10^{12}$ до $3,4 \times 10^{11}$ Ом и в состоянии LRS от $2,6 \times 10^{11}$ до $1,4 \times 10^9$ Ом. При этом отношение сопротивлений оксидных наноразмерных структур в состояниях HRS и LRS увеличивается от 10,7 до 250. Показано, что при увеличении относительной влажности при ЛАО от 30 до 90 % происходило изменение механизма переключения сопротивления ОНС титана.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования элементов резистивной памяти и нейроморфных систем на основе оксидных наноструктур титана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации No. МК-767.2020.8 и Российского фонда фундаментальных исследований (грант No 19-29-03041 мк).

Исследование газочувствительных свойств наностержней оксида цинка при комнатной температуре

Бобков А. А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: Darklord125@mail.ru

История развития промышленных полупроводниковых адсорбционных газовых датчиков начинается с 1973 года. В качестве основного материала таких датчиков использовались широкозонные полупроводники в основном оксиды n-типа, такие как SnO_2 и ZnO . При нахождении данного оксида в атмосфере на его поверхность адсорбируется кислород в атомарном или молекулярном виде, в дальнейшем происходит его отрицательная зарядка вследствие соответствующей энергии сродства к электрону, что приводит к искривлению зон и появлению обедненной носителями заряда области. При адсорбции на поверхности детектируемого восстанавливающего газа данная обедненная область уменьшается.

Конструкционно полупроводниковые адсорбционные газовые датчики начинали свое развитие с использованием в качестве полупроводникового материала в виде порошка. В дальнейшем, развитие полупроводниковых адсорбционных датчиков привело к созданию различных типов толстопленочных и тонкопленочных датчиков. На данный момент, исследования в области газочувствительности направлены на использование в качестве чувствительного слоя различных наноструктур, позволяющие улучшить параметры газовых сенсоров [1-5]. Особое внимание уделяется созданию сенсоров работоспособных при комнатной температуре [6-7]. Решение данной задачи возможно при использовании наностержней с сечением канала проводимости соизмеримым с дебаевской длиной экранирования.

В данной работе представлены результаты разработанной методики синтеза совокупности наностержней оксида цинка с различной плотностью и исследование газочувствительных свойств полученных структур на пары органических растворителей.

Для получения наностержней оксида цинка применялся двухстадийный химический синтез: формирование зародышевого слоя и последующий гидротермальный синтез. Для формирования зародышевого слоя (12,5 мМ – 1 образец и 60 мМ – 2 образец) нитрата цинка ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и гексаметилентетрамина $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ (НМТА) растворяли в этаноле посредством ультразвука в течение 15 минут. Полученный раствор наносили на электрод с напыленными контактными площадками и центрифугировали (3000 об/мин) в течение минуты. Далее проводился отжиг в муфельной печи при 350°C в течение полутора минут. Процедуры нанесения и отжига повторяли 5 раз, в результате чего наблюдалось формирование тонкой пленки ZnO .

На полученных зародышевых слоях методом гидротермального синтеза осуществлялось формирование наностержней оксида цинка. В качестве прекурсоров использовали водный раствор 10 мМ ацетата цинка $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и НМТА, в качестве стабилизатора использовали цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ). Синтез осуществлялся в термостате при температуре 85°C в течение часа. Далее образцы промывали в дистиллированной воде и сушили на воздухе. Контроль морфологии полученных образцов осуществлялся посредством растровой электронной микроскопии (РЭМ). Исследование газочувствительных свойств полученных наноструктур ZnO проводилось с использованием прибора Elins Impedancemeter Z-500P двухзондовым методом, измерения происходили в различных газовых атмосферах.

В результате работы методом гидротермального синтеза были получены наностержни оксида цинка с характерными размерами порядка 0,5-1,5 мкм в длину и 10-80 нм в ширину достаточно плотно покрывающих поверхность подложки. Исследования газочувствительных свойств оксида цинка показали значительный отклик системы на пары восстанавливающих газов при комнатной температуре. Показано, что толщина зародышевого слоя и соответственно плотность структуры на основе наностержней ZnO достаточно сильно влияет на чувствительность сенсора. Увеличение концентрации прекурсоров практически в 5 раз способствует росту чувствительности наностержней оксида цинка с 2 до 43. Анализ полученных результатов и теоретических модельных представлений позволяет сделать вывод о том, что наноструктуры на основе оксида цинка являются перспективными материалами для применения в газовой сенсорике, работающими при комнатной температуре.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20239).

Список литературы

1. Формирование литографических рисунков ограниченными микрочастицами оксида цинка на кремниевой подложке / Бобков А.А., Пронин И.А., Мошников В.А., Якушова Н.Д., Карманов А.А., Аверин И.А., Сомов П.А., Теруков Е.И. // Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 15. С. 87-92.
2. Способ получения нанолитографических рисунков с кристаллической структурой со сверхразвитой поверхностью / Аверин И.А., Бобков А.А., Карманов А.А., Мошников В.А., Пронин И.А., Якушова Н.Д. // Патент на изобретение RU 2655651, 29.05.2018. Заявка № 2017124723 от 12.07.2017.
3. GAS Sensing Properties Of Nanocomposites With ZnO Nanowires / Bobkov A.A., Gorshanov V.I. // Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах). 2018. Т. 1038. С. 012047.
4. Способ изготовления газового сенсора с наноструктурой со сверхразвитой поверхностью и газовый сенсор на его основе / Аверин И.А., Бобков А.А., Карманов А.А., Мошников В.С., Пронин И.А., Якушова Н.Д. // Патент на изобретение RU 2687869, 16.05.2019. Заявка № 2018135479 от 09.10.2018.
5. The Multisensor Array Based On Grown-On-Chip Zinc Oxide Nanorod Network For Selective Discrimination Of Alcohol Vapors At Sub-Ppm Range / Bobkov A., Moshnikov V., Varezhnikov A., Plugin I., Fedorov F.S., Goffman V., Sysoev V., Trouillet V., Geckle U., Sommer M. // Sensors. 2019. Т. 19. № 19. С. 4265.
6. Study Of Gas-Sensitive Properties Of Zinc Oxide Nanorod Array At Room Temperature / Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A., Nalimova S.S., Semenova A.A., Maksimov A.A., Levkevich E.A., Moshnikov V.A. // В сборнике: 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018 Proceedings. 2018. С. 219-221.
7. Бобков, А.А. Физико-технологические основы управления функциональными свойствами газочувствительных сенсоров на основе наностержней оксида цинка: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бобков А.А.; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург, 2019.

Методы измерения локальных эмиссионных характеристик многоострийных эмиттеров на основе УНТ

Колосько А.Г.¹, Попов Е.О.¹, Филиппов С.В.¹, Поняев С.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: agkolosko@mail.ru

Полевые эмиссионные источники электронов с распределённой токовой нагрузкой (т.н. полевые эмиттеры большой площади – LAFE) активно разрабатываются для использования в широком диапазоне вакуумных приборов [1]. В настоящее время существует две проблемы, которые тормозят развитие технологий создания LAFE с высокими токами. Первая из них относится к теоретическим исследованиям. Эти исследования направлены на изучение применимости одноострийной теории полевой эмиссии к описанию свойств LAFE. Вторая проблема заключается в слабости методов фундаментальных экспериментальных исследований LAFE, которые могли бы обеспечить связь между теоретическими моделями LAFE и измеряемыми вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

Основными характеристиками, связывающими реальные эмиссионные свойства полевого эмиттера с теорией полевой эмиссии, являются эффективные оценки: коэффициент усиления поля (FEF) и площадь эмиссии (FEA), получаемые путём анализа ВАХ при известной работе выхода поверхности.

Мы разработали методику анализа микроскопических характеристик LAFE, основанную на онлайн обработке картин свечения полевого проектора с одновременной регистрацией ВАХ в быстром режиме сканирования катода высоким напряжением. Получение FEF и FEA отдельных эмиссионных центров было основано на трёх различных подходах. Первый подход использует регрессионный анализ полной ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма (ВАХ-ФН) для получения эффективных значений FEF и FEA, а также данные о числе эмиссионных центров для оценки FEA одного центра. Второй подход использует амплитудные значения импульсов эмиссионного тока и непрерывное слежение за локальной яркостью эмиссионных центров для расчёта распределений токовой нагрузки и FEF индивидуальных центров. Третий подход сочетает в себе результаты первого подхода (построение ВАХ-ФН) и слежение за центрами, аналогичное слежению во втором подходе.

Методика была реализована на базе экспериментальной установки многоканального сбора данных о полевой эмиссии [2]. Онлайн обработка данных (ВАХ и картин свечения) осуществлялась специальной программой, написанной на языке LabView [3].

В качестве модельного LAFE был выбран нанокompозитный полевой эмиттер "SWCNT / PS", созданный на основе одностенных углеродных нанотрубок, случайным образом распределённых в матрице полимера (полистирола).

В результате были получены макроскопическая экспериментальная ВАХ и соответствующее ей семейство локальных ВАХ отдельных эмиссионных центров на поверхности катода, а также гистограмма средней эмиссионной активности отдельных эмиссионных центров при постоянном уровне напряжения. Их обработка позволила оценить микроскопические эмиссионные характеристики – коэффициент усиления поля и площадь эмиссии. Близость значений микроскопических характеристик, полученных с применением трёх различных подходов, позволяет считать все три вида оценки достаточно адекватными.

Список литературы

1. R.J. Parmee, C.M. Collins, W.I. Milne, M.T. Cole, X-ray generation using carbon nanotubes, *Nano Convergence* 2:1 (2014) 1 – 27.

2. E.O. Popov, A.G. Kolosko, S.V. Filippov, P.A. Romanov and I.L. Fedichkin. Multichannel registration of field emission and accompanying processes of nanomaterials with on-line modeling. *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 13800 – 13806.
3. S.V. Filippov, E.O. Popov, A.G. Kolosko, A.V. Shchegolkov, The technique of visualization and evaluation of the emission site distribution for large area field emitters, *Journal of Physics: Conf. Series* 929 (2017) 012057-1 – 6.

Влияние углерода в sp^1 гибрилизированном состоянии на структуру тонких пленок PbSe

Разина А. Г.¹, Казаков В.А.¹, Кочаков В.Д.¹

¹ЧГУ им. И.Н. Ульянова

e-mail: razina_ag@mail.ru

В наших ранних исследованиях [1, 2] было показано, что в пленках PbSe, полученных методом твердофазного синтеза, наблюдается аномальное изменение сопротивления вблизи температуры $T_n \sim 343$ К. При температуре выше T_n полупроводниковая электропроводность переходит в металлическую, т.е. происходит фазовый переход полупроводник-металл. Пленки с данными характеристиками могут быть использованы для создания терморезистивных элементов. Однако большой проблемой в практическом использовании пленок PbSe является нестабильность свойств, связанная с окислением с течением времени, что приводит к ухудшению их полупроводниковых характеристик. Решение этой проблемы надо искать в стабилизации фаз, для чего можно использовать защитное покрытие. В качестве защитного слоя может быть выбрана пленка линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ, углерод в sp^1 гибрилизированном состоянии). В работе [1] было выявлено, что характер температурной зависимости сопротивления пленок PbSe, покрытых слоем ЛЦУ, не меняется.

В настоящей работе методом ИК-Фурье-спектроскопии были изучены оптические отражения пленок PbSe, PbSe-ЛЦУ в диапазоне длин волн 1-16 мкм. На основании работы авторов [3] проведен анализ полученных данных. Во всех спектрах отражения исследуемых образцов наблюдались два минимума, связанные с плазменными колебаниями свободных носителей заряда и относящиеся к фазам PbSe и PbSeO₃, что не противоречит ранее полученным результатам [4]. В среднем инфракрасном диапазоне спектра отражения пленок PbSe-ЛЦУ, плазменный минимум смещается в длинноволновую область. По данным работы [3], при увеличении времени окисления масса PbSe в пленке уменьшается, а масса PbSeO₃ увеличивается. Происходит смещение плазменного минимума, относящегося к фазе PbSe, в коротковолновую область [3]. Таким образом, пленка PbSe, покрытая слоем ЛЦУ, является менее окисленной. Данный вывод подтверждается результатами рентгеноструктурных исследований образцов, которые показывают уменьшение процентного содержания кислородосодержащей фазы PbSeO₃ в 2-4 раза. Расчет концентрации присутствующих фаз проводился по методу корундовых чисел.

Список литературы

1. Краснова А.Г., Кокшина А.В., Белова А.В., Кочаков В.Д. Исследование взаимодействия PbSe с углеродом в состоянии sp^1 // Вестник Чувашского университета. 2012. №3. С. 46-47.

2. Краснова А.Г. Синтез и исследование тонкопленочной бинарной системы PbSe // Сборник материалов I Всеросс. науч. конф. «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения». Чебоксары: 2013. С. 76-77.
3. Панов М. Ф., Томаев В.В. Оптические отражения в инфракрасной области спектра окисленных пленок PbSe // Физика и химия стекла. 2012. Т. 38. №4. С. 543-552.
4. Разина А. Г., Казаков В.А., Ашмарин А.А., Кочаков В.Д. Исследование состава пленочной системы Pb-Se и изменений ее структуры под действием температуры // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. №5-6. С. 132-142.

Номер проекта РФФИ: 14-02-31203

Использование электростатического энергоанализатора с плоскостью симметрии для исследования многоострийных полевых эмиттеров на основе углеродных нанотрубок

Филиппов С. В.¹, Бондаренко В.Б.², Гнучев Н.М.², Давыдов С.Н.², Колосько А.Г.¹, Попов Е.О.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: f_s_v@list.ru

Теоретические расчёты автоэлектронной эмиссии из проводящих структур используют заданные формы распределений электронов по энергиям. Классическое уравнение Фаулера-Нордгейма, которое часто используют экспериментаторы для анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) реальных полевых катодов, основано на «металлическом» распределении Ферми-Дирака [1]. Применение этого распределения для анализа современных многоострийных катодов (LAFE), основанных на углеродных наночастицах, вызывает серию вопросов. Определение реального распределения электронов в LAFE и сопоставление этого распределения с данными об эмиссионной способности катода является одной из актуальных задач, решаемых сегодня экспериментаторами по всему миру.

Для определения спектра электронов полевых катодов используются энергоанализаторы различных конструкций. В представленной работе применялся новый электронный спектрометр, предназначенный для анализа энергии электронов, эмитированных полевыми эмиттерами [2]. Основу спектрометра составляет оригинальный электростатический энергоанализатор дисперсионного типа [3], обладающий плоскостью симметрии.

Для регистрации ВАХ и получения информации о распределении микроскопических эмиссионных центров экспериментального LAFE была использована уникальная методика многоканального сбора и онлайн обработки данных о полевой эмиссии [4]. Основу этой комплексной установки составляет ортодоксальный стенд исследования полевых катодов с плоскопараллельной конструкцией электродов и сканированием образца высоким напряжением с полусинусоидальной формой импульсов [5].

Исследуемым образцом был LAFE войлочного типа на основе нанокompозита "одно-стенные углеродные нанотрубки в полистироле", нанесённого на алюминиевую фольгу.

Были получены ВАХ, а также распределение эмиссионных центров по коэффициенту усиления поля. Отбираемый эмиссионный ток достигал уровня 20 нА.

Регистрация энергетических спектров производилась при токах до 20 μA и при двух различных температурах 40°C и 200°C. Форма спектров была ассиметрична и соответствовала классическому распределению электронов в металлах вблизи уровня Ферми, включая зависимость формы спектра от температуры. Анализ спектров показал, что эффективная работа выхода LAFE близка к величине 4,6 eV, что соответствует работе выхода отдельных углеродных нанотрубок, встречающейся в литературе [6]. Проведён сравнительный анализ сдвигов энергетических уровней исследуемого LAFE и материалов с низкой работой выхода.

Список литературы

1. Murphy E.L., Good R.H., Thermionic emission, field emission, and the transition region, Phys. Rev. 102, 1464 – 1473, 1956.
2. Bondarenko V.B., Davydov S.N., Kniazkov A.V., Filimonov A.V., Using electrostatic energy analyzer of a plane of symmetry for recording field emission spectra from carbon nanotube array. Journal of Physics: Conference Series, 1236, 012007-1 – 6, 2019.
3. Davydov S.N., Kudinov Yu.A., Golikov Yu.K., Korablev V.V., High-resolution electron energy analyser for angle-resolved spectroscopy, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom., 72, 317 – 321, 1995.
4. Popov E.O., Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Fedichkin I.L., Multichannel registration of field emission and accompanying processes of nanomaterials with on-line modeling. Materials Today: Proceedings 5, 13800–13806, 2018.
5. Popov E.O., Popov S.O., Korovin O.P., The software for field emission investigation, ICCP5, Kanazawa, Japan, 1-04, 1999.
6. Gao R., Pan Z., Wang Z., Work function at the tips of multiwalled carbon nanotubes, Appl. Phys. Lett. 78, 1757, 2001.

Намагниченность и электронный спиновый резонанс углерод/полимерного композита

Ионов А.Н.¹, Волков М.П.¹, Семенихин П.В.¹, Николаева М.Н.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт высокомолекулярных соединений

e-mail: petr3295@gmail.com

В настоящей работе представлены результаты исследования зависимости намагниченности углерод полимерного композита (УПК) от температуры ($5\text{K} < T < 400\text{K}$) и магнитного поля ($-10 < H < 10$ Тл), а также исследование электронного спинового резонанса (ЭСР). Углерод состоял из многослойных графеновых хлопьев с линейными размерами в несколько микрон и толщиной несколько десятков нм. Мотивация проведения магнитных исследований была обусловлена тем, что в УПК на основе многослойного графена и химически сильно связанного с ним макромолекул полистирола, ранее наблюдалась вольт – амперная характеристика (ВАХ) джозефсоновского типа [1-3]. Как известно джозефсоновская ВАХ является характерной особенностью всех сверхпроводящих материалов. Наши исследования показали, что в УПК поведение намагниченности от магнитного поля ведет себя также как и в сверхпроводниках, причем в том же температурном интервале, где ранее в УПК наблюдалось ВАХ джозефсоновского типа, т.е. при комнатной

температуре [2, 3]. Необходимо отметить, что в полевых зависимостях магнитного момента наблюдались гистерезисные кривые ферромагнитного вида вплоть до 400К, которые, как предполагалось в [4], могли быть связаны исключительно с эффектом сверхпроводимости, а не с эффектом ферромагнитного упорядочения. Исследование электронного спинового резонанса может подтвердить или исключить магнитное упорядочение в УПК. Основное внимание было уделено изучению положения линии свободного электрона при изменении температуры. При возникновении ферромагнитного упорядочения эта линия должна смещаться в сторону меньших магнитных полей. Полученное нами значение для g -фактора, равное 2.003, не зависело от температуры и находилось в диапазоне, характерном для свободного электрона углерода ($g = 2.0022-2.0035$). Такое поведение g -фактора исключает возникновение внутреннего магнитного поля в композите, что указывает на то, что гистерезисные кривые ферромагнитного вида обусловлены эффектом сверхпроводимости.

Причина возникновения сверхпроводимости в частицах графита, состоящего из слоев многослойного графена, может быть связана с деформацией сдвига, поворота одного слоя графена относительно другого из-за сильной связи с полистиролом. В результате этого в области интерфейса между графеновыми слоями возникают плоские энергетические зоны, которые могут приводить к высокотемпературной, комнатной сверхпроводимости [5-11].

Список литературы

1. Ионов А.Н. Письма ЖТФ2015, 38(7), 1009.
2. Ionov A.N. J Low Temp Phys, 2016, 185, 515
3. Nikolaeva M. N., Bugrova A. N., Anan'eva T. D., and Dideikin A. T. Russian Journal of Applied Chemistry, 2014, 87(8), 1151
4. A. N. Ionov, M. P. Volkov, and M. N. Nikolaeva JETP Letters, 2019, Vol. 109, No. 3, pp. 163–165.
5. R. Bistrtzer, A.H. MacDonald, Proc. Natl. Acad. Scie. U. S. A. 108(30), 12233 (2011).
6. N.B. Kopnin, T.T. Heikkilä, G.E. Volovik, Phys. Rev. B 83(1–4), 220503 (2011).
7. T. Heikkilä, N.B. Kopnin, G. Volovik, JETP Lett. 94, 233 (2011).
8. P.D. Esquinazi, T.T. Heikkilä, Y.V. Lysogorskiy, D.A. Tayurskii, G.E. Volovik, Pis'ma v ZhETF 100(5), 374 (2014).
9. A. Bianconi, T. Jarlborg, Nov. Supercond. Mater. 1, 37 (2015).
10. G. E. Volovik, JETP Lett. 107, 516 (2018).
11. Volovik G.E. Pis'ma v ZhETF, 2018, 107(8), 537.

Исследование фотоактивации газочувствительных слоев на основе наностержней оксида цинка

Наимова С. С.¹, Рябко А.А.¹, Максимов А.И.¹, Мошников В.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: sskarpova@list.ru

Газовые сенсоры играют важную роль в различных сферах: от медицинской диагностики до контроля производственных процессов. Резистивные газовые сенсоры отличаются высокой чувствительностью, простотой миниатюризации для портативных

приборов, а также относительно низкой себестоимостью. Безусловно, сенсорные слои на основе наностержней оксида цинка, полученные методом низкотемпературного гидротермального синтеза (при температуре ≈ 86 °С), соответствуют как высокой чувствительности, обусловленной малым диаметром наностержней (≈ 50 нм), так и низкой себестоимости. Как правило, резистивные газовые сенсоры работают при высоких температурах (≈ 300 – 400 °С) [1], что уменьшает срок службы газовых сенсоров и ухудшает стабильность параметров отклика, а также ограничивает их применение для обнаружения горючих и взрывоопасных веществ. Одним из наиболее перспективных способов уменьшения рабочей температуры газовых сенсоров до комнатной является замена механизма генерации носителей заряда с термогенерации на фотогенерацию [2, 3]. Таким образом, исследование фотоактивации газочувствительных слоев на основе наностержней оксида цинка при комнатной температуре является актуальной задачей для расширения области применения и увеличения стабильности резистивных газовых сенсоров.

В данной работе были получены сенсорные слои на основе наностержней оксида цинка методом низкотемпературного гидротермального синтеза с использованием затравочных нанокристаллов на поверхности керамической подложки со встречно-штыревыми электродами (Au). Затравочные нанокристаллы оксида цинка для последующего гидротермального синтеза были сформированы методом центрифугирования спиртового раствора ацетата цинка с последующим отжигом в воздушной атмосфере при температуре 500 °С. После гидротермального синтеза образца также подвергались отжигу. Полученные образцы исследовались на газочувствительность к восстанавливающему газу, в качестве которого использовались пары изопропилового спирта, в циклическом режиме при температуре ≈ 300 °С, а также при комнатной температуре в условиях освещения ультрафиолетовым светодиодом с пиком $\lambda \approx 365$ нм. При этом интенсивность облучения регулировалась с помощью широтно-импульсной модуляции в диапазоне от 0.1 до 1. Анализ результатов измерений показал, что использование УФ-облучения (с энергией больше оптической ширины запрещенной зоны полученных наностержней ZnO) позволяет активировать газочувствительность сенсорного слоя на основе наностержней оксида цинка. При этом существует оптимальная интенсивность УФ-облучения, после которой вклад отклика на газ-восстановитель существенно уменьшается. Важно отметить, что замена нагрева на облучение приводит к уменьшению величины и скорости отклика сенсорного слоя. Тем не менее, величина и скорость отклика при фотоактивации сенсорного слоя может быть достаточна для некоторых применений. Также использование гетерокомпозиций на основе различных оксидов металлов может существенно повысить чувствительность и скорость отклика фотоактивированных сенсорных слоев за счет разделения фотогенерированных электронно-дырочных пар.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №17-79-20239.

Список литературы

1. S.S. Nalimova, I.E. Kononova, V.A. Moshnikov, D.Ts. Dimitrov, N.V. Kaneva, L.K. Krasteva, S.A. Syuleyman, A.S. Bojinova, K.I. Papazova and A.Ts. Georgieva, "Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy", Bulgarian Chemical Communications, 2017, vol. 49, N. 1, pp. 121-126.
2. A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko, S.S. Nalimova, A.A. Semenova, A.I. Maximov, E.A. Levkevich and V.A. Moshnikov, "Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature", 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEXPolytech): Proceedings, 2018, pp.219-221.
3. S.S. Nalimova, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov, A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko, E.A. Levkevich, A.A. Semenova, "Synthesis and Study of Zinc Oxide Layers Sensitized by

Colloidal Nanocrystals”, 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech): Proceedings, 2019, pp. 223-225.

Синтез и исследование газочувствительных свойств тонких пленок оксида меди

Смирнов А. В.¹, Платонов П.С.¹, Царева Е.Р.¹, Столбов Д.О.¹, Тюнтеров Е.С.¹

¹ЧувГУ

e-mail: r7553@yandex.ru

В работе показано, что возможно синтезировать полупроводниковые пленки оксида меди и оксида меди с линейно-цепочечным углеродом, обладающие хорошей чувствительностью на пары метанола и этанола. На стеклянные подложки методом терморезистивного испарения в вакууме на вакуумной установке «УВР-3М» при давлении порядка 10^{-2} Па осаждались пленки меди, далее в печи МИМП-ВМ образцы отжигались в атмосфере воздуха при температуре 250⁰С в течении 20 минут и при температуре 400⁰С. Для другой группы образцов для получения металлоксид-углеродных систем, на подложки наносились пленки меди и затем ионно-плазменным синтезом осаждались пленки линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) и термически оксидировались в печи при температуре 400⁰С. Структура пленок ЛЦУ состоит из множества слоев, каждый из которых состоит из цепочек углеродных атомов в sp^1 -гибридизации, ориентированных нормально к поверхности слоя. Цепочки объединены силами Ван-дер-Ваальса в гексагональную структуру с расстоянием между ними около 5 Å. Цепочки изогнутые, на концах изгибов которых происходит присоединение атомов Н. Наличие делокализованных электронов, принадлежащих всей молекуле ЛЦУ, обеспечивает металлическую проводимость вдоль цепочки. Отсутствие связи между цепочками делает пленку в перпендикулярном направлении диэлектриком. На предметный столик помещались исследуемые образцы, накрывались под колпак и поочередно насыщались парами этанола и метанола и снимались зависимости сопротивления от времени выдержки в парах. Время отклика и восстановления определяются как время, необходимое для достижения 90% максимального уровня сигнала и время возврата к 90% от начального значения соответственно. Чувствительный слой демонстрирует время реакции, восстановления и чувствительность для образцов Cu_2O на пары метанола 1600 сек., 565 сек. и 2,1 %; на пары этанола 1035 сек., 407 сек. и 2,1 % соответственно; для образцов $CuO+ЛЦУ$ на пары метанола 548 сек., 117 сек. и 8,2 % и на пары этанола 169 сек., 65 сек. и 8,8 % соответственно.

Номер проекта РФФИ: 17-42-210604 p_a

Bipolar switching properties of titanium dioxide thin films deposited by different techniques

Gerasimova M. I.¹, Andreeva N.¹, Chigirev D.¹, Mazing D.¹, Ivanov A.¹

¹ЛЭТИ

e-mail: gerasimova.m.i@mail.ru

Multilevel resistive switching in MIM structures with TiO₂/Al₂O₃ thin-film bilayers have recently been observed in our group [1, 2]. According to our experimental results, a thin layer of titanium oxide could be considered as a reservoir of oxygen vacancies, under the voltage application between the top and the bottom electrodes of the MIM structure oxygen vacancies could drift to an active aluminum oxide layer (where the resistive switching takes place), thus changing its properties [3]. Metal-oxide hetero-structures consisting of bilayer oxide films with multilevel resistive switching could be considered to be a potential base for neuromorphic engineering, enabling a combination of both data storage and processing in a single unit. A key design issue in this case is a hardware defined functionality provided by the gradient change of resistive properties of memristive elements.

The underlying physical mechanism for multilevel switching in metal-oxide hetero-structures evoked a gradual change in resistance is influenced by the layer sequence of these devices as well as their electrode and interface properties. To elucidate the impact of titanium dioxide layer, served as a reservoir of oxygen vacancies, on the multilevel resistive switching behavior in MIM structures with TiO₂/Al₂O₃ bilayers, a study of resistive switching behavior in TiO₂ thin films deposited by RF sputtering and atomic layer deposition (ALD) was carried out. The emphasis was placed on which of the two methods leads to better resistive switching characteristics for the neuromorphic circuit.

For this purpose, Pt/TiO₂/Pt thin film structures were fabricated with 60 nm – thick titanium dioxide active layer. In order to figure out mechanisms leading to the transformation of the properties during resistive switching, a study of local structural properties by means of atomic-force microscopy together with *I-V* curves measurements using a Keithley 4200-SCS semiconductor characterization system was carried out. An analysis of TiO₂ thin film topography justified the significant difference in local structure of films deposited by different deposition techniques. The resistance of the TiO₂ thin films measured by using a low (0.1 V) dc voltage is comparable for structures fabricated by RF sputtering and ALD. To initiate a bipolar resistive switching in titanium dioxide thin layers, a two-step electroforming procedure is required. An analysis of experimental *I-V* curves for Pt/TiO₂/Pt structures indicates the similar physical mechanisms underlying the bipolar resistive switching in active layer independently from the deposition technique. Meanwhile, the results of cycling measurements revealed a significant difference in TiO₂ thin layers deposited by means of RF sputtering or ALD. Pt/TiO₂/Pt thin film structures fabricated by means of ALD demonstrate the higher number of switching cycles and are more stable in terms of SET/RESET voltage's deviation. We assume that the specificity of resistive behavior in titanium dioxide thin layers is driven by its local structural properties directly determined by the method of film deposition.

Список литературы

1. Andreeva N, Ivanov A, Petrov A. Multilevel resistive switching in TiO₂/Al₂O₃ bilayers at low temperature. *AIP Advances* 8:025208, 2018.
2. A.E. Sinev, N. V. Andreeva, A.A. Petrov, A.B. Bobkov, “Multilevel resistive switching in heterogeneous oxide system based on TiO₂/Al₂O₃ bilayers for ReRAM applications:

- problems and prospects”, In 2018 IEEE International conference on electrical engineering and photonics (EEEPolytech). pp. 189 – 191.
3. L. Alekseeva, T. Nabatame, T. Chikyow and A. Petrov, “Resistive switching characteristics in memristors with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ bilayers,” Jpn. J. Appl. Phys., 2016, vol. 55, 08PB02-1.

Численное моделирование поверхности полевого эмиттера на основе АСМ-профилограмм

Чумак М.А.¹, Никифоров К.А.²

¹СПбПУ

²СПбГУ

e-mail: k.nikiforov@spbu.ru

В работе проведено моделирование по данным атомно-силовой микроскопии (АСМ) поверхности полевых эмиссионных микроразмерных матричных структур на основе карбида кремния, изготовленных по технологии СПГЭТУ ЛЭТИ [1]. В среде математического и компьютерного моделирования COMSOL Multiphysics разработана процедура загрузки АСМ-профилограмм полевого эмиттера и построена соответствующая модель поверхности. Разработанная численная модель исследована на предмет сеточной сходимости, используя расчёт распределения напряженности электрического поля по методу конечных элементов. Выявлен оптимальный размер элемента расчётной сетки, при котором достигается наилучшая сходимость численного решения, и исследовано влияние соответствующих параметров интерполяции данных АСМ.

Распределение напряженности электрического поля на поверхности эмиттера, которое затруднительно с высокой степенью точности извлечь из натурального эксперимента прямыми или косвенными измерениями, обуславливает нанометровую ширину потенциального барьера при туннелировании электронов, сформированного благодаря наличию наноструктурных деталей в рельефе эмиссионной поверхности и в результате усиления более крупномасштабного поля. Поэтому данные вычислительного эксперимента и разработанная модель поверхности являются базовыми для проведения комплексного исследования эмиссии на основе совместного численного решения разнообразных типов задач математической физики. Такое моделирование, называемое мультифизическим в среде COMSOL Multiphysics, одним из главных достоинств имеет то, что модель строиться из отдельных физических модулей, имеющих в своем составе наборы соответствующих уравнений, что позволяет извлекать результат на стыке их совместного решения. Это дает возможность решать междисциплинарные исследовательские задачи и, в частности, выявлять особенности фундаментальных механизмов, лежащих в основе процессов полевой эмиссии из карбида кремния, в том числе ключевых механизмов деградации полевых эмиттеров, работающих в условиях высокой плотности эмитируемого тока [2].

Карбид кремния относится к перспективным материалам автоэмиссионной электроники, в первую очередь, благодаря экстремальным значениям критической напряженности поля лавинного пробоя, теплопроводности и механической прочности [1]. Исследованные в работе двухуровневые автоэмиссионные микроразмерные матричные структуры

изготовлены по двухстадийной технологии, сочетающей процессы фотолитографии, реактивного ионно-плазменного травления и микромаскирования катализатором.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-01086. Часть работ была выполнена с использованием оборудования ресурсных центров Научного парка СПбГУ «Нанопотоника», «Вычислительный центр» и «Нанотехнологии».

Список литературы

1. Лучинин В.В. Отечественная экстремальная ЭКБ: карбидокремниевая индустрия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Наноиндустрия, 4, 40-51, 2016
2. Егоров Н.В., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. – Долгопрудный: Интеллект, 2011

Номер проекта РФФИ: 20-07-01086

Влияние заряженного интерфейса на электрический транспорт в транзисторах на основе графена

Бутко А.В.¹, Бутко В.Ю.^{1,2}, Лебедев С.П.¹, Елисеев И.А.³, Смирнов А.Н.¹, Давыдов В.Ю.¹, Лебедев А.А.¹, Кумзеров Ю.А.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²СПБАУ РАН

³Университет ИТМО

e-mail: russprot@yahoo.com

Графен является одним из наиболее перспективных материалов для создания электронных устройств, включая химические и биологические сенсоры. Для создания таких сенсоров важное значение имеет установление закономерностей влияния интерфейса на электрические свойства графена. В данной работе проводилось создание и исследование графеновых структур для транзисторных и четырех контактных электрических измерений. Качество кристаллической решетки и количество монослойных слоев в образцах контролировались методами Рамановской спектроскопии. Была установлена возможность формирования высококачественного монослойного графена с концентрацией точечных дефектов меньше или порядка $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [1]. Для такого графена, выращенного путем термического разложения карбида кремния, в транзисторной геометрии обнаружен эффект памяти состояния (р или n состояние), который связан с образованием метастабильных квазихимических интерфейсных связей с участием носителей заряда в графене и молекулярных ионов на его поверхности [1].

Кроме того, обнаружено, что увеличение концентрации ионов лизина в водном затворе в полевых транзисторных структурах на основе графена приводит к подавлению однополярной электронной проводимости. Эта зависимость противоположна обычно наблюдаемой зависимости для водных растворов более мелких ионов и может быть использована для детектирования лизина. Возможное объяснение этого заключается в том, что при иммобилизации ионов лизина, обладающих низкой плотностью заряда, происходит блокировка части поверхности графена, что приводит к общему уменьшению плотности заряда на его поверхности. Этот общий эффект может быть использован для создания новых методов детектирования молекул с помощью немодифицированного графена в

полевых транзисторных структурах, при блокировке поверхности графена путем иммобилизации молекул с низкой плотностью заряда. В докладе дополнительно планируется рассмотреть зависимость подвижности носителей заряда в транзисторных структурах на основе графена от концентрации молекулярных ионов на его поверхности.

Список литературы

1. Butko A.V., Butko V.Y., Lebedev S.P., Lebedev A.A., Davydov V.Y., Smirnov A.N., Eliseyev I.A., Dunaevskiy M.S., Kumzerov Y.A., State memory in solution gated epitaxial graphene, *Applied Surface Science*, 444, 36-41 (2018).

Связанные состояния в континууме в диэлектрических волноводах конечной длины

Кутузова А.А.¹

¹Университет ИТМО

e-mail: ych16002@gmail.com

Связанные состояния в континууме (ССК, bound states in the continuum) – это особые состояния, частота которых лежит внутри континуума, т.е. непрерывного спектра свободных фотонов, но при этом состояния остаются локализованными в структуре сколь угодно долго без радиационного затухания [1]. Соответственно, у ССК добротность устремляется к бесконечности. Поскольку их возникновение обусловлено волновой природой, ССК могут возникать в самых разных системах. Так они были идентифицированы в электромагнитных волнах, акустических волнах в воздухе, волнах на поверхности жидкости и упругих волнах в твердых телах. Строго математически ССК могут существовать только в бесконечно протяженных (хотя бы в одном направлении) системах. Однако даже в конечных структурах можно наблюдать ССК в виде высокодобротных резонансов так называемых суперрезонансных состояний [2]. Для того, чтобы в конечной системе добротность резонанса была максимальной, необходима настройка геометрических и структурных параметров, приближающая её к условиям возникновения ССК в соответствующей бесконечной системе. В данной работе были проанализированы эффекты, связанные с размерами волновода, включая изменение добротности суперрезонансных состояний, а также расщепление резонансных мод.

Мы детально рассмотрели волновод, состоящий из диэлектрических наноблоков с круглым сечением, сгруппированных попарно, параллельных друг другу и образующих единую цепочку в форме зигзага. Наноблоки имеют высокое значение диэлектрической проницаемости, типичное для полупроводниковых материалов, благодаря чему структурные элементы волновода поддерживают резонансы Ми. Согласно литературным данным, в таких системах существуют множественные ССК [3]. Кроме этого, рассматривалась аналогичная структура из прямоугольных наноблоков на низкоиндексной (диэлектрическая проницаемость порядка 2.5) подложке, так же поддерживающая ССК. Набор наноблоков с круглым сечением удобно рассчитывать аналитически, а систему из прямоугольных наноблоков изготавливать технологически [4]. Мы рассматривали следующую задачу: на зигзагообразный волновод падает плоская волна по нормали к поверхности. Для каждой из структур анализируются спектры пропускания, на которых наблюдаются резонансы. В исследуемых волноводах мы варьировали параметры, благодаря чему изменялась добротность резонансных состояний, причем максимальное значение добротности соответствует суперрезонансным состояниям. Наша основная задача заключалась в анализе характера зависимости добротности от параметров волновода при увеличении количества структурных элементов.

Точное решение задачи о распространении электромагнитного поля в изучаемых системах можно найти с помощью метода многократного рассеяния. Мы анализировали

узкие резонансные особенности в спектрах пропускания для случая нормального падения. Добротность резонансных состояний, которым соответствуют асимметричные линии в спектрах пропускания, извлекалась при помощи аппроксимации особенностей формулой Фано. Так же для некоторых пиков добротность аппроксимировалась функцией Лоренца. Для волноводов из прямоугольных наноблоков аналогичные вычисления проводились методом связанных Фурье-мод (*rigorous coupled-wave analysis*).

Таким образом, структуру волновода можно оптимизировать так, что она будет наиболее точно удовлетворять условию, требуемому для появления ССК. Мы наблюдали возрастание добротности исследуемых систем при увеличении числа структурных элементов. Кроме этого, в более длинных волноводах некоторые резонансные состояния расщеплялись на два и более пика.

Определение свойств мод, соответствующих высокодобротным резонансам в диэлектрических волноводах, состоящих из нескольких десятков наноблоков, имеет большой потенциал для разработки низкопороговых лазеров [5], высокочувствительных сенсоров [6, 7] и сверхбыстрых модуляторов для телекоммуникаций [8].

Я благодарна М.В. Рыбину и М.Ф. Лимонову за консультации, помощь и поддержку при выполнении работы.

Список литературы

1. C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, J.D. Joannopoulos, M. Solja, *Nature Rev. Mater.* 16048 (2016).
2. M. Rybin, Y. Kivshar, *Nature* 164 (2017).
3. E.N. Bulgakov, A.F. Sadreev, *Phys. Rev. A* 053801 (2014).
4. Z.F. Sadrieva, I.S. Sinev, K.L. Koshelev, A. Samusev, I.V. Iorsh, O. Takayama, R. Malureanu, A.A. Bogdanov, A.V. Lavrinenko, *ACS Photon.* 723--727 (2017).
5. A. Kodigala, T. Lepetit, O. Gu, B. Bahari, Y. Fainman, B. Kant, *Nature* 196 (2017).
6. A. Tittl, A. Leitis, M. Liu, F. Yesilkoy, D.-Y. Choi, D.N. Neshev, Y.S. Kivshar, H. Altug, *Science* 1105--1109 (2018).
7. F. Yesilkoy, E.R. Arvelo, Y. Jahani, M. Liu, A. Tittl, V. Cevher, Y. Kivshar, H. Altug, *Nature Photon.* 30 (2019).
8. S. Han, L. Cong, Y.K. Srivastava, B. Qiang, M.V. Rybin, A. Kumar, R. Jain, W.X. Lim, V.G. Achanta, S.S. Prabhu, Q.J. Wang, Y.S. Kivshar, R. Singh, *Adv. Mater.* 1901921 (2019).

Электрoluminescence и нанопористая структура анодного оксида алюминия, гальваностатически сформированного в дистиллированной воде

Овеченко Д.С.^{1,2}, Бойченко А.П.¹, Механошин И.С.²

¹КубГУ

²МБОУ Средняя общеобразовательная школа №29, Краснодар

e-mail: bojchenco@yandex.ru

Сформированный электролизным окислением алюминия (Al) нанопористый оксид этого металла (Al_2O_3) является в настоящее время объектом всестороннего исследования, что связано с возможностью создания на его основе различных многофункциональных изделий и систем нано-, микро- и оптоэлектроники [1–4]. Начиная с 1962 года возможность электролизного формирования оксидной пленки в химически чистой – дистиллированной воде (ДВ) продемонстрирована авторами на примере Si n- и p-типов [5], а в 2019 году при тех же условиях анодирования на примере Ti, W, In, Ga, Nb, Al, Ta, включая и Si, нами была обнаружена их электрогенерированная люминесценция (ЭЛ) в потенциостатическом режиме при напряжении 1200 V [6, 7]. Настоящая работа посвящена дальнейшим исследованиям этого явления и его связи со структурой анодного Al_2O_3 , гальваностатически формируемого в ДВ.

Исследования проводились на ранее описанной установке в [7]. При постоянных токах I анодирования 1.0, 1.5 и 2.0 mA, которым соответствовали его плотности J – 88, 130 и 164 A/m², регистрировалась кинетика ЭЛ. По кинетическим зависимостям светимости люминесценции оценивались: время ее зажигания (относительно начала процесса анодирования) t_z и разгорания t_R , а также соответствующие этим временам светимости I_z и I_R . Кроме перечисленных параметров оценивалась стационарная светимость ЭЛ I_c . Анодирование велось в течение 1700 s при постоянной температуре 293 K. По его окончании осуществлялась визуализация структуры образовавшегося Al_2O_3 на растровом электронном микроскопе (РЭМ) при увеличении изображений 10000 раз. По РЭМ-изображениям оценивались: средний диаметр d открытых пор и их поверхностная плотность N . Усредненные по трем повторностям измерений и образцам анодированного Al результаты оценок описанных параметров приведены в таблице.

Параметр	Значение		
I , mA	1.0	1.5	2.0
J , A/m ²	88.0 ± 9.0	130.0 ± 12.0	164.0 ± 18.0
t_z , s	164 ± 9.8	60 ± 3.3	78 ± 4.7
t_R , s	175 ± 8.7	70 ± 3.5	120 ± 6.0
I_z , 10 ⁻⁶ lm/m ²	2.7 ± 0.4		
I_R , 10 ⁻⁶ lm/m ²	14.2 ± 1.5	9.7 ± 1.1	7.0 ± 0.7
I_c , 10 ⁻⁶ lm/m ²	8.8 ± 0.9	6.6 ± 0.7	6.6 ± 0.7
d , nm	100 ± 10	70 ± 5	70 ± 5
N , 10 ¹¹ m ⁻²	28 ± 4	28 ± 4	41 ± 6

Из таблицы видно, что с увеличением I на каждые 0.5 mA уменьшаются временные и яркостные характеристики ЭЛ. Однако, это уменьшение происходит не пропорционально I , а в случае I_z величина данного параметра остается неизменной. Для всех токов анодирования на поверхности Al наблюдается формирование его оксидной пленки с порами диаметром от 70 до 100 nm. При этом их N не пропорционально увеличивается с возрастанием тока. Таким образом, как в потенциостатическом, так и гальваностатическом режиме в

диапазоне I от 1.0 до 2.0 mA возможна генерация ЭЛ, кинетика протекания которой существенно зависит от морфологических особенностей нанопористой структуры Al_2O_3 , гальваностатически формируемой в ДВ.

Список литературы

1. S. Lazarouk, S. Katsouba, A. Leshok, A. Demianovich, V. Stanovski, S. Voitech, V. Vysotski, V. Ponomar, Porous alumina as low- ϵ insulator for multilevel metallization, *Microelectron. Eng.*, 50, 321-327, 2000;
2. S. Katsouba, P. Jaguiro, S. Lazarouk, A. Smirnov, Stable elec-troluminescence of nanostructured silicon embedded into anodic alumina, *Physica E.*, 41, 931-934, 2009;
3. G.D. Sulka, K. Hnida, Distributed Bragg reflector based on porous anodic alumina fabricated by pulse anodization, *Nanotechnology*, 23, 075303, 2012;
4. W. Lee, S. J. Park, Porous Anodic Aluminum Oxide: Anodization and Templated Synthesis of Functional Nanostructures, *Chemical reviews*, 114, 7487-7556, 2014;
5. L.A. Dubrovsky, V.G. Melnik, L.L. Odynets, Anodic oxidation of silicon in pure water, *Journal of Physical Chemistry*, 36, 2199-2204, 1962;
6. D.S. Ovechenko, A.P. Boychenko, Glow of Metals during Anodization in Distilled Water, *Technical Physics Letters*, 45, 503-506, 2019;
7. D.S. Ovechenko, A.P. Boychenko, Thermal influence on the electroluminescence kinetics of aluminum and tantalum in their anodization in distilled water, *Ecological bulletin of research centers of the Black sea economic cooperation*, 16, 59-67, 2019

Номер проекта РФФИ: 19-32-90112

Анизотропная флуоресценция производных флуоресцеина MitoFluo и C₈-Fl в растворе при взаимодействии с липосомами

Бельтюкова Д.М.¹, Белик В.П.¹, Богданов А.А.¹, Васютинский О.С.¹, Семенова И.В.¹, Смолин А.Г.¹

¹ФТИ

e-mail: dina.beltukova@gmail.com

Флуоресцентные зонды широко используются для исследования различных внутриклеточных процессов. Специально разработанные флуоресцентные зонды могут выполнять также другие важные функции. Недавно было показано, что одно из производных соединений флуоресцеина, MitoFluo, является эффективным митохондриально-адресованным протонофором, который может использоваться в качестве разобщителя окислительного фосфорилирования. Протонофоры представляют потенциальный интерес для терапевтического использования при лечении болезней, связанных с окислительным стрессом, однако, детальные механизмы их взаимодействия с мембранными структурами не ясны до сих пор. Для моделирования мембранных структур используют специально синтезированные объекты – липосомы, представляющие собой сферические везикулы с одним или несколькими липидными бислоями, структурно схожими с моделируемой мембраной.

В настоящей работе исследовалось взаимодействие двух производных флуоресцеина, MitoFluo и C₈-Fl, с липосомами DOPC и soybeanPC+20% Cardiolipin (Azo-CI), моделирующими, соответственно, электрически нейтральную клеточную мембрану и отрицательно

заряженную внутреннюю мембрану митохондрий. Флуоресцеины растворялись в фосфатном буфере PBS в концентрации 200 нМ, липосомы добавлялись в этот раствор в количестве 6 или 18 мкл.

В качестве метода исследования взаимодействия флуоресцеинов с липосомами был использован метод время-разрешенной анизотропной флуоресценции в режиме счета фотонов (TCSPC) [2]. Возбуждение производилось импульсным полупроводниковым лазером на длине волны 490 нм с длительностью импульса 100 пкс, а сигнал флуоресценции детектировался на длине волны 530 нм. Лазерное излучение, поляризованное в вертикальном направлении с помощью светоделительного кубика, падало на кювету с раствором. Регистрация излучения флуоресценции производилась в направлении, перпендикулярном направлению возбуждения. Это излучение фокусировалось на входную щель монохроматора (МДР-12, ЛОМО), перед которой помещался пленочный поляризатор, посредством которого последовательно выделялись сигналы флуоресценции с горизонтальной и вертикальной поляризацией. Сигнал с выходной щели монохроматора регистрировался ФЭУ (Hamamatsu H10682-01, 250-800 нм) и анализировался модулем TCSPC (PicoHarp 300). Полученные экспериментальные данные аппроксимировались с помощью методики, разработанной в нашей работе ([2]), в результате чего определялись характерные параметры флуоресценции: времена жизни, времена вращательной диффузии и анизотропия поляризации.

Для чистых растворов флуоресцеинов как изотропная, так и анизотропная составляющие сигнала флуоресценции затухали по моноэкспоненциальному закону, при этом для обоих флуоресцеинов время жизни флуоресценции составило около 4 нс, а время вращательной диффузии около 0.22 нс. При добавлении обоих типов липосом к раствору C₈-Fl изотропная часть сигнала флуоресценции по-прежнему аппроксимировалась одноэкспоненциальной функцией со временем затухания около 4 нс, а в анизотропной части наблюдалось появление второй экспоненты с характерным временем затухания около 10-13 нс. При добавлении липосом к раствору MitoFluo и изотропная и анизотропная части сигнала флуоресценции хорошо аппроксимировались только двухэкспоненциальными функциями. При этом в изотропной части сигнала добавилось второе время жизни около 2.2-2.5 нс, а в анизотропной части появилось второе время вращательной диффузии около 17-20 нс. Более длинные времена вращательной диффузии характеризуют вклад сигнала флуоресценции от молекул красителей, связанных с липосомами. Также было показано, что MitoFluo взаимодействует с обоими типами липосом более эффективно, чем C₈-Fl.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-53-34001).

Список литературы

1. S. Denisov, E. A. Kotova, E. Y. Plotnikov, A. A. Tikhonov, D. B. Zorov, G. A. Korshunova, Y. N. Antonenko "A mitochondria-targeted protonophoric uncoupler derived from fluorescein," *Chemical Communications*, 50 (97), 15366-15369 (2014).
2. S. Denicke, K. H. Gericke, A. G. Smolin, P. S. Shternin, O. S. Vasyutinskii "Dynamics of two-color two-photon excited fluorescence of p-terphenyl: determination and analysis of the molecular parameters." *J. Phys. Chem. A* 2010, V. 114 (36), 9681-9692.(2010).

Исследование формирования и фокусировки поверхностного плазмон-поляритона с помощью серебряного нано-кольца

Козлова Е. С.^{1,2}, Котляр В.В.^{1,2}

¹ИСОИ РАН

²Самарский университет

e-mail: kozlova.elena.s@gmail.com

Феномен плазмон-поляритонов, которые распространяются вдоль границы металл-диэлектрик и возникают в связи с коллективной осцилляцией свободных электронов [1], изучается различными научными группами [2, 3]. Из-за своих особых свойств плазмоны получили большую сферу применения в различных областях науки [4-7]. Феномен поверхностного плазмон-поляритона позволяет увеличить чувствительность биологических сенсоров [4]. Оптические компоненты на основе плазмонных эффектов широко используются в наноинтегрированных оптических схемах [5]. Применение поверхностных плазмон-поляритонов позволяет использовать субволновую оптику в микроскопии и литографии за пределами дифракционного предела [6, 7].

Как можно видеть из приведенного обзора, поверхностные плазмон-поляритоны имеют большое количество разных приложений. Одним из них может быть и манипуляция микрочастицами [8]. В наших предыдущих работах исследовался процесс формирования поверхностного плазмона на серебряных нано-полоске и нано-кольце при освещении их лазерным излучением с длиной волны 532 нм [8]. В данной работе мы расширили полученные результаты, рассмотрев другие длины волн: 633 нм и 450 нм. Исследования процессов формирования плазмонов проводилось с помощью численного моделирования FDTD-метода, реализованного в пакете FullWAVE.

В первой части работы нами был исследован процесс формирования поверхностных плазмон-поляритонов на поверхности нано-полоски из серебра, помещенной в воздух. В качестве падающего излучения использовалось ТМ-поляризованное излучение с длинами волн 450 нм и 633 нм. Моделирование проводилось на следующих параметрах: шаг дискретизации по пространству – 2 нм, шаг дискретизации по псевдо-времени ($\tau = ct$, c – скорость света, t – время) – 1 нм. В ходе исследования мы варьировали ширину полоски от 50 нм до 500 нм, с целью определить ее влияние на формирование граничных и центрального плазмонов. Стоит отметить, что граничные плазмоны возникают в итоге резонанса и обладают высокими интенсивностями, однако, их использование осложняется тем, что оба пика находятся очень близко, поэтому нас будут интересовать именно центральные плазмоны. Исходя из этого, в ходе исследования было получено, что для длины волны 633 нм оптимальными являются толщины от 220 нм до 260 нм, для волны 450 нм – от 120 до 140 нм.

Во второй части работы было исследовано формирование плазмонов на серебряных нано-кольцах, расположенных на кварцевой подложке. Как и в [8] для минимизации влияния подложки на процесс формирования, в качестве среды распространения рассматривалась вода ($n = 1,38$). Начальный пучок был радиально поляризован. Моделирование проводилось на следующих параметрах: по пространству – 8 нм, по псевдо – 4 нм. В процессе анализа результатов численного моделирования было показано, что при использовании источника с длиной волны 450 нм не удастся получить центральный плазмон на поверхности кольца шириной 120 нм или 140 нм, которая была рассчитана как оптимальная в предыдущем разделе. В тоже время при использовании длины волны 633 нм центральный плазмон формируется как на кольце шириной 260, так и на кольце шириной 220 нм. При

этом более широкое кольцо дает более узкий по полуспаду интенсивности пик ($\text{FWHM} = 0.251 = 158$ нм), а его интенсивность составила 5.47 отн. ед. и на 36% больше максимальной интенсивности центрального плазмона для узкого кольца. В сравнении с ранее полученными результатами можно отметить, что использование излучения с длиной волны 633 нм для формирования плазмонов на серебряных нано-кольцах является более предпочтительным, так как позволяет достигать более высоких интенсивностей (на 40% больше) при одинаковой ширине по полуспаду интенсивности. Кроме того, на этой длине волны имеется более широкий диапазон для ширины нано-кольца, при которой формируется центральный плазмон, что может нивелировать неизбежные ошибки при изготовлении образцов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380).

Список литературы

1. Zheng L., Experimental Demonstration of Surface Plasmon Polaritons Reflection and Transmission Effects, *Sensors*, V.19(21), E4633, doi: 10.3390/s19214633, 2019.
2. Yuan G., “Plasmonics” in free space: observation of giant wavevectors, vortices, and energy backflow in superoscillatory optical fields, *Light: Science & Applications*, V.8(2), 2047-7538, <https://doi.org/10.5258/SOTON/D0378>, 2019.
3. Wang W., Optical properties of plasmonic components based on a nanoscale three-dimensional plasmonic waveguide, *JOSA B*, V.36(8), 2045-2051, <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.002045>, 2019.
4. Chenb F. Fe₃O₄@PDA immune probe-based signal amplification in surface plasmon resonance (SPR) biosensing of human cardiac troponin I, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, V.177, doi: 10.1016/j.colsurfb.2019.01.053, 105–111, 2019.
5. Sistani M., Nanoscale aluminum plasmonic waveguide with monolithically integrated germanium detector, *Appl. Phys. Lett.*, V. 115, 161107, <https://doi.org/10.1063/1.5115342>, 2019.
6. Minn K., Enhanced subwavelength coupling and nano-focusing with optical fiber-plasmonic hybrid probe. *Opt. Express*, V.27(26), 38098-38108, <https://doi.org/10.1364/OE.27.038098>, 2019.
7. Kim E.S., Surface plasmon-assisted nano-lithography with a perfect contact aluminum mask of a hexagonal dot array, *Plasmonics*, V. 11, 1-6, <https://doi.org/10.1007/s11468-016-0180-y>, 2016.
8. Paiè P. Particle Manipulation by Optical Forces in Microfluidic Devices. *Micromachines*, V. 9(5), 200, <https://doi.org/10.3390/mi9050200>, 2018.
9. Kozlova E.S. Tight focusing of laser light using a surface plasmon polariton in a silver nano-strip and nano-ring on silica glass, *Computer Optics*, V.40(5), 629-634, <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-5-629-634>, 2016.

A photoelectron wave function nodes as centers of quantum vortices in the case of ultrashort pulsed ionization of an atom

Ларионов Н.В.^{1,2}, Смирновский А.А.^{1,3}

¹СПбПУ

²СПбГМТУ

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: larionov.nickolay@gmail.com

Nowadays, systems consisting of only a few quantum objects attract a lot of interest [1-3]. One of them is a photoelectron created through atom ionization by ultrashort electromagnetic pulse with duration of the order of several atomic time units. Because of ultrashort interaction, the photoelectron remembers his initial bound state and this leads to the formation of specific structures in the space – quantum vortices. Centers of these vortices correspond to nodes of a photoelectron wave function, and probability flux demonstrates revolving around these origins [4].

In our work we investigate the formation of quantum vortices arising through barrier-suppression ionization of the atom in two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) space. In 2D case we consider 2D-hydrogen atom and in the case of 3D space we take an electron bound by a zero-range potential [5]. Ionization is performed by ultrashort laser or electric field pulse. Our theoretical approach is based on the time-dependent Schroedinger equation for a single atom interacting with classical electromagnetic pulse. To remove the well known problem with strongly oscillating phase, the numerical simulation of the Schroedinger equation realizing in expanding space [6]. The perturbation theory is used to obtain the analytical description of the problem [4-5].

Obtained analytical solutions allow us to understand the processes involved in the formation of quantum vortices. We show that for laser pulse the vortices are result of quantum interference between final states of the photoelectron, which are formed in a “two-photon” transition through intermediate states of the continuous spectrum [4-5]. For the electric rectangular pulse in 2D space, the transitions through discrete atomic states are engaged. Because of only one discrete level in zero-range potential the vortices formation in the case of electric rectangular pulse is restricted.

We also compare the structure and space localization of vortices obtained in these two different regimes of ionization.

Список литературы

1. L.Ph.H. Schmidt, C. Gohl, D. Metz, H. Schmidt-Böcking, R. Dörner, S.Yu. Ovchinnikov, et al., “Vortices associated with the wavefunction of a single electron emitted in slow ion-atom collisions,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, p. 083201, 2014.
2. A.S. Kuraptsev, I.M. Sokolov, “Specific features of interatomic dipole–dipole interaction near a perfectly conducting charged surface,” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 127, pp. 455–462, 2018.
3. V.P. Stefanov, S.Y. Kilin, “Squeezed states engineering by coherent pulses train acting on single atom laser,” *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, vol. 22, pp. 64–68, 2019.
4. N.V. Larionov, S.Yu. Ovchinnikov, A.A. Smirnovsky, A.A. Schmidt, “Perturbation theory in the analysis of quantum vortices formed by impact of ultrashort electromagnetic pulse on atom,” *Technical Physics*, vol. 63, pp. 1569–1575, 2018.

5. N.V. Larionov, D.N. Makarov, A.A. Smirnovsky, S.Yu. Ovchinnikov, "Formation of Quantum Vortices at the Ionization of an Atom by an Ultrashort Laser Pulse: Two- and Three-Dimensional Cases," *J. Exp. Theor. Phys.*, 129, 949–955, 2019.
6. S.Yu. Ovchinnikov, A.A. Smirnovsky, A.A. Schmidt, "Development of an algorithm of hydrodynamic analysis of quantum system evolution in expanding space," *Tech. Phys. Lett.* vol. 42, pp. 407-410, 2016.

Спектр мод Лагерра-Гаусса при дифракции на круговой апертуре

Брецко М.В.¹, Акимова Я.Е.¹, Егоров Ю.А.¹, Милюков В.В.¹

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: bretscko.mihail@yandex.ru

Одной из главных проблем обработки информационных данных для оптической связи и распределений квантовых ключей для криптографии является сортировка вихревых мод комбинированных вихревых пучков по радиальным и азимутальным квантовым числам. Решения данной проблемы, в основном, основаны на двух подходах. Первый подход включает использование дифракционных оптических элементов в сочетании с интерферометрическими устройствами и модуляторами [1]. Второй предлагает использовать цифровую сортировку мод на основе моментов интенсивности высших порядков и позволяет значительно упростить оптические устройства и расширить их возможности [2]. Вторым подходом был разработан и реализован только для сортировки лазерных пучков по их топологическому заряду. Целью же данного исследования является рассмотрение процесса цифровой сортировки мод Лагерра-Гаусса по радиальному индексу.

Модель сортировки мод ЛГ основана на возмущении лазерного пучка на обычной диафрагме с жесткими краями и круглым отверстием. Возмущение пучка приводит к широкому спектру вторичных мод Лагерра-Гаусса (ЛГ), поле которого можно представить для одного исходного пучка ЛГ как

$$\Psi(r, \varphi, R) = \sum_{k=0}^{\infty} C_{m,n,k}(R) r^{|m|} L_m^{|k|}(2r^2) e^{im\varphi} e^{-r^2} \quad (1)$$

где $r = \rho / w_0$, ρ, φ – полярные координаты, w_0 – перетяжка пучка, R – является нормированным радиусом диафрагмы, а амплитуда пучка описывается уравнением

$$C_{m,n,k} = \oint_0^R \Psi(r, \varphi) \Psi^*(r, \varphi) r dr / \int_0^{\infty} |\Psi_{m,k}(r, \varphi)|^2 r dr \quad (2)$$

$\Psi_{m,k}(r, \varphi)$ описывает комплексную амплитуду одиночного невозмущенного пучка ЛГ. Анализ распределения интенсивности $I_{m,n}(r, \varphi) = |\Psi_{m,n}(r, \varphi)|^2$ возмущенного пучка выполняется в фокальной плоскости сферической линзы с помощью моментов интенсивности представленных в работе [3].

Измерения спектров амплитуд ЛГ мод проводились на экспериментальной установке, изображенной на рис. 1 статьи [4]. В результате экспериментального анализа и компьютерного моделирования модовых спектров возмущенных пучков Лагерра-Гаусса,

содержащих сразу несколько различных радиальных мод n , но одинаковые топологические заряды m , было обнаружено, что каждая мода в спектре вырождена, а число вырождения равно числу мод в исходном массиве пучков. Как оказалось, каждая радиальная мода n в массиве из N пучков испытывает одно и то же возмущение от диафрагмы с жесткими краями, образующей свой широкий спектр мод. В результате каждая k -я мода в возмущенном спектре содержит суперпозицию N мод массива. Спектр становится вырожденным, а число вырождения каждой моды равно N .

Представленная новая методика цифровой сортировки пучков позволяет существенно упростить известные авторам устройства для сортировки пучков по радиальным числам, поскольку позволяет удалять ряд оптических элементов из оптических устройств вместе со вспомогательными механическими и оптоэлектронными гаджетами. Кроме того, использование вырожденных возмущенных пучков позволяет использовать новые распределения квантовых ключей в системах криптографии, оптической связи и обработки данных

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-01233.

Список литературы

1. Zhou, Y. Sorting Photons by Radial Quantum Number / Y. Zhou, et al. // Phys. Rev. Lett. – 2017. – Vol.119.
2. Volyar, A. Orbital angular momentum and informational entropy in perturbed vortex beams / A.V. Volyar, M.V. Bretsko, Ya.E. Akimova, Yu.A. Egorov // Opt. Lett. – 2019. – Vol.44(22). – P. 5687-5690.
3. Volyar A, Bretsko M, Akimova Ya, Egorov Yu. Measurement of the vortex spectrum in a vortex-beam array without cuts and gluing of the wavefront. Opt Lett 2018; 43(22): 5635-5638.
4. Volyar, A., Measurement of the vortex and orbital angular momentum spectra with a single cylindrical lens / A.V. Volyar, M.V. Bretsko, Ya.E. Akimova, Yu.A. Egorov // Applied Optics. – 2019. – Vol.58(21). – P. 5748 – 5755

Номер проекта РФФИ: 19-29-01233

Люминесценция кристаллов кремния и кварца при механическом разрушении

Мамалимов Р.И.^{1,2}, Щербаков И.П.¹, Кулик В.Б.¹, Пономарев А.В.², Веттегрень В. И.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИФЗ РАН

e-mail: Victor.Vettegren@mail.ioffe.ru

Получены спектры и исследованы временные зависимости с разрешением 2 ns сигналов люминесценции кристаллов кремния и кварца при трении и ударе по их поверхности стальным бойком. Длительность сигналов – ≈ 40 –45 ns, и они содержали по 4 наложенных друг на друга максимума, возникающих друг за другом через 12 – 15 ns. Эти максимумы, по-видимому, образуются при разрушении барьеров, препятствующих движению дислокаций по плоскостям скольжения. В кристаллах кварца при прорывах барьеров образуются возбужденные свободные радикалы Si-O \cdot , что приводит к появлению полосы с

максимумом- $\approx 1,95$ eV [1, 2]. В кристаллах кремния при прорывах барьеров образуются нанокристаллы ncSi с линейными размерами ≈ 4 nm, что вызывает появление полосы 1,63 eV [3, 4]. Одновременно из области трения кристаллов вылетает порошок. При помощи фотолюминесцентной (PL) и рамановской спектроскопии определен размер нанокристаллов кремния в порошке. Он составил $\approx 2,2$ nm. В спектрах PL им соответствует полоса с максимумом 2,25 eV [3, 4]. Вероятно, за время между трением и получением рамановских и PL спектров (несколько часов). под влиянием значительных остаточных напряжений в порошке происходит дальнейшее разрушение его частиц, что приводит к уменьшению размеров нанокристаллов в ≈ 2 раза.

Список литературы

1. Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Кинетика эмиссии света, звука и радиоволн из монокристалла кварца после удара по его поверхности. // Журнал техн. физики. том. 81. Вып. 4. С. 148-151, 2011. DOI: 10.1134/S1063784211040311
1. Kawaguchi Y. Fractoluminescence Spectra in Crystalline Quartz. // Jpn. J. Appl. Phys. vol. 37, 1892 – 1896, 1998.
2. O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics.// Surface Sci. Rep. vol. 38, 1-126, 2000. doi: 10.1016/S0167-5729(99)00012-6.
3. V. Wolkin, J. Jorne, P. M. Fauchet. Electronic States and Luminescence in Porous Silicon Quantum Dots: The Role of Oxygen. // Phys. Rev. Lett. vol. 82, 197-200, 1999. doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.197.

Номер проекта РФФИ: № 20-05-00155а

Исследование спектров высокого разрешения нижних деформационных колебательных состояний $^{32}\text{D}_2\text{S}$, $^{33}\text{D}_2\text{S}$, $^{34}\text{D}_2\text{S}$

Ерсин Т.Е.¹, Чжан Фанцэ¹, Елена С. Бехтерева¹

¹ТПУ

e-mail: tosha_love_1995@mail.ru

Сероводород является важной молекулой как для фундаментальных, так и прикладных проблем химической физики, атмосферной оптики, астрофизики и планетологии [1]. Для астрофизических приложений исследования дейтерированных модификаций важны также для точного определения отношения D/H, которое позволяет реализовывать тестовые модели расчета химической и физической эволюции галактик, и получить информацию об условиях и процессах в различных частях Вселенной [2-3]. Принципиально важно, также, обладать информацией о внутримолекулярной потенциальной функции молекулы сероводорода. Источником дополнительной информации являются данные, извлеченные из спектров высокого разрешения всех изотопологов сероводорода, которые имеют одинаковый электронный потенциал в приближении Борна–Оппенгеймера. В данной работе проводился анализ нижних деформационных полос, а именно ν_2 и $2\nu_2$, трех дейтерированных изотопологов сероводорода: D_2^{32}S , D_2^{33}S , D_2^{34}S .

Колебательно-вращательные спектры исследуемой спектральной, 600-2100 cm^{-1} , области были зарегистрированы с высоким разрешением, 0.003 cm^{-1} , с помощью Фурье –

спектрометра Bruker IFS 120 HR в Техническом университете Брауншвейга, Германия. Опираясь на широко используемом методе комбинационных разностей [4], выполнена интерпретация спектров в рассматриваемом диапазоне для трех изотопологов. На основе метода эффективных гамильтонианов была решена обратная спектроскопическая задача, определены параметры эффективного гамильтониана колебательных состояний (010) и (020).

Список литературы

1. Self S, Rampino MR, Barbera JJ. The possible effects of large 19th and 20th century volcanic eruptions on Zonal and hemispheric surface temperatures. *J Volcanol Geotherm Res*, 1981;11:41–60.
2. Wakelam V, Castets A, Ceccarelli C, Lefloch B, Caux E, Paganì L. Sulphur-bearing species in the star forming region L1689N. *Astron Astrophys* 2004;413:609-22.
3. Visscher C, Lodders K, Fegley Jr. B. Atmospheric chemistry in giant planets, brown dwarfs, and low-mass dwarf stars. II. Sulfur and phosphorus. *Astron Astrophys* 2006;648:1181-95.
4. Ulenikov O.N., Liu A.W., Bekhtereva E.S., Grebneva S.V., Deng W.-P., Gromova O.V., Hu S.M. High-resolution Fourier transform spectrum of H₂S in the region of 8500-8900 cm⁻¹. *J Mol Spectrosc* 2004;228:110–9.2.

Номер проекта РФФИ: РФФИ 19-32-90069.

Разработка преобразователя оптических сигналов на основе градиентно-активированного ниобата лития

Строганова Е.В.¹, Кузора В.Ф.¹, Галуцкий В.В.¹, Гуляев Е.Н.¹, Шмаргилов С.А.¹

¹ФГБОУ ВО "КубГУ"

e-mail: stroganova@phys.kubsu.ru

Современные тенденции развития систем связи основываются на принципах создания полностью оптических сетей, включающих коммутаторы с оптическим управлением, оптические усилители с дистанционным питанием, мультиплексоры и демultipлексоры. Теоретические и экспериментальные исследования фотонных устройств на основе нелинейно-оптических сред (например, PPLN) по управлению и коммутации оптических сигналов демонстрируют повышенную устойчивость к джиттеру, и, как следствие, снижение коэффициента битовых ошибок, повышение пропускной способности [1].

В современных модельных исследованиях оптического коммутатора на основе PPLN удастся достичь скоростей информационных потоков порядка 200 Гбит/с, при этом, аналогичные устройства на основе кремниевых матриц демонстрируют коэффициент ошибок менее 10⁻¹² на скоростях не превышающих 12,5 Гбит/с при частотном разделении каналов по 80 ГГц [2].

Дальнейшим направлением по увеличению эффективности устройств на основе PPLN может стать их градиентное легирование по основным компонентам, что приводит к повышению их температурной стабильности при мощных сигналах накачки [3].

Целью данного исследования является построение и анализ модели PPLN-преобразователя в качестве логического элемента с учетом неоднородности дисперсии групповых скоростей по его длине и создание градиентного PPLN.

Была построена модель и промоделированы логические элементы И, ИЛИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ-ИЛИ, на примере волноводной периодически-поляризованной структуры в ниобате лития с градиентом состава. Моделирование свойств градиентного PPLN основывалось на численном решении уравнений амплитуд связанных волн, с заданным коэффициентом преломления от состава на основе уравнений Сельмеера средствами Matlab. Моделирование проводилось для оптических каналов стандарта WDM с оптической накачкой на 1550 нм. Мощность накачки и сигналов составляла 20-30 дБм, что подразумевает использование оптического усилителя.

Расчитаны затухания сигнала каналов А и В (коэффициент экстинкции и Q-фактор) при реализации логической функции В-А и А-В при различных видах функции градиента по составу вдоль преобразователя и одинаковых уровнях мощности входных сигналов. Полученные результаты позволяют утверждать, что спектральные зависимости Q-фактора и коэффициента экстинкции для реализации оптических функций в градиентном PPLN отличаются от аналогичных для безградиентных PPLN. При линейно изменяющемся, параболическом и экспоненциальном видах функции градиента дисперсии групповых скоростей вдоль преобразователя максимум коэффициента экстинкции и Q-фактора менее выражен, чем при постоянном значении дисперсии. Вместе с тем, появляется возможность использовать не критичные по своим геометрическим размерам или по уровню мощности входных сигналов PPLN-преобразователи в качестве логических вентилей.

Для исследования возможностей создания фотонного устройства для обработки оптических сигналов был изготовлен PPLN на основе градиентного кристалла ниобата лития. Задаваемый градиент концентрации по основному компоненту лития имел величину 0,05% от оклостехиометрического состава по длине оптической були 50 мм. Для обеспечения данного градиента, был выращен кристалл, который вытягивался вдоль кристаллографической оси X, скорость роста составила 0,5-0,8 мм/ч, диаметр кристаллической були – 15 мм. Кристалл выращивался методом Чохральского с жидкостной подпиткой из Pt тигля и тигля-реактора [4]. После вытягивания и ориентирования кристаллической були вырезалась пластина вдоль кристаллографической оси X с последующей оптической полировкой и нанесением фотошаблона на установке μ -PG. Период нанесенного фотошаблона для последующей поляризации градиентного ниобата лития составлял 19 мкм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и проекта по госзаданию Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Fukuchi Y. et al., Characteristics of all-optical 3R regenerators using cascaded second-order nonlinear effect in quasi-phase matched lithium niobate devices, *Optical and Quantum Electronics*, V. 49, 297, 2017.
2. M. Ashkan Seyedi et al., Error-free DWDM transmission and crosstalk analysis for a silicon photonics transmitter, *Optics Express*, V.23, No.26 32968-32976, 2015.
3. Galutskiy V.V. et al., Frequency conversion in compositionally graded PPLN crystals, *Kvantovaya Elektronika*, Vol. 44, 30–33, 2014.
4. Stroganova E.V. et al., Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 311, 1190-1194, 2009.

Сверхбыстрая спектроскопия переходного поглощения для изучения процессов анизотропной релаксации биологических молекул в растворе

Горбунова И. А.¹, Сасин М.Э.¹, Бельтюков Я.М.¹, Семенов А. А.¹, Васютинский О.С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: i.gorbunova@mail.ioffe.ru

Динамика возбужденных состояний многоатомных биологических молекул в значительной степени определяется быстрыми процессами анизотропной релаксации, которые успешно исследуются как с помощью наблюдения затухания поляризованной флуоресценции [1], так и при исследовании разностного поглощения методом накачки-зондирования [2]. В настоящей работе сообщается о разработке и апробации нового метода по схеме накачка-зондирование для исследования процессов быстрой анизотропной релаксации и переноса энергии в возбужденных состояниях многоатомных молекул при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами. Метод был применен для исследования процессов вращательной диффузии и анизотропной колебательной релаксации восстановленной формы молекул NADH (никотинамид-аденин-динуклеотид) в растворах в субпикосекундном временном диапазоне.

В исследованиях использовалась двухцветная схема накачка-зондирование, в которой лазерный импульс накачки возбуждал электронные переходы в молекулах NADH на длине волны 360 nm, лежащей в полосе поглощения хромофорной группы никотинамида [3], а зондирующий лазерный пучок имел длину волны 720 nm. Длительность импульсов накачки была примерно 100 fs, а частота повторения импульсов составляла 80 MHz, пробные импульсы имели те же характеристики, но были задержаны относительно импульсов накачки на регулируемый интервал времени Δt . Пучок накачки и зондирующий пучок распространялись сонаправлено вдоль оси X. Плоскость поляризации пучка накачки модулировалась с вертикальной, вдоль оси Y, на горизонтальную, вдоль оси Z, при помощи фотоупругого модулятора с частотой 100 kHz. Поляризация зондирующего пучка поддерживалась под углом 45° к плоскости поляризации пучка накачки. В результате поглощения импульсов накачки, преимущественно возбуждались те молекулы, оси которых были выстроены вдоль направления поляризации возбуждающего пучка. Зондирующий луч взаимодействовал с анизотропным ансамблем возбужденных молекул, и в результате этого взаимодействия преимущественно поглощалась либо Z, либо Y компонента поляризации зондирующего пучка. Ортогональные компоненты поляризации зондирующего пучка независимо регистрировались двумя фотодиодами, сигналы с которых отправлялись на выходы дифференциального интегратора. Полученный разностный сигнал $I_x - I_y$, промодулированный по амплитуде на частоте 100 кГц, обрабатывался синхронным усилителем. На выходе наблюдался разностный сигнал ортогональных компонент поляризации зондирующего пучка в зависимости от времени задержки между импульсом накачки и зондирующим импульсом. В результате впервые удалось получить сигнал разностного поглощения, обусловленный линейным дихроизмом, с временным разрешением порядка 0.3 ps при возбуждении фемтосекундными импульсами с энергией 1 nJ. Причем балансная схема детектирования позволила значительно уменьшить избыточные шумы, вызванные нестабильностью интенсивности излучения лазера и флуктуациями плотности раствора.

Полученные экспериментальные сигналы содержали вклады процессов, лежащих в разных временных диапазонах: нелинейное многофотонное возбуждение при временах задержки менее 3 ps, анизотропная колебательная релаксация при временах задержки около

10 пс и вращательная диффузия с характерными временами около 100 пс. При анализе экспериментальных сигналов для водного раствора NADH были определены время вращательной диффузии, которое хорошо согласуется со значением, полученным в наших предыдущих экспериментах, в которых наблюдалась поляризованная флуоресценция NADH [1], и характерные времена анизотропной колебательной релаксации, которые для молекулы NADH до сих пор не были представлены в литературе. Также была разработана теоретическая модель, описывающая процессы колебательной анизотропной релаксации молекул в растворе.

Список литературы

1. Sasin M. E., Gorbunova I. A., Bezverkhii N. O., Beltukov Y. M., Vasyutinskii O. S., and Rubayo-Soneira J. // *Tech. Phys. Lett.* 2019 V. 45 P. 672
2. Heiner Z., Roland T., Leonard J., Haacke S., Groma G.I. // *J. Phys. Chem. B.* 2017. V. 121. Pp. 8037–8045.
3. Schaefer P.M., Kalinina S., et. al. // *Cytometry Part A*, 2019 V. 95 No.1 Pp. 34–46.

Номер проекта РФФИ: № 18-03-00038

Исследование микрокристаллов h-BN выращиваемых на подложках карбида кремния

Бреев И. Д.¹, Бараш А.С.¹, Роснков А.Д.¹, Мохов Е.Н.¹, Анисимов А.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: breev.ilia.d@mail.ioffe.ru

Нитрид бора — бинарное соединение бора и азота. Химическая формула: BN. Нитрид бора исключительно стабильное химически, термостойкое, нетоксичное вещество, не смачиваемое большинством расплавленных металлов и не взаимодействующее со многими химическими реагентами. Известны несколько кристаллических модификаций нитрида бора: кубическая (c-BN), вюрцит (w-BN), ромбоэдрическая (r-BN), турбостатическая (t-BN) (в которой гексагональные слои беспорядочно уложены и повернуты относительно оси C) и гексагональная (h-BN). Последняя модификация представляет особый интерес, как перспективный полупроводниковый материал с большой шириной запрещённой зоны (6.5эВ). Кроме того, h-BN обладает высокой теплопроводностью и электросопротивлением, высокой стойкостью к окислению, а также с исключительно яркой люминесценцией в УФ области спектра. Слои h-BN являются структурным аналогом графита (несовпадение решёток всего 1.7%). Всё это позволяет рассматривать h-BN, как идеальный подложечный и барьерный материал для формирования двумерных гетероструктур и квантовых ям [1, 2].

Для получения кристаллов h-BN использовался метод физического переноса паров (PVT) в его модификации «сублимационный сэндвич-метод» (ССМ), эффективно применяемый для выращивания слоёв и объёмных монокристаллов SiC, GaN и AlN [3, 4]. Были получены слои и микрокристаллы h-BN на подложках карбида кремния размером около 20 мкм.

В рамках проводимого исследования были поставлены 2 цели. Первая цель была связана с определением кристаллической модификации нитрида бора, получаемую в ходе

роста на поверхности карбида кремния, для оптимизации процессов роста h-BN. Вторая цель была в исследовании гексагонального нитрида бора методом комбинационного рассеяния света и конфокальной спектроскопией.

Для достижения поставленных целей было решено ряд задач. Во-первых, были визуально определены микрокристаллы BN с использованием оптического микроскопа. Во-вторых, мы проводили исследование обнаруженных микрокристаллов BN методом комбинационного рассеяния света (КРС). В-третьих, была проведена характеристика кристаллических модификаций нитрида бора на поверхности SiC.

В результате исследования были изучены спектры КРС и установлено, что в результате роста кристаллов на поверхности образуются 3 типа соединений: BCN, h-BN, c-BN. Исследование позволило оптимизировать процессы роста h-BN, что позволяет контролируемо создавать гетероструктуры SiC/h-BN.

Список литературы

1. K.Watanabe et.al., Nat.Mater., 3 (2004), 404
2. Y.Kubota et.al., Science, 317, (2007), 932
3. Yu.A.Vodakov, E.N.Mokhov Growth of semiconductor SiC // Patents: USSR N 403275 (1970); Fr: No 2 264 589 (1975); UK:No 1458445 (1977); FRG: No 24 09 005 (1977); USA No 414572 (1979)
4. E. Mokhov and A. Wolfson Growth of AlN and GaN crystals by sublimation. In book: Single Crystals of Electronic Materials: Growth and Properties. Edited by Roberto Fornari, 2018, p.401-445

Исследование особенностей преобразования черно-белых и цветных видеоизображений объекта в специальные звуковые сигналы

Чжан Ц.¹, В.В.Давыдов^{2,3}, В.Ю. Рудь³

¹Пекинский промышленный университет

e-mail: Zhangjing1@yandex.ru

Зрение является одним из важнейших сенсорных органов человека. Нарушение функционирования данного органа создает огромное число проблем в жизни людей. Современные медицинские технологии решают большое число задач по восстановлению или коррекции работы зрительных органов. В ряде случаев, современные технологии бессильны.

К сожалению, ухудшение экологического состояния окружающего мира и увеличение негативных нагрузок на зрение привело к тому, что людей, которые не могут получать визуальную информацию от внешнего мира, становится все больше и больше. Существует большое число методов, которые позволяют таким людям получать информацию об окружающем их пространстве [1, 2]. Но большинство из этих методов не позволяет человеку осуществлять передвижение без столкновения с различными предметами и объектами [1, 2]. Поэтому разработка новых и совершенствование используемых является актуальной задачей, на решение которой направлены различные исследования, в том числе и в прикладной физике.

Одним из наиболее перспективным является метод преобразования изображения в звук (аудио-визуализация объекта). Используя звук вместо глаз человека, можно решать проблему передвижения в пространстве людей с нарушениями зрения. При использовании данного метода возникает ряд особенностей, связанных различными значениями параметров в изображениях. Эти различия определяются как работой оптических устройств, регистрирующих изображение в автоматическом режиме, так и структурой, и конфигурацией объекта, а также климатическими факторами [2]. Кроме того, при формировании звукового сигнала необходимо учитывать наличие звуковых помех и т.д.

Проведенные исследования показали, что наиболее целесообразно использовать метод преобразования графов *image2music* с оптической фильтрацией регистрируемых изображений объекта. При использовании формата *wav* для представления изображения в виде музыкальной дорожки, расширяются возможности при переходе от цветного изображения к черно-белому. Это необходимо в случае яркой солнечной или другой засветки объекта. Также необходимо отметить, что при обработке видеоизображений учесть следующую особенность. Частоту звукового сигнала предпочтительнее согласовывать с положением линии в изображении, а амплитуду звукового сигнала – значением оттенков серого для каждого пикселя изображения. Это позволяет преобразовывать изображения в параметры звука, которые соответствуют параметрам соответствующим базовым изображениям объектов.

В предлагаемом в работе методе изображение преобразуется из RGB в пространство HSV, а затем разделяется изображение на 14 частей по вертикали, вычисляется среднее арифметическая компонента для каждой строки в каждой части. Это позволяет определить значение тона, темпа и ритма для каждого *Midi*-канала для создания *MIDI*-файл для идентификации человеком изображения предмета или объекта.

Полученные результаты проведенных экспериментов показали, что использование разработанного нами метода позволяет с вероятностью 77 % определить форму и положение объекта по направлению движения человека. При ярком свете вероятность уменьшается до 50 %. Это показывает, что необходимо продолжить исследований для повышения эффективности фильтрации паразитных световых сигналов.

Список литературы

1. Чжан Ли Хун. Исследование электронных ходячих средств на основе слухового дисплея. Чжэцзян: издательство Чжэцзянского университета, 2005.
2. Сюэ'дан. Исследование электронной системы помощи при ходьбе на основе слухового дисплея. Хэбэй: издательство Хэбэйского политехнического университета. 2010.

Влияние импульсного УФ излучения на экситонную люминесценцию нанокристаллов CuCl в боратных стеклах

Бабкина А. Н.¹, Зырянова К.С.¹, Егорова Я.Б.¹, Нурыев Р.К.¹

¹Университет ИТМО

e-mail: babkina.anastasya@bk.ru

Макрокристаллы CuCl хорошо известны [1]: они отличаются интенсивным экситонным поглощением на краю запрещенной зоны и реверсным расположением полос Z_3 , $Z_{1,2}$

экситонов (отрицательным спин-орбитальным расщеплением) по сравнению с другими галоидомедными полупроводниками. Наноразмерные кристаллы CuCl в диэлектрической матрице обладают фотохромным и нелинейно-оптическим свойствами [1]. Вследствие малого борновского радиуса экситона CuCl ($a_{ex} = 0,68$ нм [2]) и большой эффективной постоянной Ридберга ($R_y = 213$ мэВ [2]) ожидается, что поступательное движение экситона в нанокристаллах CuCl будет квантовано.

Рост полупроводниковых частиц в стеклянных матрицах основан на термодинамике диффузионно-контролируемого фазового распада перенасыщенных твердых растворов. Этот процесс делится на три этапа: зародышеобразование, рост за счет растворенного вещества и реконденсация, когда самые большие частицы образуются за счет растворения более мелких частиц [3]. Как правило, эти три стадии роста частиц контролируются во время тонкого отжига и термической обработки или двухстадийной термической обработки; размер и концентрация нанокристаллической фазы зависят от температуры и продолжительности нагревания.

Целью данного исследования является изучение экситонной люминесценции нанокристаллов CuCl, выделенных в боратных стеклах при возбуждении импульсным УФ излучением.

Калиево-алюмо-боратные стекла, легированные ионами меди и хлора, были синтезированы методом закалки в тигле в вертикальной электрической печи при 1350°C . Состав матрицы стекла: $20 \text{ K}_2\text{O}-25 \text{ Al}_2\text{O}_3-55 \text{ B}_2\text{O}_3$ (мол.%) – был дополнен добавками Cu_2O , NaCl, Na_3AlF_6 . Тонкий отжиг проводился в ступенчатом режиме, начиная с 400°C . Температура стеклования T_g была определена с использованием дифференциального сканирующего калориметра STA 449F1 Jupiter (Netzsch) и составила 380°C . Первую стадию процесса образования частиц проводили во время низкотемпературной термообработки при температурах, близких или ниже T_g . В качестве источника возбуждения люминесценции нанокристаллов была использована третья гармоника YAG: Nd^{3+} лазера ($\lambda = 355$ нм) с длительностью импульса 9 нс, частотой 10 Гц и плотностью мощности $0,111$ Дж/см². В силу большого экситон-фононного взаимодействия при комнатной температуре экситонная люминесценция нанокристаллов галогенидов меди отсутствует, поэтому эксперименты были проведены при температуре кипения жидкого азота.

Нанокристаллы CuCl характеризуются интенсивной и узкополосной люминесценцией в ближней УФ области при криогенных температурах. Длина волны возбуждения, использованная в эксперименте, учитывает поглощение межзонных электронных переходов, происходящих в нанокристаллах, и изолированных ионах одновалентной меди. Увеличение числа возбуждающих импульсов приводит к увеличению интенсивности свечения CuCl и низкоэнергетическому сдвигу максимума полосы, что соответствует увеличению среднего размера НК. При этом интенсивность люминесценции ионов Cu^+ в видимой области спектра уменьшается.

Непрерывное возбуждение люминесценции CuCl не демонстрирует уменьшения интенсивности вплоть до выключения лазера. Авторам работы [4] такой вид свечения соответствует релаксации дефектов Френкеля, полученных в нанокристаллах при термической закалке. Тем не менее люминесценция, вызванная дефектами, демонстрирует эффект насыщения в определенное время возбуждения, а затем гаснет. В настоящей работе экситонное свечение не демонстрирует затухания после насыщения, что доказывает, что свечение не связано с дефектами. Полученные результаты указывают на то, что нанокристаллы небольшого размера, выделяющиеся при термообработке, играют роль центров зародышеобразования для более крупных кристаллов за счет дополнительной энергии, вводимой лазерным возбуждением. Вследствие чего увеличивается количество

выделяемых кристаллов и увеличивается средний размер всего комплекса нанокристаллической фазы.

Список литературы

1. Dotsenko A. V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. 1998 *Physics and Chemistry of Photochromic Glasses* (New York: CRC Press) p 208.
2. Sheng J. et al. 2009 *Int. J. Hydrogen Energy* 34(2) 1119.
3. Itoh T., Iwabuchi Y., Kataoka M. 1988 *Phys. Status Solidi B*. 145 567.
4. Valov P.M. et al. 1993 *Fiz. i Khimiya Stekla* 19(4) 578.

Цифровая голографическая визуализация микрообъектов, удерживаемых оптической пространственной ловушкой

Соколенко Б. В.¹, Шостка Н.В.¹, Полетаев Д.А.¹

¹КФУ им. В. И. Вернадского

e-mail: simplexx.87@gmail.com

В данной работе представлен анализ возможности оптического захвата частиц микронных размеров с помощью оптической ловушки на основе пространственно-структурированного пучка, переносящего оптический вихрь. Эффективность такой оптической ловушки определяется симметрией поля пучка в области захвата, нарушение которой вызывает ослабление сил, удерживающих частицы, что может использоваться для селективного захвата микрочастиц различной массы и формы. В дополнение к реализации бесконтактного оптического захвата, оптическое визирование в трехмерном пространстве обеспечивалось цифровой голографической микроскопией, позволяющей изучать как различные изолированные частицы, так и их группы посредством численного сканирования всего пространства кюветы и восстановления изображения в заданной плоскости из одной цифровой голограммы. Данный метод способствует точному определению локализации исследуемых микрообъектов в кювете.

Одним из высокоэффективных методов генерации пространственно-структурированных векторных пучков является метод, основанный на использовании двулучепреломляющего кристалла. В результате распространения через кристалл пучка Гаусса, из кристалла выходит пучок, представляющий собой суперпозицию обыкновенного и необыкновенного пучков, имеющих разные радиусы кривизны волнового фронта. Когда исходящий луч фокусируется линзой, расположенной на одном фокусном расстоянии от внешней грани кристалла, после кристалла в дальней зоне дифракции образуются два максимума интенсивности: первый соответствует фокусу обыкновенного пучка, второй – необыкновенного, при этом сложное пространственное распределение поля между ними формируется благодаря суперпозиции этих пучков. Такая структура имеет вид классического «бутылочного» пучка с минимумом на оси, равномерно окруженным зоной высокой интенсивности. Картина распределения интенсивности в области перетяжек может быть изменена с помощью поляризатора и четвертьволновой пластинки, выделяющих ортогонально поляризованную компоненту поля на выходе из кристалла. Системой линз с переменным фокусным расстоянием векторный пучок фокусируется в полость кюветы, заполненной взвесью образцов в дистиллированной воде. Мощность пучка, сфокусированного короткофокусной линзой (фокусное расстояние равно 5 мм), в зоне оптического захвата

составила 11 мВт. Устойчивое удержание объекта в заданной точке обеспечивалось в течение продолжительного времени (от 2 до 10 минут) в кювете с дистиллированной водой объемом 1 миллилитр. Скорость перемещения частиц в плоскости, перпендикулярной оси пучка (x,y), посредством ловушки составила 1,5 мм/с. Произвольное смещение частицы приводит к нагреву той ее части, которая попадает в максимум интенсивности. Результирующий перепад давления на холодной части частицы, ближайшей к центру пучка, и на горячей периферии возвращает частицу в положение стабильного равновесия на ось «бу-тылочного» пучка.

Преимущество оптического захвата с интегрированной системой цифровой голографической микроскопии состоит в том, что препарат может быть расположен на произвольном отдалении от матрицы камеры, исключая непосредственный контакт с образцами, это увеличивает числовую апертуру системы и обеспечивает достаточное разрешение порядка длины волны, а пространство кюветы, экспериментально составившее 1 см³, полностью записывается на голограмме. Численное восстановление обеспечивается методом свертки, при этом камера монтируется на подвижном рейтере, позволяющем перемещать ее вдоль оси предметного пучка, тем самым достигается оптимальное качество восстановленного изображения микрочастиц, захваченных и удерживаемых векторным пучком.

Представленное в настоящей работе исследование было поддержано Программой развития Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского и при финансовой поддержке РФФИ совместно с Советом министров Республики Крым в рамках исследовательского проекта № 19-42-910010, а также в рамках проекта стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам № СП-745.2019.4.

Номер проекта РФФИ: 19-42-910010

High resolution study of $4\nu_2$ band of H_2S

Zhang F.¹, Ersin T.E.¹

¹Tomsk Polytechnic University

e-mail: zhangfangce@mail.ru

High-resolution Fourier transform infrared spectrum of H_2S in natural composition was recorded and analyzed in the region of the second hexade. More than 420 transitions were assigned to the $4\nu_2$ band and around 130 upper energy levels were obtained. The theoretical analysis was fulfilled with a Hamiltonian model which takes into account numerous resonance interactions between all the vibrational states in the polyad.

As one of the lightest triatomic and local-mode molecules, hydrogen sulfide attracts great spectroscopic interest. The detailed knowledge of hydrogen sulphide spectra has applications for terrestrial atmospheric pollutant measurements and for the investigation of the chemistry of atmospheres of Venus and outer planets [1-2]. The molecule H_2S is an asymmetric top. The value of asymmetric parameter is equal to 0.532. Symmetry group of the molecule H_2S is isomorphic to the point group C_{2v} [3]. Centers of its three fundamental bands ν_1 , ν_2 , ν_3 are located at 2614.44, 1182.53, 2628.37 cm^{-1} and have the symmetry A_1 , A_1 , B_1 , respectively. For the studied $4\nu_2$ band, selection rules are $\Delta J = 0, \pm 1$; $\Delta K_a = \pm (2n + 1)$; $\Delta K_c = \pm (2m + 1)$.

High-resolution spectra of the H₂S molecule have been recorded with a Michelson Fourier transform spectrometer Bruker IFS-125 HR equipped with a stainless-steel cell at the Technical University of Braunschweig, Germany. Experimental conditions of recorded spectra of H₂S are: region is 3400 – 10400 cm⁻¹; temperature is 294 K; pressure is 20 mbar; pass-length is 163 m; spectral resolution is 0.01 cm⁻¹.

The ro-vibrational effective Hamiltonian model was used for the theoretical analysis. In this case, Hamiltonian has the form of Watson operator in the A-reduction and I^r representation and it describes rotational structure of corresponding vibrational state [4].

$$\begin{aligned}
 H^{v,v} = & E^v + \left[A^v - \frac{1}{2}(B^v + C^v) \right] J_z^2 + \frac{1}{2}(B^v + C^v) J^2 + \frac{1}{2}(B^v - C^v) J_{xy}^2 - \\
 & \Delta_{JK}^v J_z^4 - \Delta_{JK}^v J_z^2 J^2 - \Delta_J^v J^4 - \delta_K^v [J_z^2, J_{xy}^2] - 2\delta_J^v J^2 J_{xy}^2 + H_K^v J_z^6 + H_{KJ}^v J_z^4 J^2 + \\
 & H_{JK}^v J_z^2 J^4 + H_J^v J^6 + [J_{xy}^2, h_K^v J_z^4 + h_{JK}^v J^2 J_z^2 + h_J^v J^4] + L_K^v J_z^8 + L_{KKJ}^v J_z^6 J^2 + \\
 & L_{JK}^v J_z^4 J^4 + L_{KJJ}^v J_z^2 J^2 J^6 + L_J^v J^8 + [J_{xy}^2, l_K^v J_z^6 + l_{KJ}^v J^2 J_z^4 + l_{JK}^v J^4 J_z^2 + l_J^v J^6] + P_K^v J_z^{10}
 \end{aligned}$$

In order to assign transitions in the experimentally recorded spectra, the ground state combination differences (GSCD) method was used. More than 420 ro-vibrational transitions have been assigned and 130 upper energy levels were obtained from these transitions for the studied 4v₂ band. As a result of analysis, set of spectroscopic parameters was obtained.

Список литературы

1. Thaddeus P, Kutner M L, Penzias A A, Wilson R W, Jefferts K B 1972 *Astrophys J* 176 L73-L76
2. Farquhar J, Bao H, Thiemens M 2000 *Science* 289 756-758
3. Herzberg G 1945 *Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules* (New York: Krieger Publishing Company) p 632
4. Watson J K G 1967 *J. Chem. Phys.* 46 1935-1949

Номер проекта РФФИ: 19-32-90069

Влияние геометрии области связи на характеристики передачи оптических кольцевых резонаторов

Зарецкая Г. А.¹, Дроздовский А.В.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: shishmacova@gmail.com

В последнее десятилетие интегральные кольцевые резонаторы на основе оптических микроволноводов нашли широкое применение в таких областях науки и техники, как интегральная оптика и радиофотоника [1, 2], биохимическое зондирование [3, 4] и другие. Одной из основных задач при проектировании таких резонаторов является задача учета влияния области связи резонатора с подводящей и отводящей линией на его характеристику передачи и на нагруженную добротность.

В данной работе представлены результаты численного исследования влияния геометрических параметров области связи оптического кольцевого резонатора, на значения коэффициента передачи и нагруженной добротности. Проведенное численное

моделирование демонстрирует, что при увеличении расстояния между волноводом и резонатором происходит изменение коэффициента связи и режима работы резонатора от пересвязанного, через критический режим, к недосвязанному режиму работы. При уменьшении коэффициента связи положение резонансов сдвигается в область высоких частот и стремится к значению частоты собственных колебаний резонатора. Одновременно значение добротности стремится к значению собственной добротности резонатора.

Следует отметить, что для проведения численного анализа области связи использовалась разработанная оригинальная аналитическая теория связи интегральных оптических микроволноводов. Аналитическая теория связи строилась на теории оптических потерь в прямоугольном диэлектрическом микроволноводе [5], решения которой в дальнейшем использовались как элементы разложения по собственным модам с последующим применением к ним формулировки модифицированной теории связанных мод, предложенной в [6]. При этом в ходе решения задачи было принято условие, что радиус кольцевого резонатора много больше длины волны оптического излучения в рассматриваемом волноводе, то есть в области связи волноводы почти параллельны. Тогда, электромагнитные поля в волноводах могут быть представлены модальными полями в регулярном базовом не искривлённом волноводе, а излучательные потери на изгибе будут пренебрежимо малы. Для упрощения математической задачи использовались уравнения связанных мод для случая параллельных волноводов, состоящих из k отрезков. При этом начальная амплитуда на каждом отрезке равна конечной амплитуде на предыдущем.

Во второй части работы показано сопоставление результатов, полученных теоретическим путем, с результатами экспериментального исследования интегральных оптических кольцевых резонаторов из микроволноводных структур. Микроволноводные структуры были изготовлены в АО «ОКБ-Планета» методами электронной литографии и плазмохимического травления. В качестве материалов микроволноводов использовался Si_3N_4 , а окружающего пространства – SiO_2 . Размеры поперечного сечения волноводов в структуре составляли $1,5 \times 0,7$ мкм, а радиус кольцевых резонаторов был равен 1 мм и 2,5 мм. В результате получено качественное совпадение характеристик передачи структур, полученных экспериментально и в результате численного моделирования. Таким образом, проведенное сравнение результатов подтверждает адекватность разработанной теории.

Работа поддержана проектом Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Qiu H., et al., A Continuously Tunable Sub-gigahertz Microwave Photonic Bandpass Filter Based on An Ultra-high-Q Silicon Microring Resonator, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 36 No. 19, 4312-4318, 2018
2. Kawamura Y., et al., Flexible four-channel silicon-external-cavity laser with a shared ring resonator, *Photonics Conference (IPC)*, 262-263, 2014
3. Ciminelli C., et al., High performance SOI microring resonator for biochemical sensing, *Optics & laser technology*, Vol. 59, 60-67, 2014
4. Sun Y., Fan X., Optical ring resonators for biochemical and chemical sensing, *Analytical and bioanalytical chemistry*, Vol. 399, No. 1, 205-211, 2011
5. Zaretskaya G. A., et al. Influence of the geometric and physical parameters of the dielectric optical micro-waveguides with rectangular cross section on their losses, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1400, No. 6, 2019
6. Barybin A. A., Dmitriev V. A., *Modern electrodynamics and coupled-mode theory: Application to guided-wave optics*, Princeton (NJ): Rinton Press, 2002

Устойчивость связанных состояний в континууме в низкоконтрастных фотонных структурах

Маслова Е. Э.¹, Рыбин М.В.^{1,2}

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ekaterina.maslova@metalab.ifmo.ru

Связанные состояния в континууме (ССК) являются резонансами с бесконечной добротностью [1]. Хотя бесконечная добротность является математической абстракцией, в реальных образцах могут возбуждаться высокодобротные суперрезонансные моды, природа которых соответствует идеальным ССК [2].

В данной работе рассматривается зависимость добротности двухслойного резонатора, состоящего из диэлектрических цилиндров, от количества периодов. Добротность ССК защищенных симметрией была получена из спектров пропускания с помощью аппроксимации функцией Фано. В отсутствие материальных потерь добротность ССК увеличивается по кубическому закону от количества периодов N . Наличие материальных потерь приводит к ограничению добротности Q для большого количества периодов. При значении тангенса угла диэлектрических потерь оценка максимально достижимой добротности резонатора составляет 2500. Однако, поскольку электромагнитное поле моды сосредоточено между двумя слоями структуры, а не в объеме цилиндров с поглощением, добротность превосходит ожидаемое значение 2500. Для 200 и более периодов добротность приблизительно равна 15000, что соответствует эффективному значению тангенса угла диэлектрических потерь для обычных резонаторов. Таким образом, в периодических структурах с низким показателем преломления ограничение добротности, связанное с материальными потерями, преодолевается локализацией поля вне объема диэлектрика.

Мы проанализировали влияние беспорядка на добротность связанных состояний континуума. Беспорядок был получен путём случайного изменения координат проводов по двум осям. Степень беспорядка σ определялась как $\sigma = s \cdot a$, где s – параметр беспорядка, a – постоянная решётки. Было выполнено 100 реализаций для каждого значения беспорядка. Мы рассчитали значение добротности и частоту резонанса для каждой реализации и провели статистический анализ. Анализировалось распределение добротности и среднего значения частоты для структуры с беспорядком $\sigma = 0.01 \cdot a$. Полученные данные хорошо соответствуют нормальному распределению. Мы провели аналогичную процедуру для всех исследуемых значений параметра s и построили зависимости среднего значения добротности и частоты резонанса от параметра s . Результаты показывают, что при увеличении степени беспорядка добротность падает по экспоненциальному закону.

Среднее значение частоты резонанса увеличивается линейно с увеличением степени беспорядка. Однако стоит отметить, что с увеличением степени беспорядка дисперсия положения частоты также увеличивается.

Список литературы

1. C. W. Hsu et al., Nat. Rev. Mater. 2016, 1, 16048.
2. Rybin M., Kivshar Y., Nature 2017, 541(7636), 164-165.

Исследование оптических свойств образцов твердых растворов $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, изготовленных различными методами

Ружевич М. С.¹, Баженов Н.Л.², Мынбаев К.Д.², Ремесник В.Г.³

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН

e-mail: mazaahakaa@gmail.com

Твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) являются важным материалом для изготовления фотоприемников, работающих в инфракрасной области спектра. Одними из наиболее востребованных являются материалы с химическим составом (мольной долей CdTe) $x \approx 0.3$, так как их ширина запрещенной зоны (~ 250 мэВ при 77 К) соответствует энергии квантов средневолнового (длина волны 3–5 мкм) инфракрасного диапазона. В этом диапазоне работают оптические датчики контроля за состоянием атмосферы и системами промышленного производства, тепловизионные устройства и т.п.

Наиболее распространенными методами выращивания КРТ на сегодняшний день являются молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и, в меньшей степени, жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ). Для материала, выращенного каждым из этих методов, характерна специфическая дефектная структура (масштаб флуктуаций состава, наличие структурных и связанных с ними точечных дефектов, например, обусловленных несоответствием параметров решетки при использовании гетероподложки, и т.д.), которая может оказывать существенное влияние на параметры изготавливаемых приборов. В настоящей работе мы сообщаем о результатах сравнительных исследований оптических свойств (фотолюминесценции (ФЛ), оптического пропускания (ОП) и фотопроводимости (ФП)) образцов твердых растворов $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$, изготовленных различными методами.

Для исследований использовались эпитаксиальные слои $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с $x=0.29–0.32$, выращенные методами МЛЭ (подложки Si и GaAs), МОГФЭ (подложки GaAs) и ЖФЭ (подложки CdTe и CdZnTe), а также, для сравнения, монокристаллы, полученные твердотельной рекристаллизацией с подпиткой из твердой фазы. Сигнал ФЛ возбуждался полупроводниковым лазером с длиной волны 1.03 мкм и регистрировался охлаждаемыми фотоприемниками на основе InSb или HgCdTe. Спектры ФЛ записывались с использованием решеточного монохроматора в диапазоне температур 4.2–300 К. Спектры ОП и ФП записывались при температурах 77 и 300 К с использованием FTIR-спектрометров Shimadzu 8400 и Infracum-801.

Непосредственно после выращивания образцы, изготовленные методами МЛЭ и МОГФЭ, демонстрировали значительную степень разупорядочения твердого раствора, что выражалось в существенном отличии положения края ОП и максимума спектра ФЛ от значений, которых можно было бы ожидать, исходя из номинального химического состава исследуемого материала. После двухступенчатых термических отжигов (360 °С, 2 часа в насыщенных парах ртути, и 225 °С, 24 часа также в насыщенных парах ртути) данное отличие существенно уменьшилось. В то же время значения полуширины (ширины на половине высоты) линии межзонной (экситонной) ФЛ при 77 К во всех изученных структурах оказались близки. В эпитаксиальных структурах, выращенных на гетероподложках, были обнаружены акцепторные состояния, предположительно связанные связанные со спецификой ростовых процессов. В работе анализируется вероятная связь выявленных дефектов с особенностями рассмотренных ростовых технологий.

Поляризационные особенности несимметричных ТЕ и ТМ вихревых мод

Егоров Ю. А.¹, Брецько М.В.¹, Акимова Я.Е.¹, Милюков В.В.¹

¹КФУ им. В.И. Вернадского

e-mail: yuriy75@yandex.ru

Данное исследование посвящено новому разделу в области сингулярной оптики – пучкам, переносящим дробный топологический заряд. Особенностью такого типа пучков являются структурная неустойчивость и при малейшем внешнем возмущении данные пучки формируют массивы оптических вихрей. Эти вихри могут быть связаны, и как бы формировать целостную картину, либо распадаться за счёт того, что при распространении каждый из вихрей получает дополнительный фазовый набег. В основу данных исследований был положен теоретический расчет и экспериментальное исследование векторной структуры пучков переносящих оптические вихри с дробным топологическим зарядом и доказательство процесса формирования несимметричных ТЕ (поперечно электрических) и ТМ (поперечно магнитных) мод в свободном пространстве, и изучение особенностей их «тонкой» векторной структуры в свободном пространстве.

«Тонкая» структура этих полей изменяется вдоль длины пучка, так что пучки являются структурно неустойчивыми при распространении в свободном пространстве. В отличие от стандартных ТЕ и ТМ мод асимметричные поля парааксиального пучка эллиптически поляризованы в каждой точке поперечного сечения пучка с характерными ориентациями осей эллипса. Вблизи оптической оси поле имеет тенденцию образовывать две поляризационные особенности вида (звезда или лимон). Вдали от центра направления линейной поляризации закручены в виде архимедовой (для ТЕ) или логарифмической (для ТМ) спирали

Отличительной особенностью пучков является также их способность объединять вихри целочисленного порядка в один с дробным топологическим зарядом в дальней зоне дифракции, когда собственный параметр является чисто вещественным значением, тогда как чисто мнимое значение собственного параметра вызывает обратный процесс – дробный вихрь распадается на бесконечное число вихрей целого порядка. Такое поведение пучка отражает врожденные процессы в вихревых структурах дробного порядка в отличие от представления о неизбежном затухании вихрей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-01233.

Список литературы

1. Cardano F. Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges / F. Cardano, E. Karimi, S. Slussarenko, L. Marrucci, C. de Lisio, E. Santamato // *Appl. Opt.* – 2012. – Vol.51. – C1–C6.
2. Song D. Experiments on Linear and Nonlinear Localization of Optical Vortices in Optically Induced Photonic Lattices / D.Song, C. Lou, L. Tang, Z. Ye, J. Xu, Z. Chen // *Int. J. Optics.* – 2012. – Vol.2012. – Article ID27385.
3. Okulov A. Yu., 3D-vortexlabyrinths in the near field of solid-state microchip laser / A.Yu. Okulov // *J. Mod. Optics.* – 2008. – Vol.52(2). – P.241.
4. C. N. Alexeyev, Yu. A. Egorov, and A. V. Volyar Mutual transformations of fractional-order and integer-order optical vortices / C. N. Alexeyev, Yu. A. Egorov, and A. V. Volyar // *Physical Review A.* – 2017. – Vol. 96. – P.063807

5. Gutiérrez-Vega J. C. Nondiffracting vortex beams with continuous orbital angular momentum order dependenc // J. C. Gutiérrez-Vega, C. López-Mariscal // J. Opt. Soc. Am. A. – 2008. – Vol.10. – P.015009.
6. Fadeyeva T.A. Vector erf-Gaussian beams: fractional optical vortices and asymmetric TE and TM modes / T. Fadeyeva, C. Alexeyev, A. Rubass, and A. Volyar // Opt. Lett. – 2012. – Vol.37. – P.1397-1399.
7. Fadeyeva T.A. Does the optical angular momentum change smoothly in fractional-charged vortex beams? / T.A. Fadeyeva, A.F. Rubass, R.V. Aleksandrov, A.V. Volyar // J. Opt. Soc. Am.B – 2014. – Vol.31. – P.798-805.
8. Leach J. Observation of the vortex structure of a non-integer vortex beam / J. Leach, E. Yao, and M. J. Padgett // New J. Phys. – 2004. – Vol.6. – P.71.
9. Volyar A. V., Bretsko M. V., Akimova Ya. E., Egorov Yu. A. Beyond the light intensity or intensity moments and measurements of the vortex spectrum in complex light beams. Computer Optics. – 2018. – 41(1). – P.736-743.

Номер проекта РФФИ: 19-29-01233 МК

Люминесцентные свойства рентгеноаморфного зольгель материала на основе SiO_2 со структурой кристабалита, активированного Eu^{3+}

Кравец В. А.¹, Иванова Е.В.¹, Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vladislav2033@yandex.ru

Оксидные диэлектрические материалы, активированные редкоземельными ионами (РЗИ), являются перспективным радиационно-стойким сцинтилляторами [1]. В связи с этим, одним из наиболее актуальных направлений является разработка методов синтеза оптически однородных стеклокристаллических материалов на основе оксидов, активированных РЗИ. Подобные гибридные материалы совмещают в себе свойства как стекол, так и кристаллов. Их синтез и последующая обработка аналогична синтезу и обработке стекла. Матрицы на основе оксида кремния обладают высокой химической и термической стойкостью, что немаловажно при взаимодействии с высокоэнергичным ионизирующим излучением. Поэтому, в качестве матрицы для низкотемпературного синтеза оксидной стеклокерамики, легированной РЗИ, была выбрана кварцевая золь-гель матрица, пропитанная солями Y, Eu и Nb. Данная матрица характеризуется относительно низкой температурой синтеза (около 1200 °С). Предполагалось, что при спекании и последующем медленном охлаждении в золь-гель кремниевой матрице образуется нанокристаллиты, активированные ионом европия.

Целью данной работы является исследование состава, идентификация кристаллических фаз выполнено рентгеноспектрального микроанализа (EPMA) и рентгенофазового дифракционного анализа (XRD). Также задачей является проведение люминесцентных исследований Eu^{3+} в кварцевой золь-гель матрице, пропитанной солями Y, Eu и Nb методом локальной катодолюминесценции (CL), с целью изучить влияние структурных особенностей матрицы на спектры Eu^{3+} .

Одним из подходов исследования структурных свойств материалов является использование люминесцентных центров в качестве люминесцентного зонда. Этот подход позволяет исследовать структуру легированного материала, в том числе ближний порядок аморфных материалов [2, 3]. Обычно при таком подходе материал активируется редкоземельными ионами (РЗИ), например, Eu^{3+} . Спектр люминесценции европия определяется переходами внутри f -оболочки и представляет собой набор узких полос, которые связаны с переходами между уровнями иона $^5\text{D}_1$ и $^7\text{F}_j$. Интенсивность электродипольного перехода $^5\text{D}_0 - ^7\text{F}_2$ крайне чувствительна к локальной симметрии иона, в отличие от самого интенсивного магнитодипольного перехода $^5\text{D}_1 - ^7\text{F}_2$. Положение, соотношение интенсивностей полос и количество расщеплений в спектрах европия зависят от локальной симметрии иона в материале, что дает возможность делать однозначные выводы о изменении локальной симметрии иона европия в материале при изменении соотношения интенсивностей и количество расщеплений полос Eu^{3+} в спектре.

Методом ЕРМА показано, что в золь-гель кремнёвой матрице растворяются лишь соевые доли оксидов Y, Eu и Nb, что недостаточно для кристаллизации ниобата редких земель. Методом XRD было продемонстрировано, что в условиях синтеза без резкого охлаждения образца получается материал на основе рентгеноаморфного SiO_2 , также была обнаружена кристаллическая фаза кристабалита. Методом CL было показано, что в образце образовалась приповерхностная область толщиной около 100 мкм, значительно отличающийся по своим люминесцентным свойствам от основной матрицы. Были получены CL спектры основной матрицы и приповерхностной области. Показано, что структура спектров CL Eu^{3+} в зависимости от области образца имеет значительные отличия, что свидетельствует о разных занимаемых позициях Eu^{3+} . Продемонстрировано, что спектры Eu^{3+} в приповерхностной области характерны для кристаллического материала, а спектры основной матрицы соответствуют суперпозиции спектров Eu^{3+} с различными локальными позициями, при этом спектр не характерен для стекла.

Авторы благодарны Яговкиной М. А. за XRD-исследования. XRD-исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», поддержанного Минобрнауки России (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0018). Также авторы благодарны В.В. Васильеву, М.И. Москвичёву за предоставленные образцы. Работа поддержана грантом РФФИ 19-32-90021.

Список литературы

1. Иванова, Е. В., Орехова, К. Н., Кравец, В. А., Трофимов, А. Н., Попова, Т. Б., & Заморянская, М. В. (2018). Катодолюминесценция оксидных материалов, активированных редкоземельными ионами. Труды Кольского научного центра РАН, 9(2-1).
2. Kravets, V. A., Orekhova, K. N., Yagovkina, M. A., Ivanova, E. V., & Zamoryanskaya, M. V. (2018). Eu^{3+} As a Luminescent Probe for Studying the Structure of R_2O_3 Materials ($\text{R} = \text{Y}, \text{Eu}, \text{and Gd}$). *Optics and Spectroscopy*, 125(2), 188-194.
3. Orekhova, K. N., Eurov, D. A., Kurdyukov, D. A., Golubev, V. G., Kirilenko, D. A., Kravets, V. A., & Zamoryanskaya, M. V. (2016). Structural and luminescent properties of Gd oxide doped with Eu^{3+} embedded in mesopores of SiO_2 particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 678, 434-438.

Управление топологической структурой солитонов в лазере с насыщающимся поглощением

Розанов Н.Н.¹, Федоров С.В.¹, Веретенев Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nnrosanov@mail.ru

Диссипативные солитоны в лазере с насыщающимся поглощением подробно рассматривались как теоретически [1-3], так и экспериментально, в частности в схемах с полупроводниковым микрорезонатором с экситон-поляритонной нелинейностью с вертикальным выводом излучения, и когерентным поддерживающим излучением [4]. Насыщающийся поглотитель с близким резонансом к таковому в активных слоях, играет существенную роль для обеспечения устойчивости режимов генерации с пространственной локализацией излучения. Он позволяет реализовать бистабильность между устойчивым безгенерационным режимом и непрерывным режимом генерации, однородным или локализованным на части апертуры. При этом топологическая структура солитона существенно влияет на его устойчивость и возможности управления энергетическими потоками [2, 5].

В докладе рассмотрена задача о синхронизации диссипативного солитона слабым внешним когерентным управляющим сигналом. Показано, что в областях устойчивости симметричных (в отсутствие управляющего сигнала) солитонов с дислокациями волнового фронта, заданными значениями топологического заряда $m = 1, 2, 3$, введение такого излучения, синхронизованного по частоте с солитоном (с учетом нелинейного сдвига частоты), вообще говоря не нарушает устойчивости локализованного состояния, но приводит к существенному изменению его структуры. В ситуации общего положения вихревые особенности потоков энергии расходятся, образуя связанную комбинацию дислокаций. В зависимости от двух управляющих параметров – интенсивность поддерживающего пучка и расстройка его частоты относительно частоты моды резонатора – можно получить разные комбинации вихрей, отличающиеся структурой потоков энергии. В частности, можно сформировать одно-, двух- и трехвихревые структуры с сильной связью. Классификация типов связи основывается на топологических особенностях потоков энергии диссипативного солитона [6, 7]. Рассмотрена структура потоков энергии, задающая сверхсильную связь вихревых особенностей как в случае свободного солитона, так и при его синхронизации с поддерживающим излучением. Определены области синхронизации и биений на плоскости управляющих параметров. Показано, что биения с поддерживающим излучением при увеличении расстройки могут приводить к рождению пар дополнительных вихрей с противоположными топологическими зарядами и к перестройке структуры потоков энергии.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки способов управления локализованными областями генерации и изменения их структуры в полупроводниковых лазерах, в том числе поляритонных.

Данное исследование частично поддержано грантом РФФИ 19-12-50174.

Список литературы

1. Розанов, Н.Н., Диссипативные оптические солитоны. М.: Физматлит, 2011
2. Rosanov, N.N., Fedorov, S.V., Topology of energy fluxes in vortex dissipative soliton structures, *J. Opt.* 18, 074005, 2016
3. Veretenov, N.A., Fedorov S.V., Rosanov N.N., Topological vortex and knotted dissipative optical 3D solitons generated by 2D vortex solitons. *Phys. Rev. Lett.* 122, 023903, 2017

4. Sich, M. et al. Observation of bright polariton solitons in a semiconductor microcavity. *Nat. Photon.* 6, 50–55, 2011
5. Rosanov, N.N., Fedorov, S.V., Veretenov, N.A., *Laser Solitons in 1D, 2D and 3D.* EPJD July 73, 141, 2019
6. Розанов, Н.Н., Федоров, С.В., Шацев, А.Н., Структура энергетических потоков и ее бифуркации для двумерных лазерных солитонов. *ЖЭТФ*, 125, № 3, 486–498, 2004
7. Федоров, С.В., Розанов, Н.Н., Веретенев, Н.А., Структура энергетических потоков в топологических трехмерных диссипативных солитонах. *Письма в ЖЭТФ* 107, № 5, 342 – 346, 2018

Номер проекта РФФИ: 19-12-50174

Рентгеноспектральные исследования титанатов кальция-меди

Некипелов С. В.^{1,2}, Жук Н.А.², Мингалева А.Е.¹, Петрова О.В.¹, Сивков Д.В.^{1,3}, Сивков¹

¹ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

²СГУ им. Питирима Сорокина

³СПбГУ

e-mail: Nekipelovsv@mail.ru

Титанат кальция-меди $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (ССТО) – это материал с необычно высокой диэлектрической проницаемостью ε (до 10^5) и ее слабой температурной зависимостью в широком диапазоне температур (100 – 500 К). При этом допирование ССТО атомами различных металлов приводит к существенному уменьшению диэлектрической проницаемости, которая к тому же сильно зависит от степени допирования [1-3]. ССТО имеет кубическую ячейку, которая в $2 \times 2 \times 2$ раза больше ячейки пировскита ABO_3 , с атомами Ca/Cu на позициях А и Ti в позициях.

Нами выполнены спектральные исследования ССТО, допированных атомами марганца, железа, кобальта и никеля, синтезированных по керамической методике и стабильных при высокой температуре. Образцы были исследованы методами NEXAFS (Near Edge X-ray Absorption Fine Structure)-спектроскопии с использованием синхротронного излучения накопителя BESSY II (Берлин, Германия). NEXAFS-спектры были получены методом регистрации полного электронного выхода (Total electron yield, TEY). XPS-исследования были проведены на рентгеновском спектрометре Thermo Scientific ESCALAB 250Xi. ресурсного центра Научного парка СПбГУ "Физические методы исследования поверхности".

Анализ полученных спектров показывает: (i) в соединениях ССТО атомы титана имеют зарядовое состояние $+3/+4$, а атомы меди и кальция – $+2$, и их валентность не меняется при допировании атомами внедрения при концентрации последних до 6% в массовом выражении; (ii) допированные атомы в основном внедряются в позиции В (занятые атомами Ti в структуре ССТО) и имеют валентность (зарядовое состояние), в основном Mn^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} и Co^{2+} , с частичной примесью Mn^{3+} и Fe^{2+} .

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-32-60018 и двухсторонней программы Российско-Германской лаборатории на BESSY II.

Список литературы

1. Subramanian M. A., D. Li, N. Duan, B. A. Reisner, A. W. Sleight., J. Solid State Chem. 2000, 151, 323-329.
2. Ahmadipour M., M. F. Ain, Z. A. Ahmad. Nano-Micro Lett., 2016, 8, 291-311.
3. Pongpaiboonku S., D. Phokharatku, J. H. Hodak, A. Wisitsoraat, S. K. Hodak. Sensors and Actuators B, 2016, 224, 118–127.

Номер проекта РФФИ: 19-32-60018

Frequency shifts of the magnetic resonance of Rb and K atoms in the Rb-K tandem magnetometer

Картошкин В. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: victor.kart@mail.ioffe.ru

Recently, much attention has been paid to quantum magnetometers with optical pumping of alkaline atoms. This is due, in particular, to the possibility of their use in various applications, for example, in quantum gyroscopes and magneto encephalographs. At the same time, along with the “classical” quantum magnetometer with optical pumping of atoms of the same sort (Cs, Rb or K), there are magnetometers using a mixture of alkaline atoms. A magnetometer using this principle is often called tandem.

An example of such a magnetometer is a tandem magnetometer, in which a mixture of cesium and potassium atoms is used. However, it is possible to implement a tandem magnetometer on the other alkali metal atoms, such as Rb and K.

The presence of two types of alkali metal atoms in the working chamber leads to collisions between them. Thus, in the absorption chamber both collisions between K atoms, and collisions between Rb atoms, and collisions between K and Rb atoms occur. Collisions of alkali atoms in the ground state are accompanied by the exchange of electron polarization between the colliding atoms, which leads to the polarization transfer between them. It is the well known process of spin-exchange. As a result of this process, the electronic orientation is transferred between the colliding particles. In spin-exchange collisions, along with the polarization transfer, the magnetic resonance frequency shifts of polarized atoms occur too.

The principle of operation of quantum magnetometers is based on the dependence of the magnetic resonance frequency of polarized atoms on the magnitude of the magnetic field in which they are located. The presence of the magnetic resonance frequency shifts influence on the accuracy of quantum magnetometers. In the case of using of different types of alkali atoms in the chamber, the collisions between both identical and different atoms effect on the frequency shift. In this work, the magnetic resonance frequency shifts in a mixture of Rb-K at the optical orientation of atoms are considered and the magnitude of the magnetic resonance frequency shifts for the case of a mixture of rubidium and potassium atoms in the absorption chamber are calculated.

Поляризованная флуоресценция молекул ФАД в растворах при возбуждении лазерным излучением

Краснопевцева М.К.¹, Белик В.П.¹, Семенова И.В.¹, Смолин А.Г.¹, Васютинский О.С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: marina.krasnopevtceva@gmail.com

Флавин аденин динуклеотид (ФАД) является биологическим коферментом, находящимся в большинстве живых клеток и вовлеченным в окислительно-восстановительные реакции. Исследование флуоресценции ФАД в клетке позволяет изучить клеточные свойства в нормальном и патологическом состояниях, что может быть использовано для разработки методов диагностики социально значимых заболеваний, например, онкологических [1].

В настоящей работе было проведено исследование поляризованной флуоресценции ФАД при возбуждении пикосекундными лазерными импульсами в водных растворах метанола различной концентрации. Длина волны возбуждающего излучения составляла 452 нм, а флуоресценция наблюдалась на нескольких длинах волн в полосе 510-570 нм. В эксперименте были определены времена жизни возбужденных состояний ФАД, время вращательной диффузии и параметр анизотропии. Установлено, что затухание поляризованной флуоресценции в водном растворе ФАД характеризуется двумя временами жизни $\tau_1 = 4.19 \pm 0.14$ нс и $\tau_2 = 2.13 \pm 0.18$ нс и временем вращательной диффузии $\tau_{rot} = 0.26 \pm 0.03$ нс, которые практически не зависели от длины волны флуоресценции. Отношение соответствующих весовых коэффициентов оказалось равным 0.6. В работе также получены и проанализированы зависимости параметров флуоресценции ФАД от концентрации метанола в растворе (20%, 40%, 60% и 80%). Обсуждаются возможные причины существования двух времен затухания у ФАД и зависимость времени вращательной диффузии от вязкости раствора.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант № 18-53-34001.

Список литературы

1. Pradhan, A., Pandey, P. K., Singh, P. Overview of Fluorescence Spectroscopy in Early Cancer Detection // In: Neurophotonics and Biomedical Spectroscopy. R. R. Alfano and L. Shi Eds. Amsterdam, Oxford, Cambridge: Elsevier, 2019. P. 253–328.

Номер проекта РФФИ: 18-53-34001

Оптическая стеклокерамика на основе наноразмерных кристаллов алюмомагниево-железистой шпинели, допированной железом

Букина В.С.¹, Дымшиц О.С.², Алексеева И.П.², Хубецов А.А.², Запалова С.С.², Центр М.Я.², Басырова Л.Р.³, Волокитина А.А.³, Лойко П.А.⁴, Жилин А.А.²

¹Санкт-Петербургский горный университет

²АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»

³ Университет ИТМО⁴ CIMAP, CNRS, Université de Caen Normandie

e-mail: nakara.oriyara@mail.ru

Импульсные наносекундные лазеры среднего ИК диапазона нашли применение в дальнометрии, медицине, метеорологии. Для управления импульсом в таких лазерах в качестве пассивных затворов используются насыщающиеся поглотители, в частности, ZnS и ZnSe, допированные ионами железа в тетраэдрических позициях [1]. Кристаллы алюмомагниевого шпинели, обладающие высокими термомеханическими свойствами, являются альтернативными матрицами для ионов Fe^{2+} [2] и могут быть получены в прозрачных стеклокристаллических материалах (СКМ).

В работе исследовались СКМ на основе титансодержащего магневоалюмосиликатного стекла, допированного оксидом железа, Fe_2O_3 , и синтезированного в окислительных условиях при температуре 1580 °С с принудительной гомогенизацией расплава. Стекло было отлито на холодную металлическую плиту и отожжено. Стекло было термообработано в две стадии, первая при 750 °С в течение 6 ч. и вторая – в интервале температур 800 – 1300 °С в течение 6 ч. СКМ, полученные термообработкой в интервале температур 800 – 1050 °С, были прозрачными и окрашенными в коричнево-черный цвет. Образцы были исследованы методами рентгеновской дифракции (РФА), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) и просвечивающей электронной микроскопии. Спектры поглощения исходного и термообработанных образцов были записаны в спектральном диапазоне 250 – 3300 нм.

В результате термообработки исходного рентгеноаморфного стекла в нем выделяются кристаллы твердого раствора алюмотитаната магнезия и алюмомагниевого шпинели размером 5 – 15 нм. Согласно данным РФА, аморфное гало смещается в сторону меньших углов отражения, что свидетельствует о приближении состава остаточного стекла к кварцевому стеклу. С повышением температуры термообработки шпинель перекристаллизуется в сапфирин, при 1300 °С в образцах выделяются стабильные фазы кордиерита и рутила.

Спектр поглощения исходного стекла и СКМ связан с поглощением ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} . Он формируется коротковолновым краем ($\lambda = 360$ нм), широкой интенсивной неструктурированной полосой поглощения в видимой области спектра, связанной с ионами Fe^{3+} , широкой асимметричной полосой с $\lambda_{\text{макс}}$ около 1050 нм, обусловленной поглощением ионов Fe^{3+} и ионов Fe^{2+} , находящихся в стекле в октаэдрической позиции (переход ${}^5\text{T}_2 \rightarrow {}^5\text{E} ({}^5\text{D})$), очень слабой полосой с $\lambda_{\text{макс}}$ около 1750 нм (переход ${}^5\text{E} \rightarrow {}^5\text{T}_2 ({}^5\text{D})$), связанный с поглощением ионов Fe^{2+} в тетраэдрической позиции, и широкой полосой с максимумом около 2800 нм, обусловленной поглощением ОН-групп в стекле. В спектрах СКМ наблюдается немонотонный характер изменения положения УФ края поглощения. Наблюдается постепенное уменьшение интенсивности полосы поглощения в области 1000 нм и рост полосы в области 2000 нм, что однозначно связано с образованием кристаллов шпинели и вхождением ионов Fe^{2+} в тетраэдрические позиции в них. Интенсивность полосы с максимумом в области 2000 нм падает в спектре образца СКМ, в котором начинается перекристаллизация шпинели в сапфирин. Широкая асимметричная полоса с максимумом около 2700 нм структурируется, что вызвано вхождением ОН-групп в кристаллы шпинели.

Получены прозрачные СКМ, содержащие ионы Fe^{2+} в структуре кристаллов алюмомагниевого шпинели в тетраэдрических позициях. Спектроскопические свойства полученных материалов сопоставлены с их фазовым составом и структурой. Найдены условия получения СКМ с высоким поглощением в средней ИК области.

Благодарность гранту №19-03-00855 «Прозрачные стеклокерамики и оптические керамики на основе нанокристаллов ZnO, легированных ионами редкоземельных и переходных элементов, как новые материалы для оптоэлектроники и спинтроники».

Список литературы

1. Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Podmar'kov Yu.P., Savinova S.A., and Skasyrsky Ya.K. 3 J pulsed Fe: ZnS laser tunable from 3.44 to 4.19 μm . *Laser Phys. Lett.* 12. 2015. 1-6 p.
2. Basyrova L, Balabanov C, Belyaev A, Drobotenko V, Vitkin V, Dymshits O, Loiko P. Synthesis, structure and spectroscopy of Fe^{2+} : MgAl_2O_4 transparent ceramics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Accepted for publication.

Номер проекта РФФИ: 19-03-00855

Спектральный анализ плечевых тканей крыс после экспериментального моделирования стероиндуцированной остеорезорбции

Ягофарова Е. Ф.¹, Тимченко Е. В.¹, Тимченко П. Е.¹, Писарева Е. В.¹, Власов М. Ю.², Волова Л. Т.², Фролов О. О.¹, Федорова Я. В.¹, Тихомирова Г. П.¹, Романова Д. А.¹, Даниэль М. А.¹

¹Самарский университет

²Самарский государственный медицинский университет

e-mail: l_yagofarova@mail.ru

Стероидные гормоны глюкокортикоиды нашли широкое применение в медицине за счёт их ярко выраженного противовоспалительного эффекта. Однако было замечено, что их применение способствует развитию резорбционных процессов костной ткани. Экзогенная стероидная нагрузка сопровождается активными ионными замещениями в формуле гидроксиапатита, что ведёт к ускоренной потере минеральной составляющей и остеопатическим переломам. Скрытый характер протекания метаболических изменений костной ткани влечёт за собой необходимость прецизионного и своевременного мониторинга изменений структуры и состава кости. С другой стороны возникает проблема подбора эффективного лечения, которое позволит скорректировать побочные эффекты от приёма глюкокортикоидов.

В качестве материалов исследования были взяты 20 плечевых костей беспородных лабораторных крыс. Первой группе самцов вводили глюкокортикоиды в течение 28 суток в концентрациях 10, 20, 30, 40 мг/кг. Второй группе самцов вводили глюкокортикоиды в течение 28 суток в концентрациях 10, 20, 30, 40 мг/кг и проводили однократную инъекцию аллогенного ГАП (100 мг/кг) в день операции. Третья группа – контрольная.

Образцы были исследованы с помощью стенда, реализующего метод СКР, который состоит из высокоразрешающего цифрового спектрометра Shamrockst-303i, встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE (со спектральным диапазоном 200-1200 нм), волоконно-оптическим зондом RPB-785 для спектроскопии КР, совмещённым с лазерным модулем LuxxMasterLML-785.0RB-04 с длиной волны лазерного излучения 785 нм и с шириной линии <0,1 нм.

В результате проведена деконволюция спектров методом подбора спектрального контура и деконволюции функции Гаусса в программной среде MagicPlotPro 2.7.2, что позволило провести расширенный компонентный качественный и количественный анализ костной ткани у крыс в условиях микрогравитации. В результате проведенных исследований установлены спектральные различия между экспериментальными группами, которые наблюдаются на линиях 855 см^{-1} (Гидроксипролин), 956 см^{-1} ($\text{PO}^3\text{-4}$ Симметричные валентные колебания фосфата), 1069 см^{-1} (Карбонат валентные колебания CO_3^{2-}).

Голографическое формирование дифракционных структур в фотополимерном материале двумерными бесселеподобными световыми пучками с учетом двухпучковых взаимодействий

Долгирев В.О.¹, Шаррангович С.Н.¹, Семкин А.О.¹

¹ТУСУР

e-mail: vital2@mail.ru

Бесселевы световые пучки используются во многих областях, таких как: нелинейная оптика, оптическая метрология, проектирование атмосферных беспроводных линий телекоммуникаций, манипулировании наноразмерными объектами и др. [1, 2]. Бесселевы пучки не дифрагируют, имеют свойства восстановления, они сохраняют высокую интенсивность в приосевой области на больших расстояниях [1, 2]. Таким образом, актуальным на сегодняшний день предоставляется поиск доступного метода формирования таких пучков.

Одним из способов преобразования прошедших световых пучков в Бесселевые является использование дифракционных оптических элементов (ДОО). А один из эффективных методов формирования ДОО является голографический с применением фоточувствительных сред [3-5]. Эффективность голографического метода обусловлена тем, что существует возможность создавать различные дифракционные структуры (ДС), позволяющие преобразовывать световые пучки.

В данной работе исследуется процесс голографического формирования дифракционных структур двумерным бесселеподобным и квазиплоским световым полем в фотополимерном материале (ФПМ) с учетом двухпучковых взаимодействий.

При падении двух пучков света с различным профилем распределения интенсивности на ФПМ внутри образца под действием дифракции происходит изменение распределения интенсивности записывающего поля. Дифракционная решетка (ДР) продолжает формироваться в каждый момент времени. В областях же малого контраста формируется дополнительная решетка под действием влияния двухпучкового взаимодействия [6-8]. Формирование дополнительной решетки вызывает неоднородность амплитудно-фазового профиля всей решетки, что влечет к обмену энергией между пучками и смещению угла Брэгга при считывании ДР.

В данной работе разработана теоретическая модель формирования дифракционной структуры, позволяющей преобразовывать световые поля в двумерные бесселеподобные, и которая учитывает двухпучковое взаимодействие. Проведено экспериментальное исследование по голографическому формированию дифракционной структуры двумерным бесселеподобным и квазиплоским световым полем в ФПМ образце. Экспериментально

подтверждено, что уровень боковых максимумов дифрагировавшего светового пучка выше, по сравнению с записывающим пучком. Таким образом, получен ДОЭ, позволяющий преобразовывать плоские световые пучки в двумерные бесселеподобные.

Следовательно, для определения пространственного распределения показателя преломления ФПМ в процессе голографического формирования ДОЭ, необходимо учитывать двухпучковое взаимодействие записывающих световых пучков, что позволит более точно определить дифракционные характеристики сформированных оптических элементов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020 г.

Список литературы

1. Siviloglou G. A., Christodoulides D. N., Accelerating finite energy Airy beams, *Optics letters*, 32, 979–981, 2007
2. Хило Н.А., Петрова Е.С., Рыжевич А.А., Преобразование порядка бесселевых световых пучков в одноосных кристаллах *Квантовая электроника*, Т.31, 1, 85-89, 2001
3. Казак А.А., Казак Л.А., Толстик А.Л., Мельникова Е.А., Дифракционные ЖК элементы для формирования вихревых световых полей, *Вестник БГУ. Физика. Математика. Информатика*, 1, 3-6, 2011
4. Groshenko N. A., Makalish O. S., Volyar A. V., Optical vortices in the scattering field of magnetic domain holograms, *Technical Physics*, 43, 1450–1453, 1998
5. Carpentier A. V. et al., Making optical vortices with computer-generated holograms, *American Journal of Physics*, 76, 916–921, 2008
6. Довольнов Е.А., Шарангович С.Н., Голографическое формирование динамических дифракционных решеток пропускающего типа в фотополимерном материале при двухпучковом взаимодействии и малых контрастах, *Известия высших учебных заведений: Физика*, Т.49, 11, 35–43, 2006
7. Долгирев В. О., Шарангович С. Н., Дудник Д. И., Семкин А. О., Голографическое формирование дифракционных структур бесселеподобными световыми пучками с учетом самодифракции записывающих волн в фотополимерных материалах, *Известия РАН. Серия Физическая*, 84, 26–29, 2020
8. Dolgirev V. O., Sharangovich S. N., Semkin A. O., Holographic formation of diffractive optical elements in photopolymer with two-beam interactions taken into account, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 597, 012068, 2019

Моделирование фокусировки лазерного света полиэстровым микроцилиндром с металлическим покрытием

Савельева А. А.¹, Козлова Е.С.¹

¹Самарский университет

²ИСОИ

e-mail: lexis2450@gmail.com

Одним из способов фокусировки света является формирование наноджетов – сверх узких световых пятен, распространяющихся на несколько длин волн [1]. В качестве фокусаторов обычно используются различные микроэлементы, а иногда и целые группы микроэлементов. Например, в статье [2] это микроцилиндры, в статье [3] микросферы, в

статье [4] фокусатор представляет собой уже целую цепочку сферических и кубических цилиндров. В работе [3] описаны результаты численного моделирования фокусировки плоско поляризованного излучения с длиной волны $\lambda=600$ нм микросферами из кварцевого стекла. В работе [5] показано, что отверстие на теневой стороне микросферы позволяет улучшить параметры получаемого при фокусировке наноджета. Кроме того, для усиления интенсивности в области фокуса можно использовать поверхностный плазмон-поляритон, который возникает в результате взаимодействия света с металлом и распространяется вдоль раздела сред между диэлектриком и металлом [6]. Так, например, в [7] показано что, металлическая наноантенна позволяет уменьшить размер фокального пятна амплитудной зонной пластинки Френеля. Стоит отметить, что использование сверхмалых фокусных пятен имеет место в различных областях: в микроскопии, в нанолитографии, при создании оптических датчиков [8-10]. Представленный краткий обзор современных работ подтверждает актуальность тематики описанного в этой работе исследования.

В данной работе с помощью численного моделирования исследуется фокусировка ТМ-поляризованного электромагнитного излучения с длиной волны $\lambda = 633$ нм на цилиндрах из полиэстера с металлическими пленками на их теневой части. В качестве металлов рассматриваются серебро с показателем преломления $n_1 = 0,14368 + 3,8065j$ и золото с показателем преломления $n_2 = 0,3126 + 3,144j$. В качестве диэлектрика рассматривался полиэстер с показателем преломления $n_3 = 1,59$. В металлической оболочке на оптической оси предполагается отверстие для возможности пропускания света. В ходе исследования варьировались толщина металлической пленки и диаметр отверстия на теневой стороне цилиндра и оценивалась максимальная интенсивность излучения в фокусе. Моделирование проводилось в программном пакете FullWAVE (RSoft), в основе которого лежит метод конечных разностей во временной области (FDTD-метод). В работе используются следующие параметры моделирования: шаги дискретизации по пространству 5 нм, шаги дискретизации по времени 3 нм (используется псевдо-время ct , где c – скорость света в вакууме, t – время).

В первой части работы мы рассматривали диэлектрический цилиндр с радиусом $R=2,1749\lambda$ и серебряной пленкой. Диаметр отверстия был зафиксирован равным 100 нм, а толщина варьировалась от 10 нм до 120 нм. Моделирование показало, что оптимальной является толщина 90 нм. При фокусировке микроцилиндром с такими параметрами удалось достичь максимальных показателей для интенсивности фокусного пятна 10,61 отн. ед., в то время как обычный цилиндр дает фокус максимальной интенсивностью 7,73 отн.ед. Далее мы уменьшили диаметр отверстия до 80 нм и выполнили аналогичное исследование, варьируя теперь толщину пленки с шагом 10 нм от начального приближения 90 нм, полученного в предыдущем численном эксперименте. Для этого дизайна удалось достичь более высокого значения интенсивности 13,864 отн. ед., что практически в два раз больше чем интенсивность в фокусе обычного микроцилиндра. Во второй части работы мы рассмотрели золото. Ширина отверстия была зафиксирована на 100 нм, а толщина пленки варьировалась от 10 нм до 120 нм. Наилучший результат показал микроцилиндр с толщиной пленки 90 нм. Однако максимальная интенсивность в его фокусе оказалась меньше, чем для обычного микроцилиндра, в связи с чем в дальнейшей работе планируется сконцентрироваться на исследовании микроцилиндров с серебряным напылением на теневой стороне.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380).

Список литературы

1. Zhen Z., Anultranarrow photonic nanojet formed by an engineered two-layer microcylinder of high refractive-index materials, *Optics Express*, V. 27(6), doi.org/10.1364/OE.27.009178, 2019.
2. Kozlova E. S., Focusing of laser light by circular microcylinders with a metal shell, *Procedia Engineering*, V. 201, 36–41, 2017.
3. Cao Y., Deep Subwavelength-Scale Light Focusing and Confinement in Nanohole-Structured Mesoscale Dielectric Spheres, *Nanomaterials*, V. 9(186), doi:10.3390/nano9020186, 2019.
4. Liu C., Periodical focusing mode achieved through a chain of mesoscale dielectric particles with a refractive index near unity, *Optics Communications*, V. 434, 110-117, 2019.
5. Liu C., Photonic nanojet induced modes generated by a chain of dielectric, *Optik*, V. 127, 267–273, 2016.
6. Zheng, L., Experimental Demonstration of Surface Plasmon Polaritons Reflection and Transmission Effects, *Sensors*, V. 19, 4633, 2019.
7. D. Feng, 3D confinement of the focal spot of plasmonic Fresnel zone plate lens using gold bowtie nanoantenna, *J. Opt. Soc. Am. A*, V. 31, 2070-2074, 2014.
8. Minn, K., Enhanced subwavelength coupling and nano-focusing with optical fiber-plasmonic hybrid probe, *Opt. Express*, V. 27, 38098-38108, 2019.
9. Li, Y., Dual-Channel Light Intensity Modulation Method for Focusing in Projection Lithography, *IEEE Photonics Journal*, V. 8(1), DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2508419, 2016.
10. Chenb, F., Fe₃O₄@PDA immune probe-based signal amplification in surface plasmon resonance (SPR) biosensing of human cardiac troponin I, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, V. 177, 105–111, 2019.

Номер проекта РФФИ: 18-07-01380

Технологические аспекты роста и оптические свойства кристалла оксида галлия

Дмитрий П. Ю.¹, Спиридонов В.А.¹, Закгейм Д.А.¹, Бауман Д.А.¹, Романов А.Е.¹, Бугров В.Е.¹

¹Университет ИТМО

e-mail: Dmitriipnv@gmail.com

Рассмотрено влияние ростовых зон и среды роста на получение объёмного кристалла оксида галлия методом Чохральского. Изучены оптические свойства полученного кристалла оксида галлия.

Полупроводники и полупроводниковые структуры имеют широкое применение на сегодняшний день. С их помощью в мире получают диоды, транзисторы, элементы солнечных батарей и т.д. [1, 2]. Требование возможностей электроники и постоянный рост мощностей использования в микроэлектронике приводит к потребности в создании новых материалов для силовой электроники и оптоэлектроники. Одним из таких материалов является оксид галлия. Оксид галлия – это широкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 4,8-4,9 эВ. Оксид галлия один из немногих кристаллов, который возможно получать в виде объёмного кристалла, методом Чохральского или Степанова [2-5].

Для получения кристалла использовалась ростовая установка НИКА-3 с индукционным нагревом, которая позволяет растить кристаллы методами Чохральского и Степанова. В качестве исходного материала использовался порошок оксида галлия. Для получения расплава использовался иридиевый тигель. Все образцы синтезировались в замкнутой системе с постоянной атмосферой. В качестве атмосферы использовались углекислый газ и газ аргон в разных соотношениях.

В результате опытов по получению кристалла оксида галлия методом Чохральского было исследовано 3 конфигурации ростовой зоны. Переходом от переизлучающего кольца к индукционному нагреву самого тигля удалось добиться кислородосодержащих атмосфер. За счет преобразования ростовых зон, переходу к зоне типа «керамических труб» и использованию кислородосодержащих атмосфер, удалось добиться симметричного роста кристалла.

Путем скальвания кристалла был получен плоскопараллельный образец толщиной 1 мм и исследованы его оптические свойства. Спектроскопические исследования полученного образца показали, что он прозрачен в ближнем УФ и видимом диапазоне, полоса поглощения начинается от 250 нм. По экспериментальному спектру поглощения была оценена ширина запрещенной зоны, которая составила около 4,7 эВ. Согласно полученным результатам, можно предположить, что на данный момент технология отработана не полностью и в кристалле присутствуют дефекты.

В работе рассмотрены возможности практического применения материала. Исследовано и показано влияние ростовых зон и сред на возможность и качество получения кристалла оксида галлия. Сделан вывод, что наилучшим ростовым условием является использование ростовых зон типа «керамических труб» и использование кислородосодержащих атмосфер. Исследованы оптические свойства образца и оценена запрещенная зона кристалла, которая составила 4,7 эВ. По оцененной ширине запрещенной зоны сделан вывод, что на данный момент кристалл имеет дефекты и нарушение структуры.

Список литературы

1. Encarnación G. Villora, Kiyoshi Shimamura, Yukio Yoshikawa, Takekazu Ujiie, Kazuo Aoki, Applied Physics Letters 92, 202120, 2008.
2. H. Aida, K. Nishiguchi, H. Takeda, N. Aota, K. Sunakawa, Y. Yaguchi // Japanese Journal of Applied Physics 47(11), 506, 2008.
3. Wan Sik Hwang, A. Verma, H. Peelaers, V. Protasenko, S. Rouvimov, Huili (Grace) Xing, A. Seabaugh, W. Haensch, C. Van de Walle, Z. Galazka, M. Albrecht, R. Fornari, D. Jena // Applied Physics Letters 104, 203111, 2014.
4. Z. Galazka, R. Uecker, K. Irmscher, M. Albrecht, D. Klimm, M. Pietsch, M. Brutzam, R. Bertram, S. Ganschow, R. Fornari // Crystal Research and Technology 45(12), 1229, 2010.
5. Encarnación G. Villora, Kiyoshi Shimamura, Yukio Yoshikawa, Kazuo Aoki, Noboru Ichinose // Journal of Crystal Growth 270, 420, 2004.

Распространение оптических вихрей с топологическим зарядом $l > 1$ в скрученных анизотропных оптических волокнах

Баршаев Е.В., Алексеев К.Н., Викулин Д.В., Лапин Б.П., Яворский М.А.

ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»

e-mail: barshakev@cfuv.ru

В процессе развития волоконной оптики и ее перспективном применении в информационных технологиях все большее значение приобретают вихревые оптические пучки, что связано со способностью оптических вихрей (ОВ) переносить орбитальный угловой момент (ОУМ) [1]. В настоящее время ОУМ-технологии, использующие орбитальные степени свободы оптического излучения, имеют ряд преимуществ над традиционными способами кодирования информации. Так, техника ОУМ-мультиплексирования позволяет существенно повысить пропускную способность линии связи [1, 2], поскольку значения ОУМ, определяемые топологическим зарядом ОВ $l=0, 1, 2, \dots$, теоретически не ограничены. Кроме того, передача информации на ортогональных состояниях ОВ с разными значениями ОУМ обеспечивает принципиально новый уровень защиты информации [3].

Большую роль в реализации потенциала ОВ с ОУМ в информационной сфере играет выбор оптической среды, позволяющей передавать ОВ, не разрушая их структуру. Известно, что ОВ – особые решения волнового уравнения – принадлежат к семейству мод высших порядков некоторых типов оптических волокон. Большое количество работ мировой научной литературы были посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям оптических волокон [4-6], поддерживающих устойчивое по отношению к малым внешним возмущениям распространение ОВ. Основные исследования этого направления касались ОВ с единичным топологическим зарядом. Вместе с тем, развитие основанных на ОУМ технологий, очевидно, требует детального исследования распространения ОВ с топологическим зарядом $l > 1$.

В данной работе исследовалось распространение оптических пучков в скрученных оптических волокнах с крутильными механическими напряжениями, в которых наведена одноосная линейная анизотропия материала волокна. Было продемонстрировано, что модами высших порядков с азимутальным числом $l > 1$ являются эллиптически поляризованные ОВ с топологическим зарядом l . Были получены аналитические выражения соответствующих постоянных распространения при произвольных соотношениях параметров волокна, а именно величины скрутки, спин-орбитального взаимодействия и анизотропии материала. Установленные выражения позволяют решить важную задачу подбора оптимальных параметров скрученных анизотропных волокон, при которых достигается режим структурно устойчивого распространения ОВ с целым (>1) ОУМ на фотон.

Работа выполнена при финансовой поддержке, оказанной в рамках Программы развития Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского на 2015-2024 гг., проект № ВГ02/2020.

Список литературы

1. Padgett M. J. Orbital angular momentum 25 years on, *Optics Express*, vol. 25., 11265, 2017.
2. Willner A.E., Huang H., Yan Y., Ren Y., Ahmed N., Xie G., et al., Optical communications using orbital angular momentum beams, *Advances in Optics and Photonics*, vol. 7, 66, 2015.
3. Franke-Arnold S., Barnett S., Yao E., Leach J., Courtial J., Padgett M., Uncertainty principle for angular position and angular momentum, *New Journal of Physics*, vol. 6, 103, 2004.

4. Bozinovic N., Yue Y., Ren Y., Tur M., Kristensen P., Huang H., Willner A. E., Ramachandran S., Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers, *Science*, vol. 340, 1545-1548, 2013.
5. Barshak E. V., Alexeyev C. N., Lapin B. P., Yavorsky M.A., Twisted anisotropic fibers for robust orbital-angular-momentum-based information transmission, *Physical Review A*, vol. 91, 033833, 2015.
6. Alexeyev, C. N. Are optical vortices robust in twisted fibres, *Journal of Optics*, vol. 14, 085702, 2012.

 Номер проекта РФФИ: 17-42-92014

Особенности рассеяния света на димере вблизи исключительной точки

Дмитриев А. А.¹, Рыбин М.В.^{1,2}

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexey.dmitriev@metalab.ifmo.ru

В квантовой механике и оптике возрос интерес к гамильтонианам, обладающим свойством \mathcal{PT} -симметрии — это более слабое, чем эрмитовость, требование к гамильтониану, для того, чтобы его спектр был вещественным [1]. В оптике существует простая реализация системы, обладающей свойством \mathcal{PT} -симметрии: два связанных волновода, в одном из которых имеется усиление, а в другом — затухание с таким же показателем. Обобществление моды между волноводами при этом описывается константой связи. Если константа связи больше, чем показатель затухания, то константы распространения — аналог собственных частот, — являются вещественными и соответствуют симметричной и антисимметричной модам. Если же константа связи меньше показателя затухания, то происходит *разрушение* \mathcal{PT} -симметричного режима — собственные частоты становятся комплексными. В точке, в которой константа связи и показатель затухания равны друг другу, две собственные моды перестают быть ортогональными друг другу и вырождаются в одну. Эту точку называют *исключительной* [2].

В данной работе мы применяем идеологию \mathcal{PT} -симметрии к димеру из резонансных частиц с усилением и поглощением. В отличие от волноводов, у частиц есть радиационное затухание. Из-за этого собственная частота в исключительной точке оказывается в общем случае комплексной, тогда как в случае с волноводами она всегда вещественная. Помимо этого, связь между частицами не может быть описана вещественной константой [3]. Таким образом, критерий \mathcal{PT} -симметричного режима, основанный на константе связи, оказывается неприменимым для димера.

Для простоты, мы решаем двумерную задачу: в качестве частиц мы исследуем бесконечные цилиндры, свет на которые падает перпендикулярно их оси — таким образом, они ведут себя как резонансные частицы в двумерном пространстве. Мы предложили метод, позволяющий численно определить комплексные диэлектрические проницаемости цилиндров, соответствующие условию, когда исключительная точка попадает на заданную вещественную частоту. Пользуясь этим методом, мы исследуем особенности рассеяния

на таком димере, связанные со взаимодействием собственных мод, которые перестают быть ортогональными вблизи исключительной точки.

Таким образом мы обнаружили, что для димера, собственная частота которого в исключительной точке является вещественной, спектр рассеяния демонстрирует один пик. При этом, малое (менее чем на 1%) изменение диэлектрической проницаемости одного из цилиндров приводит к расщеплению этого пика на два. Данный эффект может быть использован для создания высокочувствительных датчиков [2].

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00427.

Список литературы

1. С. М. Bender, S. Boettcher, Phys. Rev. Lett., 80, 5243-5246 (1998)
2. S. K. Ozdemir, S. Rotter, F. Nori, L. Yang, Nat. Mat., 18, 783-798 (2019)
3. A. A. Dmitriev, M. V. Rybin, Phys. Rev. A, 99, 063837 (2019)

Номер проекта РФФИ: 18-02-00427

Исследование устойчивости пространственных мод в четверть-дисковых резонаторах

Дунаевский М. С.¹, Алексеев П.А.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Mike.Dunaeffsky@mail.ioffe.ru

Исследование асимметричных оптических резонаторов и поиск оптимальной геометрии резонатора, позволяющей сочетать высокую добротность и направленный вывод излучения является на сегодняшний день актуальной задачей. Одной из достаточно простых геометрий, позволяющей получать направленный вывод излучения является сегментный [1] либо секториальный (четверть-дисковый) резонатор. Стоит отметить, что зачастую такие резонаторы получаются путем скалывания целых дисковых резонаторов. В данной работе будут рассмотрены секториальные четверть-дисковые резонаторы чуть меньшие чем четвертинка круга. Эти резонаторы являются частично хаотическими резонаторами, то есть могут содержать как устойчивые моды, так и хаотические моды. Детальное изучение таких резонаторов до сих пор не было выполнено другими авторами, то есть выполняемое в данной работе исследование содержит некоторый элемент новизны. Исследование возможных устойчивых и неустойчивых мод в сегментных и секториальных резонаторах будет выполнено с использованием методов геометрической оптики. С помощью геометрической оптики будет определена форма пучков лучей, образующих устойчивые моды, а также будут определены предельные углы расходимости для устойчивых мод.

Расчеты в рамках геометрической оптики проводились с применением метода диаграмм Пуанкаре (PSOS-Poincare section of surface). Метод диаграмм Пуанкаре позволяет исследовать устойчивость мод в 2D-резонаторах. Диаграмма Пуанкаре строится следующим образом: 1) Луч запускается в резонатор, 2) определяется положение на границе резонатора S , в котором луч испытывает отражение, а также угол отражения от границы резонатора Θ , 3) затем траектория луча при отражениях от границ резонатора представляется набором точек в фазовом пространстве (S, Θ) [2].

С помощью метода диаграмм Пуанкаре выполнено исследование устойчивости мод в четверть-дисковых резонаторах в зависимости от параметра отклонения δ от формы идеального четверть-диска. В получаемых диаграммах Пуанкаре можно наблюдать области двух типов: 1) россыпь случайных точек, соответствующая хаотическому движению луча в резонаторе (хаотическое море), 2) островки содержащие замкнутые фигуры, что соответствует устойчивому периодическому движению луча в резонаторе (устойчивые моды). Стоит отметить, что устойчивые пространственные моды формируют в реальном пространстве фигуры похожие на сложенные вчетверо m -угольники (в случае рационального m получаются сложенные вчетверо фигуры типа «звезда»). Устойчивые моды в рамках геометрической оптики могут быть охарактеризованы двумя параметрами: 1) числом m (связанным с формой моды в реальном пространстве) и 2) углом расходимости θ . Стоит отметить, что для каждой устойчивой группы мод порядка m существует предельный угол расходимости θ_{\max} .

Выполненные расчеты диаграмм Пуанкаре указывают на то, что в малых четверть-дисковых резонаторах с увеличением δ происходит быстрое уменьшение числа устойчивых мод. Можно сказать, что с увеличением δ происходит постепенное поглощение хаотическим морем мод с высоким m . Отметим, что поглощаемые хаотическим морем моды с высоким m – это m -угольники, прижатые к периферии четверть-диска и традиционно воспринимаемые как моды шепчущей галереи. То есть, по мере увеличения δ происходит хаотизация мод шепчущей галереи и выживают лишь моды достаточно низкого порядка. Эти моды низкого порядка m отодвинуты от скруглённого края резонатора, что согласуется с наблюдаемыми экспериментально результатами [3].

Список литературы

1. P.A. Alekseev, M.S. Dunaevskiy, A.M. Monakhov, V.V. Dudelev, G.S. Sokolovskii, R. Arinero, R. Teissier, A.N. Baranov // *Optics Express*, 26, 14433, (2018)
2. J.U. Nöckel, A.D. Stone // *Nature*, 385, 45 (1997)
3. M.S. Dunaevskiy, P.A. Alekseev, A.N. Baranov, A.M. Monakhov, R. Teissier, R. Arinero, P. Girard, A.N. Titkov // *Applied Physics Letters*, 103, 053120 (2013)

Polarized spectroscopy of Europium (III) ions in C_2 sites: A case study of monoclinic $KY(WO_4)_2$

Volokitina A. A.¹, Loiko P.², Dunina E.³, Kornienko A.³, Serres J. M.⁴, Aguiló M.⁴, Díaz F.⁴, Pavlyuk A.⁵, and Mateos X.⁴

¹ITMO University, Russia

²Université de Caen Normandie, France

³Vitebsk State Technological University, Belarus

⁴Universitat Rovira i Virgili (URV), Spain

⁵A.V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of RAS, Russia

e-mail: anna.itmo@gmail.com

Trivalent europium ions (Eu^{3+}) are known for their visible (red) emission at ~ 610 nm due to the ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ electronic transition. Eu^{3+} -doped materials exhibit high color purity of luminescence under excitation in the blue and high luminescence quantum yields due to the high energy gap between the 5D_0 metastable state and the next lower-lying multiplet making them suitable

for red phosphor applications [1, 2]. Europium-doped crystals are promising for red lasers [3]. It is known that the ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ Eu^{3+} transition is of purely electric dipole (ED) nature. The ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ one, in contrast, is purely magnetic dipole (MD). The ratio of the corresponding emission intensities (the asymmetry parameter R) is a merit of the local site symmetry, so that Eu^{3+} is used as a structural probe [4].

Among the laser host crystals, monoclinic (sp. gr. $C2/c$) double tungstates (MDTs) with a general chemical formula $\text{KLn}(\text{WO}_4)_2$ ($\text{Ln} = \text{Y}, \text{Gd}$ or Lu), are attractive for doping with rare-earth ions, because of high available doping concentrations, high luminescence quantum yields, relatively weak concentration quenching and strong polarization-anisotropy of spectroscopic properties [5]. So far, Eu^{3+} -doped MDTs have been used both as red phosphors and gain media of red lasers. In the $\text{KLn}(\text{WO}_4)_2$ structure, Eu^{3+} ions replace the host-forming Ln^{3+} cations in a single type of sites (symmetry: C_2) [6].

In the present work, we analyze polarized emission properties of Eu^{3+} ions in the monoclinic $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystal by considering all ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_J$ transitions. We also discuss the peculiarities of the MD transitions in C_2 sites. The analysis is supported by the crystal-field calculations for Eu^{3+} ions revealing the Stark splitting.

A single-crystal of $\text{Eu:KY}(\text{WO}_4)_2$ was grown using the Top-Seeded Solution Growth (TSSG) Slow-Cooling method using $\text{K}_2\text{W}_2\text{O}_7$ as a solvent and a $[010]$ -oriented undoped seed. The crystal is monoclinic and thus optically biaxial. It was oriented in the frame of the optical indicatrix axes (N_p, N_m, N_g). The crystal had a weak rose coloration.

The RT luminescence spectra of $\text{Eu:KY}(\text{WO}_4)_2$ were measured with polarized light for the principal light polarizations $\mathbf{E} \parallel N_p, N_m, N_g$. No signs of Eu^{2+} ions were found. All possible electronic transition from the metastable excited state to the lower-lying states, ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 0 - 6$), were observed in the spectra at the wavelengths of 580, 593, 615, 655, 703, 752 and 811 nm, respectively. A strong anisotropy of emission properties was observed and interpreted using the polarization selective rules for the C_2 sites. The asymmetry parameter and the CIE color coordinates of emission were determined. The stimulated-emission cross-sections were calculated.

The forbidden transition ($J = 0, J' = 0$) ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_0$ was observed at 17212 cm^{-1} for only one polarization ($\mathbf{E} \parallel N_p$, where the N_p axis is parallel to the C_2 symmetry axis of the crystal). Its nature is discussed.

For the purely MD transition ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, the number and relative intensity of the emission peaks was found to depend not only on the light polarization \mathbf{E} , but also on its propagation direction \mathbf{k} . The MD transition is caused by interaction of the active ion with the magnetic field component of the light through a magnetic dipole \mathbf{M} . Thus, the orientation of the magnetic field vector \mathbf{H} with respect to \mathbf{M} is now relevant [7]. Polarization selection rules for the ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ transition of Eu^{3+} ions in C_2 sites are presented explaining well the observed emission behavior.

The experimental Stark splitting for Eu^{3+} ions was determined using the low-temperature (6 K) polarized absorption spectroscopy. For the C_2 site symmetry and integer J , there are a total of $2J + 1$ Stark sub-levels for each ${}^{2S+1}L_J$ multiplet. The crystal field analysis of Eu^{3+} ions in $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ was performed. The set of parameters of the crystal-field Hamiltonian was obtained within the approximations of weak configuration interaction (WCI) and anomalously strong configuration interaction (ASCI).

Список литературы

1. Neeraj S., Kijima N., Cheetham A. K., Novel red phosphors for solid-state lighting: the system $\text{NaM}(\text{WO}_4)_{2-x}(\text{MoO}_4)_x:\text{Eu}^{3+}$ ($\text{M} = \text{Gd}, \text{Y}, \text{Bi}$), Chemical Physics Letters, Vol. 387(1-3), pp. 2-6, 2004.

2. Wen D., Feng J., Li J., Shi J., Wu M., and Su, Q., $K_2Ln(PO_4)(WO_4):Tb^{3+},Eu^{3+}$ (Ln = Y, Gd and Lu) phosphors: highly efficient pure red and tuneable emission for white light-emitting diodes, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol 3(9), pp. 2107-2114, 2015.
3. Loiko P. A., Dashkevich V. I., Bagaev S. N., Orlovich V. A., Yasukevich A. S., Yumashev K. V., Kuleshov N. V., Dunina E. B., Kornienko A.A., Vatik S.M., and Pavlyuk A. A., Spectroscopic characterization and pulsed laser operation of $Eu^{3+}:KGd(WO_4)_2$ crystal, *Laser Physics*, Vol 23(10), pp. 105811, 2013.
4. Binnemans K., and Görller-Walrand C., Application of the Eu^{3+} ion site symmetry determination, *J Rare Earths*, Vol. 14, pp. 173, 1996
5. Petrov V., Mateos X., Rivier S., Silvestre O., Aguilò M., Sole R., Pujol M. C., Liu J., Griebner U., Diaz F., Growth and properties of $KLu(WO_4)_2$, and novel ytterbium and thulium lasers based on this monoclinic crystalline host, *Laser & Photonics Reviews*, Vol 1(2), pp. 179–212, 2007.
6. Loiko P. A., Dashkevich V. I., Bagaev S. N., Orlovich V. A., Yasukevich A. S., Yumashev K. V., Kuleshov N. V., Dunina E. B., Kornienko A.A., Vatik S.M., and Pavlyuk, A. A., Spectroscopic and photoluminescence characterization of Eu^{3+} -doped monoclinic $KY(WO_4)_2$ crystal, *Journal of luminescence*, Vol. 153, pp. 221–226, 2014.
7. Volokitina A., Loiko P., Vilejshikova E., Mateos X., Dunina E., Kornienko A., Kuleshov N., and Pavlyuk A., $Eu^{3+}:KY(MoO_4)_2$: A novel anisotropic red-emitting material with a layered structure, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 762, pp. 786–796, 2018.

Номер проекта РФФИ: 19-32-90199

Униполярные электромагнитные импульсы: существование, способы получения и особенности взаимодействия с веществом

Архипов Р. М.^{1,2}, Архипов М.В.¹, Розанов Н.Н.²

¹СПбГУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: arkipovrostislav@gmail.com

Хотя существование “униполярного” света иногда ставится под сомнение в научном сообществе в литературе обсуждается вопрос получения коротких униполярных световых импульсов, т.е. импульсов с отличной от нуля электрической площадью (интеграл от напряженности электрического поля по времени) и обладающих ненулевой постоянной составляющей электрического поля [1-3].

В докладе проводится обзор недавних работ, в которых обсуждается возможность наблюдения униполярных импульсов электромагнитного излучения [4-6]. Показано, что существование униполярных импульсов вовсе не противоречит уравнениям Максвелла, и такие импульсы могут распространяться в волноводах с неодносвязным поперечным сечением [7]. В виду наличия постоянной составляющей униполярные импульсы способны оказывать однонаправленное воздействие на заряженные частицы, что указывает на перспективность разработки методов их получения, использования для контроля динамики волновых пакетов в веществе и ускорения заряженных частиц [4, 6, 8]. Подчеркивается роль электрической площади коротких импульсов в их взаимодействии с квантовыми

объектами и в частности правило сохранения площади в электродинамике сплошных сред [9]. Обсуждаются способы получения униполярных и квазиуниполярных импульсов управляемой формы в ТГц диапазоне частот в тонких пленках нелинейных сред, освещаемых фемтосекундными импульсами лазерного излучения [10-11].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 20-32-70049 (получение униполярных импульсов) и 19-02-00312 (выявление роли площади импульсов при взаимодействии с микрообъектами).

Список литературы

1. Bessonov E. G., On a class of electromagnetic waves, Sov. Phys. JETP, V. 53(3), 433, 1981.
2. Бессонов Е. Г., Условно-странные электромагнитные волны, Квантовая электроника, том 19(1), 27-31, 1992.
3. Kozlov V. V., Rosanov N. N., Angelis C. De, Wabnitz S. , Generation of unipolar pulses from nonunipolar optical pulses in a nonlinear medium, Physical Review A, V. 84(2), 023818, 2011.
4. Архипов Р.М., Пахомов А.В., Архипов М.В., Бабушкин И., Толмачев Ю.А., Розанов Н.Н., Генерация униполярных импульсов в нелинейных средах, Письма в ЖЭТФ, том 105(6), 388, 2017.
5. Naumenko G. , Shevelev M., First indication of the coherent unipolar diffraction radiation generated by relativistic electrons, Journal of Instrumentation, V.13 (05), C05001, 2018.
6. Архипов Р.М., Архипов М.В., Шимко А.А., Пахомов А.В., Розанов Н.Н., Письма в ЖЭТФ, Предельно короткие оптические импульсы и их генерация в резонансных средах (Миниобзор), том 110(1), 9, 2019.
7. Розанов Н.Н., “Транспортировка предельно коротких импульсов излучения в волноводах с неодносвязным поперечным сечением”, Оптика и спектроскопия, том 127(6), 960-962, 2019.
8. Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Arkhipov M.V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N.N., “Unipolar subcycle pulse-driven nonresonant excitation of quantum systems”, Optics letters, V. 44 (5), 1202-1205, 2019.
9. Розанов Н.Н., Архипов Р.М., Архипов М.В., “О законах сохранения в электродинамике сплошных сред (к 100-летию Государственного оптического института им. С.И. Вавилова)”, УФН, том 188(12), 1347-1353, 2018.
10. Pakhomov A.V., Arkhipov R.M., Babushkin I.V., Arkhipov M.V., Tolmachev Y.A., Rosanov N.N., “All-optical control of unipolar pulse generation in a resonant medium with nonlinear field coupling”, Physical Review A, V. 95 (1), 013804, 2017.
11. Pakhomov A.V., Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Demircan A., Morgner U., Babushkin I., Unusual terahertz waveforms from a resonant medium controlled by diffractive optical elements, Scientific reports, V. 9 (1), 1-12 (2019).

Анизотропные центры окраски в гексагональном нитриде бора

Алтынбаев Л. А.¹, Л.В. Котова¹, И.А. Елисеев¹, В.Ю. Давыдов¹, М.О. Жукова², В.Т. Hogan³, А. Baldycheva³, В.П. Кочерешко¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

²Университет Университет ИТМО

³University of Exeter, UK

e-mail: altynbayev.linar@yandex.ru

Исследовались спектры отражения, пропускания, фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света в линейной и круговой поляризациях в тонких пленках нитрида бора. Образцы гексагонального нитрида бора (hBN) представляли собой тонкие пленки толщиной в несколько монослоев. Образцы готовились на подложках из полиэтилентерефталата способом, подробно описанным в статьях [1, 2]. Пленки, изготовленные по той же технологии на основе оксида графена и дисульфида молибдена, широко исследовались ранее, и было показано, что они имеют очень высокое качество [3–5].

При измерении спектров пропускания было обнаружено, что в данных образцах край поглощения находится на энергии 3.75 эВ. Ниже по энергии образцы были прозрачными. При этом ширина запрещенной зоны hBN составляет более 5 эВ. В спектрах комбинационного рассеяния света наблюдались ярко выраженная линия $E_{2g}(hBN)$. Рамановский сдвиг линии составлял 1366 см^{-1} , что типично для оптических фононов в hBN. Однако положение линии менялось от точки к точке на $\sim 2 \text{ см}^{-1}$. Интенсивность и ширина Рамановской линии менялась в несколько раз по площади образца. Это указывает на наличие дефектов в данной структуре.

В спектре фотолюминесценции (ФЛ) при возбуждении с длиной волны 535 нм наблюдались широкие полосы ФЛ с отдельными максимумами на энергиях $\sim 700 \text{ нм}$ и $\sim 880 \text{ нм}$. Положение этих пиков коррелирует с положением полос поглощения вакансий азота в hBN [6].

Спектры пропускания были измерены в линейной и круговой поляризациях. Было обнаружено, что в области длин волн больших 550 нм имеет место преобразование линейной поляризации проходящего света в эллиптическую поляризацию. Анализ параметров Стокса прошедшего через образец света показал, что в данном образце имеет место эффект двулучепреломления. Обнаружено, что величина двулучепреломления достигает максимума на длинах волн 650 нм, а на длине волны 850 нм имеется изотропная точка. Очевидно, что это двулучепреломление связано с вакансиями азота в hBN. Спектральная зависимость параметров Стокса в спектрах пропускания указывает на анизотропию оптических переходов в этих центрах.

Список литературы

1. D.-W. Shin, M.D. Barnes, K. Walsh, D. Dimov, P. Tian, A.I.S. Neves, C.D. Wright, S.M. Yu, J.-B. Yoo, S. Russo and M.F. Craciun, *Adv. Mater.*, 2018, 30, 1802953.
2. M.O. Zhukova, V.T. Hogan, E.N. Oparin, P.S. Shaban, Y.V. Grachev, E. Kovalska, K.K. Walsh, M.F. Craciun, A. Baldycheva and A.N. Tsytkin, *Nanoscale Res. Lett.*, 2019, 14, 225.
3. V.T. Hogan, E. Kovalska, M.O. Zhukova, M. Yildirim, A. Baranov, M.F. Craciun and A. Baldycheva, *Nanoscale*, 2019, 11, 16886–16895.
4. K. Fu, Y. Wang, C. Yan, Y. Yao, Y. Chen, J. Dai, S. Lacey, Y. Wang, J. Wan, T. Li, Z. Wang, Y. Xu and L. Hu, *Adv. Mater.*, 2016, 28, 2587–2594.

5. R. Jalili, S. Aminorroaya-Yamini, T.M. Benedetti, S.H. Aboutalebi, Y. Chao, G.G. Wallace and D.L. Officer, *Nanoscale*, 2016, 8, 16862–16867.
6. С.В. Гринев, Ф.В. Конусов, В.В. Лопатин, Л.В. Шиян, ФТТ, 2004, 46, №3, 424-429.

Исследование тантало-ниобата гадолиния ($Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4$) методом локальной катодолюминесценции

Гусев Г. А.¹, Маслобоева С.М.², Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИХТРЭМС КНЦ РАН

e-mail: ggusev@mail.ioffe.ru

Поиск новых сцинтилляторов – материалов, способных эффективно преобразовывать высокоэнергетическое возбуждение электронами, ионами, рентгеновским или гамма-излучением в видимый свет, имеет широкое практическое значение. Такие материалы применяются в медицине, геологии и дозиметрии в качестве датчиков ионизирующего излучения [1-2].

Исследование сцинтилляторов на основе оксидов тяжелых металлов, имеющих высокую плотность, является актуальной задачей. Одни из таких перспективных материалов – это тантало-ниобаты редкоземельных элементов, характеризующиеся интенсивной собственной люминесценцией.

Используемые в настоящее время методы синтеза тантало-ниобатов требуют достаточно высоких температур (от 1500 °С). В данной работе исследуются образцы порошков и керамики $Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4$, выращенные жидкофазным методом ($x = 0.3 \div 0.9$). Такой метод имеет максимальную рабочую температуру 1400 °С и позволяет более точно следовать заданному соотношению компонентов за счет гомогенизации смеси на молекулярном уровне. По сравнению с предыдущей работой [3] метод синтеза был оптимизирован. Цель работы – определить оптимальное соотношение ниобий-тантал в твердом растворе тантало-ниобата гадолиния для максимизации интенсивности люминесценции.

Исследования проводились такими методами, как рентгенодифракционный анализ (РДФА), рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) и локальная катодолюминесценция (КЛ).

В результате работы определен фазовый и элементный состав порошкообразных и керамических образцов (методами РДФА и РСМА). Получены спектры катодолюминесценции для различных составов тантало-ниобата гадолиния. На основе КЛ измерений определено оптимальное соотношение ниобий-тантал. Образцы с таким соотношением имеют максимальную интенсивность люминесценции.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-33-50149 мол_нр. Структурные исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (ФТИ им. А.Ф. Иоффе).

Список литературы

1. Nikl M., *Scintillation detectors for x-rays*, Meas. Sci. Technol., 17, R37, 2006.

2. Yanagida T., Inorganic scintillating materials and scintillation detectors, Proc. Jpn. Acad. B, 94, 75-97, 2018.
3. Ivanova E.V., Masloboeva S.M., Kravets V.A., Orekhova K.N., Gusev G.A., Trofimov A.N., Shcherbina O.B., Yagovkina M.A., Averin A.A., Zamoryanskaya M.V., Synthesis and Luminescent Properties of Gadolinium Tantalum Niobates $Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4$, Opt. Spectrosc., 127, 1011-1017 2019.

Номер проекта РФФИ: 19-33-50149 мол_нр

Нестационарные оптические спектры пропускания неоднородной плазмы наносекундного электрического разряда с щелевым катодом в неоне вблизи узких резонансов поглощения

Ашурбеков Н.А.¹, Иминов К.О.¹, Шахсинов Г.Ш.¹, Курбангаджиева М.Б.^{1,2}, Закарьяева М.З.^{1,2}

¹Дагестанский государственный университет

²Институт физики ДФИЦ РАН

e-mail: iko6161@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию особенностей резонансного взаимодействия коротких импульсов полихроматического лазерного излучения с неоднородной плазмой наносекундного разряда с щелевым катодом в неоне при давлениях газа в диапазоне 5-40 Тор.

Электрический разряд происходил в кварцевой трубке между электродами из алюминия, расположенными параллельно на расстоянии 0.6 см друг от друга. Анод представлял собой плоскую пластину длиной 5 см, шириной 2 см и толщиной 0.5 см. Катод имел форму цилиндрического стержня длиной 5 см и диаметром 1.2 см, вдоль которого прорезана полость в виде прямоугольной щели шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см [1]. Сложный профиль поверхности катода и нелинейное взаимодействие электронных потоков с сильными электрическими полями приводит к формированию в таких разрядах одиночных или регулярных плазменных структур в процессе электрического пробоя газа. В данной работе экспериментально исследованы закономерности формирования профиля оптического спектра пропускания такой плазмы вблизи спектральных линий поглощения неона при зондировании неоднородного плазменного столба короткими импульсами полихроматического лазерного излучения. В качестве источника зондирующего лазерного излучения использовался лазер на красителе с накачкой от импульсного эксимерного лазера на смеси ксенон-хлор с длиной волны генерации 308 нм. Излучение лазера на красителе имело ширину спектра генерации около 10 нм, длительность импульса генерации по полувысоте – около 5 нс.

В работе экспериментально показано, что в процессе электрического пробоя газа внутри полости катода формируется регулярная плазменная структура в виде двух плазменных слоев, прижатых к боковым поверхностям внутренней полости катода. Установлено, что при распространении коротких лазерных импульсов полихроматического лазерного излучения под углом к регулярной плазменной структуре вблизи спектральной

линии поглощения неона с длиной волны 650.6 нм формируется спектр пропускания с несимметричным контуром [2].

Для анализа пространственного профиля показателя преломления плазмы выполнено численное моделирование ионизационных процессов внутри полости катода в программной среде Comsol Multiphysics с использованием специального модуля Plasma. Обсуждаются механизмы влияния неоднородностей показателя преломления плазмы и квантово-оптических эффектов [2] на профиль оптических спектров пропускания вблизи узких резонансов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-90179.

Список литературы

1. Ashurbekov N A and Iminov K O 2016 Generation of high-energy electrons in the nanosecond gas discharges with a hollow cathode Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases vol 1, ed V F Tarasenko (New York: Nova Publishers) p 421
2. N. A. Ashurbekov, K.O. Iminov, M.B. Kurbangadzhieva and G. Sh. Shakhshinov // Proceedings Volume 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications; 113220H (2019)

Номер проекта РФФИ: 19-32-90179

О возможности управления скоростью релаксации центров окраски в оптических волокнах

Дмитриева Д. С.¹, Пилипова В.М.¹, Давыдов В.В.², Рудь В.Ю.³

¹СПбГУТ

²СПбПУ

³ВНИИФ

e-mail: Emilylylitov@gmail.com

Темпы развития современного мира требуют передачи больших объемов информации. Переход к использованию оптического волокна в линиях открыл возможность для высокоскоростного обмена большими объемами данных. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) постоянно подвергаются негативным внешним воздействиям. Увеличение в различных областях деятельности человека использования радиоактивных элементов добавило к этим воздействиям еще одно – γ -излучение. Кратковременное воздействие радиации на ВОЛС приводит к изменению их свойств, что напрямую влияет на увеличение потерь при передаче оптического сигнала [1, 2]. Релаксационные процессы даже при невысоких дозах облучения занимают большое количество времени [2]. При долговременном влиянии γ -излучения или высоких экспозиционных дозах облучения, например, 1 кГр/с оптическое волокно может подвергнуться необратимым изменениям. Передача информации по ВОЛС будет невозможна. Кроме того, большинство используемых для анализа и поиска дефектов в ВОЛС приборов не могут установить воздействие радиации на тестируемую оптическую линию. Это создает большие проблемы. Поэтому задача диагностики воздействия γ -излучения на оптическое волокно и компенсация возникающих негативных явлений в волокне является одной из приоритетных задач в сфере

телекоммуникаций, на решение которой направлены исследования в области фундаментальной и прикладной физики.

Один из возможных вариантов её решения предложен в нашей работе на основе управления скоростью релаксации центров окраски в оптических волокнах. Радиационные центры окраски – микродефекты, возникающие в оптическом волокне при его облучении. Скорость их релаксации уменьшается с увеличением дозы воздействия, например, γ -излучение на ВОЛС. Центры окраски появляются в результате изменения структуры и устойчивости кристаллической решетки. Данные дефекты вызваны образованием эффекта смещения [2]. Сдвиг атомов под воздействием γ -излучения может приводит к разрушению кристаллической решетки оптического волокна. Эффект смещения может оказаться необратимым на небольшом участке используемой ВОЛС. Количество центров окраски возрастает с увеличением времени воздействия радиации или увеличением её экспозиционной дозы. Если скорость образования новых центров окраски оказывается значительно выше, чем скорость процессов их релаксации, то это приводит к затуханию по мощности оптического сигнала или к разрушению оптического волокна в зоне воздействия на него радиации.

На основе ранее проведенных нами исследований ВОЛС было установлено, что скорость релаксации центров окраски увеличивается при увеличении температуры ВОЛС или мощности лазерного излучения, передаваемого по ней. Поэтому нами были проведены экспериментальные исследования влияния дополнительного лазерного излучения на изменения скорости релаксации центров окраски в поврежденной γ -излучению ВОЛС. Оптическое одномодовое волокно с сердцевинной $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$ (легирование 1.5 %) предварительно облучили дозой 100 Гр. Рабочая длина волны $\lambda = 1550$ нм. Дополнительное лазерное излучения – $\lambda = 1310$ нм. Исследовалось изменение скорости радиационно-наведенных потерь в течении 10^6 с по мощности регистрируемого лазерного излучения, который используется для передачи информации. Было установлено, что использование дополнительного лазерного излучения мощностью 20 и 40 мВт уменьшает время релаксации центров окраски (изначальные свойства волокна были практически восстановлены к 100 и 10 с соответственно).

Анализ полученных данных подтвердил возможность управления скоростью релаксации центров окраски, разработанным нами методом. Исследования также выявили недостатки метода. Его использование эффективно в случае кратковременного воздействия γ -излучению или при длительном воздействии небольших доз радиации, нами было установлено, что можно получить равновесие между числом новых образовавшихся центров окраски и числом центров, которые распались под действием релаксационных процессов.

Список литературы

1. Бондаренко, А. В. Исследование радиационной стойкости оптических волокон из кварцевого стекла в условиях реакторного облучения / А. В. Бондаренко, А. П. Дядькин, Ю. А. Кашук и др. // Спецвыпуск «Фотон-экспресс». – 2005 – № 6 – С.11-15.
2. Kashaykin, P.F. Influence of drawing conditions on radiation-induced attenuation of pure-silica-core fibers in the near-IR range / P. F. Kashaykin, A. L. Tomashuk, M. Y. Salgansky, A. N. Guryanov, E. M. Dianov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2018. – Vol. 10681. – P. 1068110.

Моделирование формирования массива фотонных наноструй диэлектрическими микроступеньками

Зайцев В. Д.¹, Стафеев С.С.

¹Самарский университет

e-mail: zaicev-vlad@yandex.ru

Большое количество работ в современной оптике и нанофотонике посвящены фокусировке лазерного излучения в субволновую область. Решением такой задачи, в частности, является фокусировка света с использованием различных оптических элементов, например, микроцилиндра [1] или диэлектрической микросферы. Одной из первых экспериментальных работ по субволновой фокусировке света микросферами является работа [2]. В [3] был предложен похожий механизм получения микрорельефа: микросфера диаметром 1 мкм захватывалась в оптическую ловушку пучком Бесселя с длиной волны 532 нм, перемещалась в заданную точку, а после в подложке прожигалось углубление при помощи импульсного лазерного излучения с длиной волны 355 нм, затем микросфера перемещалась в следующую точку. В [4] была теоретически исследована фокусировка света микрошарами – было показано, что микросфера с диаметром 1 мкм ($n = 1,59$), создает фокусное пятно с диаметром в плоскости, перпендикулярной направлению поляризации, равным $\text{FWHM} = 0,325\lambda$. Экспериментальное наблюдение фотонной наноструи было осуществлено в работе [5], где латексные микросферы диаметром 1 мкм, 3 мкм и 5 мкм, освещённые плоской волной с длиной 520 нм, создавали фокусы с диаметрами 0,62 λ ; 0,52 λ и 0,58 λ . В [6] численно показано, что при использовании градиентной микросферы, в которой показатель преломления меняется линейно от 1,43 до 1,59, можно увеличить длину фотонной наноструи, при этом глубина фокусировки DOF равна 11,8 λ . В [7] задача была обратной – уменьшение длины фотонной наноструи. Для этого микросфера радиусом 2,5 λ освещалась гауссовым пучком, сфокусированным широкоапертурной линзой с числовой апертурой $\text{NA} \approx 1$. Длина образованной фотонной наноструи составила в этом случае $\text{DOF} = 0,88\lambda$. Заметим, что, помимо микросфер, известны работы по формированию фотонных наноструй другими диэлектрическими микрообъектами, например, микроцилиндрами [8], дисками [9], кубиками [10], коническими микроаксиконами [11].

В данной работе рассмотрена фокусировка гауссова пучка с шириной $\omega = 5,4$ мкм и длиной волны $\lambda = 633$ нм бинарной дифракционной решеткой из кварцевого стекла ($n = 1,46$) с периодом 600 нм и высотой рельефа 500 нм. Было продемонстрировано, что отдельные ступеньки рельефа вблизи своей выходной поверхности формируют фотонные наноструи. При этом такие фотонные наноструи искривляются при наклоне волнового фронта, освещающего их пучка.

В первой части работы проводилось моделирование фокусировки света одиночной ступенькой с помощью метода FDTD, реализованного в программе FullWAVE. Размер сетки по пространству составлял 12 нм. Моделирование проводилось для ступеньки из кварцевого стекла с шириной 600 нм и высотой 500 нм. Эта ступенька освещалась гауссовым пучком с шириной $\omega = 2$ мкм и длиной волны 633 нм. Показано, что непосредственно за ступенькой формируется область повышенной интенсивности – фотонная наноструя. Ширина полученной фотонной струи была равна 0,23 мкм, а интенсивность излучения, после прохождения через кварцевую ступеньку ($n = 1,46$), возросла в 8,6 раз.

Во второй части работы проводилось моделирование прохождения света через дифракционную решетку так же с помощью метода FDTD, реализованного в программе FullWAVE. Размер сетки по пространству составлял 31 нм. Моделирование проводилось

для бинарной дифракционной решетки из кварцевого стекла ($n = 1,46$) с периодом 600 нм и высотой рельефа 500 нм. Бинарная решетка освещалась гауссовым пучком шириной $\omega = 5,4$ мкм и с длиной волны 633 нм. Высота рельефа была одинакова и равна 500 нм. Решетка находилась на расстоянии 5 мкм от плоскости перетяжки гауссова пучка, чтобы волновой фронт пучка успел приобрести кривизну вследствие распространения. Показано, что интенсивность излучения центрального фокуса после прохождения решетки возрастает в 9,3 раза по сравнению с входящим излучением, также замечено, что боковые фотонные наноструи отклоняются в сторону от центра.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01122).

Список литературы

1. Kozlova E.S., Simulation of light focusing by two-layer microcylinder, *Journal of Physics*, V. 1038, P. 012078, 2018.
2. Lu, Y.F., Laser Writing of a Subwavelength Structure on Silicon (100) Surfaces with Particle-Enhanced Optical Irradiation, *JETP Letters*, V. 72(9), P. 457-459, 2000.
3. McLeod, E. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres, *Nature Nano*, V. 3, P. 413-417, 2008.
4. Li, X. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets, *Optics Express*, V. 13(2), P. 526-533, 2005.
5. Ferrand, P. Direct imaging of photonic nanojets, *Optics Express*, V. 16(10), P. 6930-6940, 2008.
6. Kong, S.-C. Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere, *Optics Express*, V. 17(5), P. 3722-3731, 2009.
7. Devilez, A. Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres, *Optics Express*, V. 17(4), P. 2089-2094, 2009.
8. Chen, Z. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique, *Optics Express*, V. 12(7), P. 1214-1220, 2009.
9. McCloskey, D. Low divergence photonic nanojets from Si₃N₄ microdisks, *Optics Express*, V. 20(1), P. 128-140, 2012.
10. Kotlyar, V.V. Photonic nanojets generated using square-profile microsteps, *Appl. Opt.*, V. 53, P. 5322-5329, 2014.
11. Zaitsev, V.D. Photonic jets for mid-IR focal plane arrays produced by the triangular dielectric prism, *Proc. SPIE*, V. 11032, P. 1103212, 2019.

Исследование взаимодействия пары оптических светлых пространственных пироэлектрических солитонов при их синфазном распространении в нелегированном кристалле ниобата лития на длине волны света 532 нм

Перин А.С., Гаппарова М.Н., Романенко Д.К., Сокольников А.В., Окунев Д.В.

ТУСУР

e-mail: perinas@bk.ru

Оптические пространственные солитоны, в частности пироэлектрические солитоны, широко исследовались в последние несколько лет [1-8]. Такого вида солитонные пучки формируются при компенсации дифракционной расходимости лазерного излучения за счет вклада пироэлектрического эффекта [1]. Известно, что взаимодействие распространяющихся в нелинейной среде оптических пространственных солитонов приводит к изменению расстояния между центрами таких пучков [9]. В работе [5] показано, что в случае распространения пироэлектрических солитонов, возбужденных световыми пучками, сдвинутыми по фазе на $\pi/2$, наблюдается их отталкивание друг от друга, синфазные же формирующие световые поля возбуждают солитоны, которые при распространении должны притягиваться [9]. Целью данной работы является экспериментальное исследование и компьютерное моделирование взаимодействия пары оптических светлых пространственных пироэлектрических солитонов, возбуждаемых в нелегированном кристалле ниобата лития (LiNbO_3) синфазными световыми пучками.

В экспериментах использовался нелегированный образец LiNbO_3 Z- среза. Световые пучки в образце распространялись в направлении, параллельном оси X. Поляризация формирующего солитон светового поля соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Диаметры световых пучков, формируемых оптической системой экспериментальной установки на входной грани кристалла, составляли 15 мкм, а интенсивность каждого из них 5 мВт/см². Для установления солитонного режима образец нагревался при помощи элемента Пельтье до температуры 55°C.

В результате исследования экспериментально и путем компьютерного моделирования показано, что взаимодействие пары оптических светлых пространственных пироэлектрических солитонов при их распространении в нелегированном кристалле ниобата лития на длине волны света 532 нм приводит к непрямолинейным траекториям распространения световых пучков с увеличением расстояния между их центрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018.

Список литературы

1. Safioui J., Devaux F., Chauvet M. Pyroliton: pyroelectric spatial soliton // Optics express. – 2009. – V. 17, No. 24. – P. 22209-22216.
2. Safioui J., Fazio E., Devaux F., Chauvet M. Surface-wave pyroelectric photorefractive solitons // Optics letters. – 2010. – V. 35, No. 8. – P. 1254-1256.
3. Su Y., Jiang Q., Ji X. Photorefractive spatial solitons supported by pyroelectric effects in strontium barium niobate crystals // Optik. – 2015. – V. 126, No. 18. – P. 1621-1624.
4. Chauvet M. et al. Fast-beam self-trapping in LiNbO_3 films by pyroelectric effect // Optics letters. – 2015. – V. 40, No. 7. – P. 1258-1261.

5. Perin A. S., Shandarov V. M., Ryabchenok V. Y. Photonic waveguide structures in photo-refractive lithium niobate with pyroelectric mechanism of nonlinear response // *Physics of Wave Phenomena*. – 2016. – V. 24, No. 1. – P. 7-10.
6. Katti A., Yadav R. A. Spatial solitons in biased photovoltaic photorefractive materials with the pyroelectric effect // *Physics Letters A*. – 2017. – V. 381, No. 3. – P. 166-170.
7. Katti A., Yadav R. A. Incoherently coupled photorefractive spatial solitons supported by pyroelectric effects // *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*. – 2017. – V. 26, No. 1. – P. 1750002.
8. Katti A. Gaussian soliton pairs in an unbiased photorefractive crystal due to the pyroelectric effect // *The European Physical Journal Plus*. – 2019. – V. 134, No. 12. – P. 621.
9. Stegeman G.I., Segev M. Optical spatial solitons and their interactions: Universality and diversity // *Science*. 1999. – V. 286, No. 5444. – P. 1518-1523.

Номер проекта РФФИ: 18-42-703018

Рассеяние пространственно ограниченных пучков рентгеновских волн в латеральных периодических структурах

Казakov Д. В.¹, Пунегов В.И.

¹Коми НЦ УрО РАН

e-mail: kazakovdimv@mail.ru

Рассмотрена задача рассеяния пространственно ограниченных пучков рентгеновских волн на латеральных периодических структурах в рамках динамической теории дифракции в геометрии Брэгга. В приближении линейной теории упругости выполнен численный расчет полей решеточных смещений в кристаллах ниобат лития LiNbO_3 и кремния. В кристаллах LiNbO_3 периодические упругие деформации вызваны действием поверхностной акустической волны (ПАВ) с периодом модуляции 4 мкм. В кристаллах кремния деформации возникают из-за молекулярного взаимодействия атомов разных по химическому составу сред --- полосы вольфрама шириной 0.5 мкм распределенные периодически на поверхности, расстояние между полосами 1 мкм. Выполнено численное моделирование углового распределения интенсивности рассеяния вблизи узла обратной решетки для кристаллов с разными периодическими деформациями. Для кристаллов, промодулированных ПАВ, дифракционные порядки состоят из вертикальной полосы основного отражения и наклонных полос, вызванных ограниченностью рентгеновских пучков. В случае дифракции на кристаллах кремния с вольфрамовой поверхностной решеткой дополнительно наблюдаются сателлиты вдоль наклонных полос из-за модуляции падающего излучения.

Список литературы

1. Punegov V.I. et al. Coherent and diffuse X-ray scattering in crystals modulated by a surface acoustic wave // *J. Appl. Cryst.* 2010. Vol. 43. P. 520.
2. Punegov V.I. et al. Applications of dynamical theory of X-ray diffraction by perfect crystals to reciprocal space mapping // *J. Appl. Cryst.* 2017. Vol. 50. P. 1256.

Структурные и динамические свойства короткопериодных сверхрешеток GaN/AlN, выращенных методом субмонослойной цифровой эпитаксии

Давыдов В. Ю.¹, Рогинский Е.М.¹, Китаев Ю.Э.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев И.А.¹, Яговкина М.А.¹, Нечаев Д.В.¹, Жмерик В.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vyudavydov@gmail.com

Большой научный интерес к низкоразмерным эпитаксиальным гетероструктурам на основе широкозонных A_3 -нитридных соединений (Al,Ga)N обусловлен уникальной возможностью создания на их основе оптоэлектронных приборов, работающих как в среднем ультрафиолетовом, так и в инфракрасно-терагерцовом диапазонах спектра. Подобные приборы предназначены для развития новых устройств мультидиапазонной спектроскопии, методов фотодиагностики и фототерапии в медицине, систем непрямой оптической связи и др. Одним из важнейших элементов таких приборов являются короткопериодные, с толщинами составляющих слоев от одного до нескольких монослоев (МС), сверхрешетки (СР) $(\text{GaN})_m(\text{AlN})_n$ (где m, n – количество МС). Важнейшими требованиями к таким СР являются наличие атомарно-гладких и однородных поверхностей составляющих слоев и максимально резких интерфейсов. Решение этих задач требует детального изучения фундаментальных физических свойств СР, а также разработки новых методов количественной диагностики их параметров и характеристик с атомарным разрешением.

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследовались как равнотолщинные, так и разнотолщинные короткопериодные СР ($m=2,4,6; n=4,6$), которые были выращены с помощью технологии низкотемпературной плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии при температурах подложки 690–740 °С в металл (Ga)-обогащенных условиях с использованием метода субмонослойной цифровой эпитаксии [1]. Этот метод был модифицирован для получения СР с общей толщиной до ~1 мкм и числом периодов до 600. Структурные свойства СР исследовались с помощью методов рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, малоуглового рентгеновского рассеяния и диффузного малоуглового рассеяния [2–5]. Анализ данных рентгеноструктурного анализа позволил определить период выращенных СР и соотношение между толщинами составляющих их слоев, а также проанализировать степень репликативности интерфейсов. Было установлено, что в выращенных образцах имеется два вида интерфейсов. Один вид связан с границей раздела слоев GaN-AlN в СР, а другой – с периодическими остановками в процессе цифровой эпитаксии для испарения избыточного металла. Экспериментально динамические свойства кристаллической решетки СР исследовались с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Интерпретация спектров КРС выполнялась при помощи *ab initio* расчетов нелинейных оптических свойств в рамках теории функционала плотности, направленного на изучение фоновых состояний СР. Расчеты были выполнены как для равнотолщинных, так и для разнотолщинных СР. Хорошее согласие эксперимента с теорией позволило однозначно установить связь наблюдаемых в спектрах особенностей с формами колебаний оптических фоновых мод. Анализ форм колебаний позволил разделить фононы на два типа. Первый тип – это делокализованные моды, для которых характерно смещение всех атомов элементарной ячейки СР. Второй – локализованные в слоях GaN или AlN моды. В этих модах смещения атомов происходят только в одном типе слоя. Была определена зависимость положения и интенсивности линий в спектрах от периода СР и установлена симметричная связь между колебаниями

объемного GaN (AlN) кристалла и CP в точках симметрии зоны Бриллюэна. Наиболее яркие особенности были обнаружены в высокочастотной области спектра в поляризации (здесь z -направление гексагональной оси), где максимальный отклик был получен от полярных мод. Впервые была обнаружена и объяснена тонкая структура на низкочастотном крыле интенсивной линии $E(\text{TO})^{\text{GaN}}$, и высокочастотном крыле интенсивной линии $E(\text{TO})^{\text{AlN}}$, генетически связанными с модами E_2^{high} объемного кристалла. Также показано, что полярные моды, локализованные в слое AlN, существенно интенсивнее в разнотолщинной CP. Результаты комплексных исследований могут быть успешно использованы при оптимизации технологических параметров с целью формирования структурно совершенных короткопериодных CP GaN/AlN.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (проект №19-72-30040).

Список литературы

1. Jmerik V.N., Nechaev D.V., Ivanov S.V., Kinetics of Metal-Rich PA Molecular Beam Epitaxy of AlGaN Heterostructures for Mid-UV Photonics. In *Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production*, Henini M., Eds.; 2nd Edition; Elsevier Inc., pp 135–179, 2018.
2. Holy V. and T. Baumbach T., Nonspecular x-ray reflection from rough multilayers, *Phys. Rev. B*, vol. 49, 10668, 1994.
3. Stepanov S.A., Method of transfer matrices and dynamical thick-crystal approximation in surface x-ray diffraction by multilayer structures, *Crystallogr. Reports*, vol. 39, 182, 1994.
4. Stepanov S.A., Pietsch U., Baumbach G.T., A matrix approach to grazing-incidence X-ray diffraction in multilayers, *Z. Phys. B*, vol. 96, 341, 1995.
5. Pietsch U., Holy V., Baumbach T., *High-Resolution X-Ray Scattering*, Springer, 2004.

Катодоллюминесцентные исследования синтетических алмазов, синтезированных методом HPHT

Орехова К. Н.¹, Заморянская М.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: orekhova.kseniia@gmail.com

В работе исследуются образцы синтетических алмазов, выращенных при различных условиях по технологии высокотемпературного синтеза при высоком давлении (High Pressure High Temperature synthesis, HPHT) на установке БАРС (Беспредельная Аппаратура высокого давления «Разрезная Сфера»). При такой технологии синтеза используются сверхвысокие температуры (до 2500°C, с нужным градиентом) и экстремальное давление (до 60 тыс. атм.). Использование установки типа БАРС позволяет получать путем синтеза из специальной шихты синтетические монокристаллы алмаза массой более 0,5 карат. В результате синтеза получается алмаз высокого качества, уникальные свойства которого можно использовать в современных устройствах для достижения рекордного уровня параметров приборов твердотельной электроники, а также в качестве элементов теплоотводов, полупроводниковых приборов, детекторов ионизирующих излучений, элементов рентгеновской оптики [1].

Несмотря на высокое качество синтетических алмазов, синтезированных HPHT методом, любой алмаз, включая природный, содержит примеси из атомов, отличных от

углерода. Атомы примесей могут собираться в кластеры, формируя включения. Примесей обычно избегают, но они могут быть введены намеренно для изменения определённых свойств алмаза. Выращивание алмазов в жидкой среде из металла-растворителя приводит к формированию примесей из переходных металлов (никель, железо, кобальт), которые влияют на электронные свойства алмаза [2, 3]. Чистый алмаз является диэлектриком, но небольшая добавка бора делает его полупроводником, и даже, при некоторых условиях, сверхпроводником [4], что позволяет использовать его в электронных приложениях. Включения азота препятствуют движению дислокаций в кристаллической решетке и увеличивает её напряжённость, тем самым повышая твёрдость и вязкость [5].

Для исследования дефектов в синтетических алмазах в работе применялся метод локальной катодоллюминесценции (КЛ). Энергия электронного пучка, которым возбуждается люминесценция, намного больше ширины запрещенной зоны алмаза, и это позволяет возбуждать все энергетические уровни в материале, в том числе высокоэнергетические уровни, связанные с дефектами. Также данный метод позволяет наблюдать изображения КЛ в электронном пучке диаметром до 200 микрон и исследовать однородность распределения примесей и дефектов в материале по их КЛ.

В работе была исследована однородность КЛ образцов синтетических алмазов, синтезированных при разных условиях и имеющих различное поглощение в оптическом диапазоне (различные цвета). Также были получены, исследованы и интерпретированы КЛ спектры образцов. Показано, как добавление различных элементов в шихту и изменение условий синтеза влияет на особенности КЛ, и, соответственно, на наличие и распределение дефектов и примесей в образцах.

Список литературы

1. Пальянов Ю. Н., Малиновский И. Ю., Борздов Ю. М., Хохряков А. Ф., Чепуров А. И., Годовиков А. А., Соболев Н. В. Выращивание крупных кристаллов алмаза на беспресовых аппаратах типа «разрезная сфера» // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. №5. С.1221—1224.
2. Larico, R.; Justo, J. F.; Machado, W. V. M.; Assali, L. V. C. Electronic properties and hyperfine fields of nickel-related complexes in diamond // Physical Review B: journal. — 2009. — Vol. 79, no. 11. — P. 115202.
3. Assali, L. V. C.; Machado, W. V. M.; Justo, J. F. 3d transition metal impurities in diamond: electronic properties and chemical trends // Physical Review B: journal. — 2011. — Vol. 84, no. 15. — P. 155205.
4. Ekimov, E. A.; Sidorov, V. A.; Bauer, E. D.; Melnik, N. N.; Curro, N. J.; Thompson, J. D.; Stishov, S. M. Superconductivity in Diamond // Nature. — 2004. — Vol. 428, no. 6982. — P. 542—545.
5. Catledge, S. A.; Vohra, Yogesh K. Effect of nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of diamond films grown using high-methane concentrations // Journal of Applied Physics: journal. — 1999. — Vol. 86. — P. 698.

Исследование влияния мощного СВЧ-пучка на оптические характеристики кристаллов ZnSe:Fe

Артемьев К. В.¹, А.М. Давыдов¹, С.Ю. Казанцев², С.В. Подлесных¹

¹ИОФ РАН

²МТУСИ

e-mail: artemievkv@mail.ru

Кристаллы ZnSe, легированные ионами Fe²⁺ применяются в качестве активного элемента перспективных лазеров, излучающих в спектральной области $\lambda=4\text{--}5$ мкм [1]. Основные области применения Fe²⁺:ZnSe-лазеров: дистанционный контроль окружающей среды, системы воздушной связи, спектроскопические исследования, медицина, получение мощных фемтосекундных импульсов. При оптической накачке этих кристаллов лазерным излучением твердотельных и газовых лазеров трехмикронного диапазона спектра достигнуты эффективности преобразования $\sim 50\%$, в том числе и при комнатной температуре [2-4]. Однако, эффективность, масштабируемость, масса-габаритные параметры и ряд других характеристик лазеров, которые применялись для оптической накачки Fe²⁺:ZnSe-лазера, вызывают нарекания со стороны конечного пользователя, поэтому продолжается поиск альтернативных источников накачки [1, 5]. В связи с этим, вызывает интерес исследование возможности применения относительно мощного СВЧ излучения для возбуждения генерации Fe²⁺:ZnSe-лазеров. В настоящее время техника создания импульсных источников СВЧ пучков мощностью до 5 кВт достаточно хорошо отработана и широко применяется в различных приложениях [6, 7]. В докладе представлены результаты предварительных исследований изменения оптических характеристик кристалла Fe²⁺:ZnSe при воздействии на него мощным пучком СВЧ-излучения. Исследовались изменения показателя преломления и спектры люминесценции кристалла при воздействии на него СВЧ излучения с импульсной мощностью 600-3000 Вт. Представлены зависимости пропускания и спектры люминесценции кристалла при одновременном воздействии СВЧ излучения и лазерного излучения с $\lambda=405$ нм и 450 нм. Обсуждаются возможные применения СВЧ-облучения при диагностики свойств кристалла Fe²⁺:ZnSe. В настоящем докладе также представлена методика анализа качества кристаллов Fe²⁺:ZnSe с большими поперечными размерами. Методика основана на анализе спектральных данных о пропускании в области среднего ИК и люминесценции кристалла в видимой и ближней ИК области спектра при возбуждении УФ излучением и лазерным излучением с $\lambda=405$ нм и $\lambda=450$ нм. Показано, что на основе данных пропускания и интенсивности люминесценции, полученных в разных точках кристалла, можно достаточно оперативно оценить однородность распределения легирующей примеси по апертуре кристалла, что является наиболее важным параметром при создании широкоапертурных ZnSe:Fe-лазеров.

Список литературы

1. Mirov S.B. et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 24 (5), 1-29, 2018.
2. Dormidonov A. E. et al. // Applied Physics B., Vol. 122, 211, 2016.
3. Великанов С.Д. и др. // Квантовая электроника, том 47(4), 303-307, 2017.
4. Firsov K.N. et al. // Physics of Wave Phenomena. Vol. 27, 211-216, 2019.
5. Гладилин А.А. и др. // Журнал прикладной спектроскопии, том 83, 497-498, 2016.
6. Davydov A.M. et al. // Plasma Physics Reports. Vol. 39, 644-650, 2013.
7. Artem'ev K.V. et al. // Plasma Physics Reports. Vol. 42, 703-712, 2016.

Исследование механических напряжений на границе SiC/AlN методом спектроскопии КРС

Лихачев К. В.¹, Бресев И.Д.¹, Мохов Е.Н.¹, Анисимов А.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kirill28.1998@gmail.com

В последнее время все большим интересом пользуется исследование гетероструктур широкозонных полупроводников с различными показателями преломления, как для целей создания новых электрических устройств для силовой электроники, так и для создания фотонных кристаллов ультрафиолетового диапазона. Для этих целей необходимо хорошо понимать свойства границы данных материалов, полученных с помощью различных методов роста.

Образцом в нашей работе являлся гетероструктура AlN/SiC. Такого типа структуры получались ростом AlN на подложках 4H- и 6H-SiC сублимационным «сэндвич»-методом [1]. Главной проблемой после роста AlN на SiC является различные коэффициенты термического расширения у AlN и SiC, что приводит к появлению трещин в кристалле [2]. Целью данной работы было исследовать поведение пиков КРС AlN и SiC и определить величину возникающих напряжений на границе раздела.

В ходе работы было исследовано изменение положений пиков КРС фононных мод $2E_2$, $A_1(TO)$, $E_1(TO)$ в 4H-SiC и фононных мод $2E_2$, $E_1(TO)$, E_2 в 6H-SiC относительно границы раздела между AlN/SiC [3]. Было обнаружено, что фононные моды сдвигаются в область больших значений длин волн, что свидетельствует о возникновении сжимающего напряжения на границе.

По известным данным влияния статического напряжения, прикладываемого к карбиду кремния в 4H-SiC [4] была проведена оценка направления и величины остаточного напряжения на границе AlN/SiC.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-00154).

Список литературы

1. E. N. Mokhov and A. A. Wolfson, Single Crystals of Electronic Materials: Growth and Properties, Ed. By R. Fornary (Elsevier, Amsterdam, 2018)
2. E. N. Mokhov, T. S. Argunova, J. H. Je, O. P. Kazarova, and K. D. Shcherbachev, Cryst. Eng. Commun. 19,3192 (2017)
3. S. Nakashima and H. Harima, phys. stat. sol. (a) 162, 39 (1997)
4. Ryuichi Sugie, and Tomoyuki Uchida, Journal of Applied Physics 122, 195703 (2017)

Исследование распределения NV-центров в природном алмазе методами ФЛ и ОДМР

Яковлева В.В.¹, Бреев И.Д.¹, Анисимов А.Н.¹, Титков С.В.², Баранов П.Г.¹

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²ИГЕМ РАН

e-mail: valya_yakovleva_1999@mail.ru

Алмаз является одним из наиболее многообещающих минералов и имеет огромное прикладное значение в различных сферах человеческой деятельности. Несмотря на это, однозначная теория процесса образования алмаза, определения его возраста ещё не построена. Анализ кристаллической структуры алмаза для этих целей проводится множеством различных физических методов, среди которых для определения свойств внутренних парамагнитных дефектов используются методы ЭПР и ОДМР. Метод ЭПР используется для анализа всего кристалла в целом [1], а метод ОДМР позволяет возможностью прецизионного анализа с высоким пространственным разрешением.

Наиболее распространенной примесью в алмазе является азот, который может составлять до 1% от массы алмаза. Многочисленные исследования показали, что азот присутствует в большинстве алмазов и во многих различных конфигурациях. Большая часть азота попадает в алмазную решетку в виде одного атома (то есть азотсодержащие молекулы диссоциируют перед включением в алмаз), однако молекулярный азот также включается в алмаз. Среди парамагнитных дефектов в алмазе выделяется широко известный NV-центр, который представляет собой отрицательно заряженный замещающий атом азота, расположенный рядом с вакансией углерода. Он обладает яркой люминесценцией в видимом спектральном диапазоне, и основным спиновым состоянием $S=1$, спиновые населенности которого выстраиваются при лазерной накачке, что позволяет регистрировать ОДМР при комнатной температуре [2].

В данной работе будут представлены исследования природных алмазов методами ФЛ и ОДМР с использованием конфокального микроскопа, для исследования пространственного распределения NV-центров в природном алмазе. Для этого мы используем объективом 0.9 NA 100х, лазер с $\lambda=532$ нм, $P=5$ мВт, синхронный детектор, генератор НЧ, генератор СВЧ в диапазоне 2-3 ГГц с антенной для приложения резонансного СВЧ, ПЗС камера для записи спектра ФЛ, ФЭУ для регистрации интегральной ФЛ.

Мы получили распределение интенсивности ФЛ и спектры ОДМР NV-центров на поверхности натуральных алмазов, а также получили карты интенсивности ФЛ NV-центров. Помимо характерной картины распределения центров в макроскопическом масштабе, были обнаружены регулярно располагающиеся области с повышенным содержанием NV-центров, которые располагались вдоль кристаллографических направлений на поверхности кристалла и в его глубине.

Мы предполагаем, что ОДМР NV-центров дает обширную информацию об их свойствах: распределение концентрации NV центров по образцу, распределение локальных напряжений, характер взаимодействия NV центров с соседним азотом. Предполагается, что исследование ОДМР NV-центров (как и исследование пространственного распределение люминесценции других центров) в природных алмазах позволит дополнить имеющуюся геологическую информацию о процессах их образования.

Список литературы

1. Р. М. Минеева, Н. Н. Зудина, С. В. Титков, И. Д. Рябчиков, А. В. Сперанский, Н. Г. Зудин "ЭПР спектроскопия алмазов кубического габитуса из россыпей северо востока

- сибирской платформы: новый тип азотных центров" Доклады академии наук, 2013, том 448, No 6, с. 695–699.
2. A. Gruber, et al. Science 27 Jun 1997: Vol. 276, Issue 5321, pp. 2012-2014.

Спектроскопические исследования низкочастотных фононов в короткопериодных СР GaN/AlN как способ диагностики структуры

Давыдов В. Ю.¹, Рогинский Е.М.¹, Китаев, Ю.Э.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев, И.А.¹, Нечаев Д.В.¹, Жмерик В.Н.¹, Смирнов М.Б.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГУ

e-mail: vyu_davydov@mail.ru

Экспериментально и теоретически исследовались особенности динамики кристаллической решетки в короткопериодных GaN/AlN сверхрешетках (СР). Образцы были выращены прецизионным методом низкотемпературной плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) в металл (Ga)-обогащенных условиях с использованием метода субмонослойной цифровой эпитаксии [1]. Исследовались как равнотолщинные, так и разнотолщинные короткопериодные СР. Период СР изменялся в диапазоне от 1.5 до 6 нм, а полная толщина периодических структур варьировалась от 0.8 до 1 мкм. Частоты и тип симметрии всех фононных мод СР в спектрах микро-КРС были установлены с использованием различных конфигураций рассеяния. В низкочастотной части спектров всех СР, измеренных в геометрии рассеяния (здесь и далее ось z совпадает с направлением роста СР и с главной осью гексагональной структуры), наблюдалась широкая полоса с максимумом на положении ~ 80 см⁻¹, интенсивность которой увеличивалась с уменьшением периода СР. Эта полоса была идентифицирована нами как бозонный пик, появляющийся вследствие особенностей технологии изготовления образцов в металл (Ga)-обогащенных условиях [1]. Наряду с широкой полосой в спектрах были обнаружены узкие линии, положение которых монотонно менялось от ~ 50 до 160 см⁻¹ по мере уменьшения периода СР. Для выяснения природы этих линий была выполнена серия квантово-механических расчетов в рамках теории функционала плотности. С помощью этих расчетов изучались структурные, динамические и спектроскопические свойства СР. Сравнение теоретических и экспериментальных спектров показало их очень хорошее согласие. Анализ собственных векторов колебательных мод позволил сделать заключение, что наиболее интенсивные низкочастотные линии соответствуют фононам, которые генетически связаны со сложными продольными акустическими LA фононами объемного кристалла в результате многократного сложения зоны Бриллюэна. Картины атомных смещений этих мод имеют характер одного периода стоячей волны в пределах элементарной ячейки СР. Показано, что линия с максимальной интенсивностью в низкочастотной области спектра КРС соответствует моде, в которой смещения атомов максимальны в области интерфейса. Было показано, что положение этих линий зависит не только от полного периода, но и от отношения толщин слоев. Для интерпретации особенностей спектров КРС в низкочастотной области, была также применена модель упругого континуума (МУК) [3]. Как

упоминалось выше, в спектрах КРС изучаемых СР активны фононы генетически связанные со сложенными LA фононами. В рамках МУК частота этих фононов определяется соотношением $\nu = V_{SL}$, где d_1 и d_2 – толщины слоев, V_{SL} – скорость звука в СР, её величина зависит от d_1 и d_2 :

$$V_{SL} = (d_1 + d_2) / \left(\frac{d_1}{V_1} + \frac{d_2}{V_2} \right) \quad (1)$$

Измеренные скорости звука продольной волны LA, распространяющейся в направлении (001) в кристаллах GaN и AlN, составляют $V_1^{001}=8$ км/сек [4] и $V_2^{001}=11$ км/сек [5] соответственно. Подставляя эти величины в (1), для равнотолщинных решеток получаем значение 9.3 км/сек, что хорошо согласуется с оценками, полученными из экспериментальных данных. Формула (1) позволяет также использовать измеренные значения частоты LA фононов для оценки отношения толщин слоев. Таким образом, определение частоты сложенного LA-фонона из спектров КРС в геометрии, позволяет получать количественные оценки структурных параметров СР. Отметим, что использование геометрии рассеяния (возбуждение и регистрация спектра КРС с торца образца) имеет существенное преимущество по сравнению с традиционно используемой геометрии рассеяния при выполнении экспериментальных измерений сложенных LA-фононов. Это связано с тем, что интенсивность спектров КРС, которая пропорциональна толщине тестируемого образца, при использовании геометрии рассеяния не ограничена толщиной многослойной структуры, что позволяет получать надежную информацию даже в случае СР с толщиной намного меньше, чем 1 мкм.

Список литературы

1. Jmerik V.N., Nechaev D.V., Ivanov S.V., Kinetics of Metal-Rich PA Molecular Beam Epitaxy of AlGaN Heterostructures for Mid-UV Photonics. In *Molecular Beam Epitaxy: From research to mass production*, Henini M., Eds.; 2nd Edition; Elsevier Inc., pp 135-179, 2018.
2. Davydov V.Y., Jmerik V.N., Roginskii E.M., Kitaev Y.E., Beltukov Y.M., Smirnov M.B., Nechaev D.V., Smirnov A.N., Eliseyev I.A., Brunkov P.N., Ivanov S.V., Boson Peak Related to Ga Nanoclusters in AlGaN Layers Grown by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy at Ga-Rich Conditions, *Semiconductors*, Vol.53, 1479, 2019.
3. Rytov S.M., Acoustical Properties of a Thinly Laminated Medium, *Akust. Zh.*, Vol. 2, 71, 1956.
4. Yamaguchi M., Yagi T., Azuhata T., Sota T., Suzuki K., Chichibu S., Nakamura S., Brillouin scattering study of gallium nitride: elastic stiffness constants, *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 9, 241, 1997.
5. Kazan K., Moussaed E., Nader R., Masri P., Elastic constants of aluminum nitride, *Phys. Status Sol. C*, Vol. 4, 204, 2007.

Оптические спектры силикатных стекол, окрашенных ионами меди (Cu^+ , Cu^{2+}) и хрома (Cr^{3+} , Cr^{6+})

Русан В.В.¹

¹АО НПО ГОИ им С.И. Вавилова

e-mail: Vvrusan@mail.ru

В качестве альтернативы источников светового излучения, снабженных светофильтрами с определенной длиной волны излучения из окрашенного оптического стекла, популярность приобретают источники с цветными светодиодами. Тем не менее, подобные светодиоды по своим спектральным характеристикам имеют ряд недостатков. Как отмечается в [1], хотя чистота цвета излучения светодиодов красного и синего свечения близка к 100%, это не характерно для светодиодов зелено-голубого и зеленого свечения. В частности, они не соответствуют координатам границ цветности МКО [2].

Проведена экспериментальная оценка окислительного-восстановительного воздействия ионов хрома (Cr^{3+} , Cr^{6+}) на ионы меди (Cu^+ , Cu^{2+}) в случае их совместного присутствия в модельном кальциево-щелочно-силикатном зеленом стекле состава $0,73\text{SiO}_2$, $0,11\text{CaO}$, $0,16\text{R}_2\text{O}$ (где R-Na,K). Концентрация красителей (сверх 100 масс. %) составляла CuO -0,8 масс. % и Cr_2O_3 - 0,7 масс. %. В качестве красящих шихтных компонентов использовались оксид меди (II), CuO , и бихромат калия, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Измерены спектры поглощения синтезированных стекол, содержащих как один красящий элемент, так и их смесь. Построены спектры, полученные путем вычитания и сложения величин спектрального поглощения реальных образцов. Если известны спектры стекол одинаковой толщины и одного химического состава матрицы с разными красителями (a и b), и оптической плотностью $D^{\lambda} = D_{\lambda} + D_{\text{pm}}$, (где D^{λ} – оптическая плотность образца для света с длиной волны λ , D_{λ} – оптическая плотность массы стекла выбранной толщины, D_{pm} – поправка на отражение), то суммарная расчетная оптическая плотность ${}_{v(a+b)}D^{\lambda}$, будет определяться формулой

$${}_{v(a+b)}D^{\lambda} = D_{\lambda(a)} + D_{\lambda(b)} + D_{\text{pm}} \quad (1), \text{ или } {}_{v(a+b)}D^{\lambda} = D^{\lambda}_{(a)} + D^{\lambda}_{(b)} - D_{\text{pm}} \quad (2).$$

Если известен спектр поглощения и оптическая плотность стекла, содержащего два красящих элемента (a+b) и спектр стекла с одним из компонентов (b), то, разностный спектр стекла с другим компонентом (a) будет определяться формулой

$${}_{v(a)}D^{\lambda} = D^{\lambda}_{(a+b)} - D^{\lambda}_{(b)} + D_{\text{pm}} \quad (3).$$

Как показал анализ и сопоставление реальных и теоретических спектров (суммарного и разностного), рассчитанных по формулам (1, 2) и (3), соответственно, оптическая плотность стекла в видимой части спектра, содержащего как медь, так и хром, намного выше, чем расчетная оптическая плотность, которую можно было бы предположить до синтеза, опираясь на спектры стекол, содержащих только один из этих красителей. Увеличение реальной оптической плотности относительно рассчитанной теоретически обусловлено исключительно поглощением двухвалентных ионов меди Cu^{2+} [3, 4] с максимумом в области ~ 800 нм. Полоса поглощения ионов Cu^+ лежит в УФ области и, как правило, находится вблизи края собственного поглощения матрицы, что затрудняет идентификацию.

Прирост оптической плотности массы стекла ${}_{(add)}D_{\lambda}$, обусловленный окислительным воздействием ионов хрома на медьсодержащее стекло был определен по формуле

$${}_{(add)}D_{\lambda} = D_{\lambda(\text{Cu+Cr})} - D_{\lambda(\text{Cu})} - D_{\lambda(\text{Cr})} = D^{\lambda}_{(a+b)} - D^{\lambda}_{(b)} - D^{\lambda}_{(a)} + D_{\text{pm}} \quad (4)$$

На характеристической длине волны спектра поглощения 540 нм поглощение, обусловленное ионами Cr, ничтожно мало, это позволяет корректно оценить поглощение

ионов меди Cu^{2+} в стекле, значения измеренной оптической плотности соответствующих стекол составили

$D_{\lambda(\text{Cu+Cr})} = 0,921$, $D_{\lambda(\text{Cu})} = 0,371$, $D_{\lambda(\text{Cr})} = 0$ ($D'_{\lambda(\text{Cr})} = 0,038$, что соответствует $D_{\text{pm}} = 0,038$), при этом приращение поглощения за счет дополнительного окисления ионов меди составило

${}_{(\text{add})}D_{\lambda} = 0,550$, что в процентном отношении к $D_{\lambda(\text{Cu+Cr})}$ равно 59,7% (~ 60%).

Таким образом, можно полагать, что в синтезированных стеклах приведенного состава при введении оксида меди (II), CuO , устанавливается подвижное равновесие двух валентных форм меди $\text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+}$ (при этом спектр ионов Cu^+ прибором не регистрируется), которое при введении в шихту стекла соли шестивалентного хрома ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), благодаря окислению ионов одновалентной меди, сдвигается вправо, с образованием «добавочных» ионов двухвалентной меди, обуславливающих дополнительное поглощение в видимой части спектра, которое может достигать 60%.

Список литературы

1. Шуберт Ф. Светодиоды /Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. 2-е изд.—М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 496 с.2.
2. Д. Джадд, Г. Вышецки Цвет в науке и технике, М., «Мир», 1978 г., 592 с.3
3. W. A. Weyl, Coloured Glasses, The Society of Glass Technology, Sheffield (England), 1951, 541 pp.4
4. В. Коцик, И. Небрежски, И. Фандерлик Окрашивание стекла, М., Стройиздат, 1983, 212 с.

Градиентный фазочувствительный усилитель на основе PPLN

Галуцкий В. В.¹, Ивашко С.С.¹, Строганова Е.В.¹,

¹КубГУ

e-mail: galutskiy17v@mail.ru

В телекоммуникационных системах традиционно используются оптические фазочувствительные усилители, к которым относятся волоконные усилители, полупроводниковые и раммановские [1].

В данных устройствах коэффициент усиления оптического сигнала не зависит от фазы входных сигналов. В современных телекоммуникационных системах особый интерес представляют устройства, в которых коэффициент усиления является функцией зависимости от соотношения фаз входных сигналов. Использование такого класса усилителей позволяет не только снижать уровень шума, но и дает возможность использовать их для фазовой и амплитудной регенерации оптического сигнала, компенсации дисперсии и подавлении модуляционной нестабильности [2, 3]. Конструктивное исполнение фазочувствительных усилителей должно отвечать ряду требований современных телекоммуникационных технологий, например, таких, как, возможность работать с многоканальными устройствами, совместимыми с WDM системами.

В работе предлагается новый тип оптоэлектронного устройства – градиентный фазочувствительный усилитель на основе PPLN. Представлены теоретические исследования по разработке фазочувствительного усилителя на основе каскадных сSHG/DFG процессов в градиентном PPLN. В результате проведения исследований была обнаружена характерная зависимость коэффициента усиления от направления распространения оптического сигнала в градиентном PPLN. В исследованном PPLN (геометрическая длина составляет 30 мм) с градиентом концентрации лития по функции, нарастающей и спадающей полупараболы обнаружено различие величины коэффициента усиления в 10 дБ при мощности накачки 30 дБм. В процессе изучения модели фазочувствительного усилителя на основе градиентного PPLN обнаружено увеличение на величину 35% от ширины диапазона перестройки по длине волны для входных сигналов по сравнению с безградиентным PPLN. Таким образом, на ряду с компактными размерами, главным преимуществом PPLN является отсутствие у него необходимости подавления эффекта стимулированного комбинационного рассеяния (Брюлиэновского), как в случае с волоконными усилителями. При наличии градиента состава в волноводном канале PPLN, реализуется возможность создания, направленного фазочувствительного усилителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. J. Pedro and N. Costa: J. of Lighthwave Technology Vol.36 (2018) p. 1552
2. K. Coussore, I. Kim, Y. Han, C. Kim, G. Li and S. Radic: Opt. Express Vol. 13 (2005), p. 3945
3. K. Coussore and G. Li: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. Vol. 14 (2008), p. 648

Влияние протонного облучения на оптические и спектральные характеристики фотоприемников 4H-SiC

Калинина Е.В.¹, Каташев А., Забродский В., Никитина И., Иванова Е.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: evk@mail.ioffe.ru

Современное развитие космонавтики, изучение атмосферы планет и их спутников, исследование межзвездного и межпланетного пространства, диагностика «озоновых дыр» проявляют повышенный интерес к регистрации электромагнитного излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Эффективное наблюдение УФ излучения возможно только с борта ракет и космических аппаратов из космоса с его повышенной радиационной активностью, поэтому работа в столь сложных условиях требует применения фотоприемников радиационно-стойких и «видимо-слепых» [1].

4H-SiC один из полупроводников для создания эффективных фотоприемников ультрафиолетового излучения [2]. Ширина запрещенной зоны материала 3.23 эВ, обеспечивающая нечувствительность к видимому и ИК-излучению, исключает необходимость использования УФ светофильтров [3]. Низкие значения генерационных токов в 4H-SiC и высокая теплопроводность материала исключают необходимость принудительного охлаждения приборов, что снижает габариты и энергообеспечение оборудования [4]. Радиационная стойкость различных приборов на основе 4H-SiC исследовалась при облучении электронами, нейтронами и высокоэнергетичными ионами в широком диапазоне их масс от легких до тяжелых (Kr, Xe, Bi) [5, 6]. Результаты работ подтвердили высокую радиационную стойкость приборов на основе 4H-SiC. Поскольку солнечное излучение содержит 91% протонов, интерес представляет дальнейшее исследование влияния протонного облучения на работу 4H-SiC УФ фотоприемников.

В работе исследовались *n*-4H-SiC УФ фотоприемники с Cr барьерами Шоттки толщиной 7-10 нм диаметром 8 мм в спектральном интервале 200-400 нм. Барьеры создавались на CVD эпитаксиальных слоях толщиной 5 мкм с концентрацией $N_d-N_a = (1-50) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, выращенных на подложках *n*+4H-SiC с $N_d-N_a = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Структуры облучались 5-й раз протонами с энергией 15 МэВ суммарными флюенсами $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $5.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в зависимости от концентрации N_d-N_a в CVD слоях.

Выявлено и объяснено в рамках теории фотопроводимости влияние концентрации носителей заряда в *n*-4H-SiC CVD эпитаксиальных слоях на спектральные характеристики УФ фотоприемников, наилучшие значения квантовой эффективности наблюдались в структурах с $N_d-N_a = (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При взаимодействии света с полупроводником фоточувствительность определяется процессами генерации неравновесных носителей, их движением и рекомбинацией. Вероятно, в указанном интервале концентрации носителей заряда определяющими факторами являются зависимости как фоточувствительности, так и коэффициента поглощения свет от концентрации носителей заряда в полупроводнике [7]. Однако при значительных концентрациях $N_d-N_a \geq 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ возрастает скорость рекомбинации носителей заряда, уменьшается их время жизни, что приводит к снижению квантовой эффективности.

Согласно расчетам по программе SRIM, пробег протонов с энергией 15 МэВ составляет 1 мм, можно считать распределение радиационных дефектов однородным по толщине 5 мкм CVD слоя. Увеличение суммарных флюенсов облучения протонами в образцах приводило к заметному увеличению полуширины 2-кристалльных КК, согласно рентгеновским измерениям. В результате 5-ого облучения протонами происходит разрушение

локальных областей с меньшим параметром (пересыщенных вакансиями). Это сопровождается разупорядочением структуры по сравнению с исходным состоянием, что приводит к увеличению интенсивности при сканировании вдоль оси ω - в картинах распределения интенсивности на отражении (008) в двух направлениях ω - и 2ω -сканирования. Полученные данные согласуются с результатами измерений CL, где появление 2-х пиков в экситонной люминесценции указывают на образование связанного экситона, предположительно вакансионного типа (V_{Si}) [8]. Фоточувствительность УФ 4H-SiC фотоприемников при этом падает.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-12-10106).

Список литературы

1. R.A. Miller, H. So, T.A. Heuser, D. G. Senesky. *Journal of Vacuum Science & Technology* B33 (4), 04602 (2015).
2. A. Gottwald, U. Kroth, E. Kalinina, V. Zabrodskii. *Applied Optics* 57 (28), 6431 (2018).
3. F. Yan, X. Xin, S. Aslam, Y. Zhao, D. Franz, J. Zhao, M. Weiner. *IEEE J. Quantum Electron.*, 40, 1315 (2004).
4. D. Prasai, W. John, L. Weixelbaum, O. Krüger, G. Wagner, P. Sperfeld, S. Nowy, D. Friedrich, S. Winter, and T. Weiss. *J. Mater. Res.*, 28, 33 (2013).
5. D.M. Martin, H. Kortegaard Nielsen, P. Leveque, A. Hallen. *Appl. Phys. Lett.*, 84 (10), 1704 (2004).
6. Е.В. Калинина, Н.А. Чучвага, Е.В. Богданова., А.М. Стрельчук, Д.Б. Шустов, М.В. Заморянская, В.А. Скуратов. *ФТП* 48 (2), 167 (2014).
7. С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (Москва, Изд-во “Физико-математической литературы”, 1963) гл. I.
8. A. Fissel, W. Richter, J. Furthmüller, F. Bechstedt. *Appl. Phys. Lett.*, 78, 2512 (2001).

Генерация «капельного» пучка Бесселя на основе полупроводникового лазера

Абдулразак С. Х., Чистяков Д.В., Мыльников В.Ю., Когнивицкая Е.А., Задиранов Ю.М., Дерягин Н.Г., Дюделев В.В., Кучинский В.И., Лосев С.Н., Соколовский Г.С.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: sausana95@mail.ru

Бесселевы пучки привлекают внимание благодаря их способности распространяться на значительное расстояние без расходимости, а также свойству самовосстановления после прохождения препятствия. За счет этих свойств бесселевы пучки привлекательны для манипуляции микробъектами [1]. Бесселевы пучки применяются для генерации «бутылочных» [2] и «капельных» [3, 4] пучков, позволяющих создавать трехмерную оптическую ловушку. Отличительная особенность «капельных» пучков от классических бесселевых, заключается в периодическом изменении интенсивности центрального пятна. «Капельная» структура пучка позволяет также создать бутылочные пучки, которые осуществляют захват в темной области, где интенсивность излучения близка к нулю.

Стоит отметить, что экспериментальные установки, которые в настоящее время генерируют «капельные» пучки, реализованы при помощи либо оптической системы на

основе пространственного светового модулятора, либо двух аксиконов, генерирующих противоположно направленные бесселевы пучки [2]. Данные схемы являются громоздкими, сложными и дорогостоящими из-за большого числа компонент и необходимости точной юстировки.

В настоящей работе предлагается метод генерации «капельных» бесселевых пучков с подавлением боковых колец при помощи аксикона со скругленной вершиной и полупроводникового лазера. При этом «капельный» пучок с такой структурой можно эффективно использовать для двух- и трехмерного оптического захвата микроскопических объектов различных показателей преломления.

Исследуемый пучок генерируется при помощи излучения полупроводникового лазера с длиной волны 1064 нм и конической линзы с углом при вершине 140°. «Капельная» структура пучка формируется за счет интерференции волновых фронтов бесселева и Гауссова пучков. Бесселев пучок генерируется конической частью аксикона, а Гауссов пучок формируется его сферической частью, расположенной в области вершины. Период «капель» определяется разницей волновых векторов в направлении распространения. Исследование поля излучения генерируемого пучка показало, что центральное яркое пятно бесселева пучка распространяется прерывисто в виде «световых капель». При этом наблюдалось периодическое подавление интенсивности боковых колец. Протяженность перетяжки, центрального пятна без боковых колец, составила 40 мкм, что вдвое превосходит ранее полученные результаты [5].

На следующем этапе планируется использование предлагаемого подхода для генерации «бутылочных» бесселевых пучков. В дальнейшем планируется осуществить стабильный захват микроскопических объектов с различными показателями преломления при помощи продемонстрированных «капельных» и «бутылочных» бесселевых пучков.

Список литературы

1. V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Meiville, W. Sibbett, K. Dholakia, *Nature*, 419, 145 (2002)
2. L. Li, W.M. Lee, X. Xie, W. Krolikowski, A.V. Rode, J. Zhou, *Opt. Lett.* 39, 2278 – 2281 (2014)
3. G. Antonacci, G. Di Domenico, S. Silvestri, E. DelRe, G. Ruocco, *Appl. Opt.* 56, 2908-2911 (2017)
4. G. Di Domenico, G. Ruocco, C. Colosi, E. DelRe, G. Antonacci, *Sci Rep* 8, 17178 (2018)
5. G. S. Sokolovskii, V. Melissinaki, K. A. Fedorova, V. V. Dudelev, S. N. Losev, V. E. Bougrov, W. Sibbett, M. Farsari, and E. U. Rafailov, *Sci. Rep.* 8, 14618 (2018).

Номер проекта РФФИ: 17-02-00865

Light-emitting diodes with InGaN/GaN quantum wells and modulation of injected current by designed electrode

Khmyrova I.¹, Nishidate Y.¹, Kovalchuk A.², Tsatsulnikov A.³, Maximov I.⁴ and Shapoval S.²

¹University of Aizu

²IMT RAS, Chernogolovka, Russia

³Ioffe Institute, Russia

⁴Lund University, Lund S-221 00, Sweden

e-mail: irikha919@gmail.com

Nitride-based light-emitting diodes (LEDs) grown on c-sapphire substrates usually have planar configuration with light extraction via top surface. In such a configuration a top metal electrode prevents most of the generated light from being extracted. To enhance light extraction from such LEDs it was proposed to pattern the LED's top metal p-electrode as a mesh [1]. The observed performance enhancement was associated with the potential profile created by the designed electrode along the active region [2, 3]. At a proper choice of the mesh pitch the electric fields from adjacent metal strips of the electrode overlap each other creating such a potential profile that current can be injected into and light generated in the uncovered portions of the active region. Light generated there can be efficiently extracted via the mesh windows. The impact of the spatially nonuniform modulation of injected current by designed electrode occurred to be even more profound in the LEDs with two sets of InGaN/GaN quantum wells (QWs) for blue and green emission [4]. Broad electroluminescence (EL) spectra measured for such dual-wavelengths LEDs revealed blue and green peaks separated by shallow trough. In dual-wavelength LEDs the designed electrode not only improved output optical performance but also modified their EL-spectra. The effect of the mesh-like patterning of the electrode can be attributed to the spatially nonuniform compensation of piezoelectric field in the InGaN QWs.

In this paper we report an analysis of experimental EL-spectra of the dual-wavelength LED with mesh-like top metal electrode using the developed procedure of spectral decomposition into Gaussian functions (GFs) [5]. First step of decomposition into basic GFs resulted in the extraction of blue, green, and violet emission lines from the experimental EL-spectra. Then basic blue and green GFs were decomposed into the sets of secondary GFs with FWHM of the most secondary GFs in each set close to the value determined by thermal broadening. Due to periodic configuration of mesh-like electrode the distributions of electric potential and injected current along the QW-active region are also periodical and spatially nonuniform within the limits of a single mesh cell. Spatial nonuniformity of injected charge carriers along the QW-plane resulted in spatially nonuniform screening of piezoelectric field in the InGaN/GaN QWs which, in turn, causes position dependent variations of the band gap width and emission blue-shift, i.e., position-dependent compensation of quantum-confined Stark effect (QCSE) takes place. Thus, the results of spectral decomposition provided a basis to relate broad experimental EL-spectra to the spatially nonuniform distributions of potential and injected current due to mesh-like design of the LED top metal electrode. Spatial modulation of the injected charge carriers not only determines the intensity of generated light but also affects the blue-shift of its wavelength.

It should be pointed out that the metal strips "cut-off" a portion of light with larger intensity and shorter wavelength so that central peak wavelengths of the emission spectrum of blue (green) QW and relevant basic GF from EL-spectrum decomposition can differ from each other. Using basic GFs one can evaluate splitting of the injected charge carriers between green and blue QWs which can be used in optimization-oriented modeling of the LED's performance.

Формирование омических контактов к *n*-легированным слоям $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ с высоким содержанием алюминия ($x > 0.5$)

Буренина Д. С.¹, Семенов А.Н.¹, Гусева Ю.А.¹, Кулагина М.М.¹, Смирнова И.П.¹, Задиранов Ю.М.¹, Нечаев Д.В.¹, Кошелев О.А.¹, Трошков С.И.¹, Жмерик В.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: dsburenina@gmail.com

Для создания оптоэлектронных приборов, работающих в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, используются гетероструктуры на основе широкозонных твердых растворов AlGaN с шириной запрещенной зоны, варьируемой от 3.4 до 6.1 эВ (210–365 нм). В солнечно-слепых УФ-фотодиодах с рабочей длиной волны менее 300 нм необходимо использовать *n*-легированные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ с высоким содержанием Al ($x \geq 0.6$). В таких слоях с ростом содержания Al существенно возрастает как слоевое, так и контактное сопротивление [1, 2], что затрудняет формирование омических контактов к слоям. При этом оказывается, что разработанные технологии формирования омических контактов к GaN:Si [3] и слоям $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ ($x < 0.6$) [4] не могут быть просто перенесены на слои AlGaN с высоким содержанием алюминия в силу сложного характера взаимодействия металлов с полупроводником и образованием композиционных интерметаллических соединений [2, 5]. Кроме того, для уменьшения этих сопротивлений вместо стандартных твердых растворов AlGaN:Si было предложено использовать короткопериодные сверхрешетки GaN/AlN, для которых также необходимо разработать технологии формирования контактов [6].

В настоящей работе исследовалось влияние различных технологических режимов формирования омических контактов Ti/Al/Ti/Au на величину контактного и удельного сопротивления слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ с высоким содержанием алюминия ($0.5 \leq x \leq 0.8$), выращенных методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии. Исследовались как стандартные слои твердых растворов AlGaN, так и цифровые твердые растворы, выращенные в виде короткопериодных сверхрешеток GaN/AlN с периодом 1.5 МС/3.5 МС. Для формирования омических контактов использовалось быстрое термическое вжигание многослойных контактов с различной толщиной Al-слоя Ti(25 нм)/Al(80–250 нм)/Ti(60 нм)/Au(100 нм), которые напылялись методом магнетронного напыления. Температура и время вжигания контактов варьировались в диапазоне 700–1000°C и 30–180 секунд соответственно. Значения удельного (r_c), контактного (R_c) и слоевого (R_s) сопротивлений измерялись с помощью линейного TLM-метода. Поверхность образцов исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Установлено, что многослойный контакт Ti/Al/Ti/Au обеспечивает омическое контактное сопротивление к слоям $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}:\text{Si}$ с $x \geq 0.6$ уже при минимальных использованных температурах вжигания 700°C, но для достижения минимальных значений R_c необходимо использовать более высокие температуры вжигания 900–1000°C. Особенно сильно влияние температуры вжигания проявляется для образцов с высоким слоевым сопротивлением ($R_s \geq 2$ кВт/). Наилучшие результаты были получены при использовании кратковременного вжигания (60 сек), поскольку дальнейшее уменьшение времени вжигания приводило к большому разбросу параметров (r_c и R_c) по площади образца. Обнаружено, что влияние толщины алюминиевого слоя зависит от содержания Al и уровня легирования слоев AlGaN:Si. Во всех слоях GaN и в сильнолегированных слоях AlGaN:Si ($R_s \leq 1$ кВт/) контактное сопротивление практически не менялось при увеличении толщины слоя алюминия, в то время как в слоях AlGaN:Si с $R_s \geq 2$ кВт/, увеличение толщины алюминия с 80 до 250 нм приводило к уменьшению контактного сопротивления на два порядка. Этот

эффект объясняется возможным уменьшением работы выхода при образовании сложных тройных интерметаллических соединений.

В ходе выполнения работы для образцов $Al_{0.6}Ga_{0.4}N:Si$ были получены следующие значения сопротивлений: $R_C = 10 \text{ W}\times\text{mm}$, $R_S = 800 \text{ W/}$, $r_C = 10^{-3} \text{ W}\times\text{cm}^2$, а для образцов $Al_{0.8}Ga_{0.2}N:Si$: $R_C = 30 \text{ W}\times\text{mm}$, $R_S = 1000 \text{ W/}$, $r_C = 7\times 10^{-3} \text{ W}\times\text{cm}^2$. Важно отметить, что последние значения были получены для цифровых твердых растворов GaN/AlN, поскольку стандартные твердые растворы демонстрировали сильную компенсацию даже при номинально высоких уровнях легирования.

Работа поддержана частично Российским научным фондом (проект №19-72-30040).

Список литературы

1. Y.-H.Liang and E.Towe. Appl. Phys. Rev. 5 011107 (2018).
2. B. Van Daelea et. al. Appl. Phys. Lett. 87, 061905 (2005).
3. N. A. Papanicolaou et. al. J. Vac. Sci. Technol. B, Condens. Matter, 19, 261, (2001).
4. D. Selvanathan et. al. Electron. Lett., 38, 755, (2002).
5. Liang Wang et. al. J. Appl. Phys. 103, 093516 (2008).
6. J. Yun et. al. IEEE Electron Device Letters, 27, (2006).

Номер проекта РФФИ: 17-52-80089

Механизм токопрохождения в GaAs фотопреобразователях лазерного излучения ($\lambda=809 \text{ нм}$) при температурах 100-420 К

Минтаиров М. А.¹, Евстропов В.В.¹, Минтаиров С.А.¹, Нахимович М.Н.¹, Шварц М.З.¹, Калужный Н.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: mamint@mail.ioffe.ru

В настоящее время происходит активное развитие фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) лазерного излучения для применения их в средствах связи [1, 2] и передачи энергии через атмосферу и космическое пространство [3-5]. Эффективность ФЭП во многом определяется его шириной запрещенной зоны (E_g) p-n перехода и параметрами токопрохождения — токами насыщения: диффузионным (J_{01}) и рекомбинационным (J_{02}). Ранее [6] было определено, что в $Ga_{1-x}In_xAs$ p-n переходах, в широком диапазоне x , параметры E_g , J_{01} и J_{02} связаны следующим уравнением с соответствующими токовыми инвариантами J_{z1} и J_{z2}

$$J_{0A} = J_{zA} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{AkT}\right), \quad (1)$$

где A — коэффициент идеальности ($A=1$ или 2), k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

В данной работе, в широком диапазоне температур (от 100 до 420 К) были измерены спектры электролюминесценции и вольт-амперные характеристики GaAs ФЭП. По положению пиков электролюминесценции была определена температурная зависимость $E_g(T)$. Вольт-амперные характеристики были аппроксимированы двух-диодной моделью [7] с учётом последовательного сопротивления. Это позволило получить температурные зависимости $J_{01}(T)$ и $J_{02}(T)$. Было установлено, что выражение (1) достаточно точно

аппроксимирует полученные экспериментальные данные. Найденные значения $J_{z1}=1.0 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$ и $J_{z2}=2.0 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ близки к значениям для ФЭП на основе метаморфной $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ гетероструктур при изменении состава x [6].

Таким образом, результаты работы показывают возможность прогнозирования токов насыщения для заданной ширины запрещенной зоны и температуры, что позволяет проектировать ФЭП лазерного излучения и рассчитывать их фотоэлектрические характеристики (в том числе эффективность).

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 22 «Перспективные физико-химические технологии специального назначения».

Список литературы

1. В.М. Андреев, Б.В. Егоров, А.М. Койнова, В.М. Лантратов, В.Д. Румянцев, Н.М. Сараджишвили. ФТП, 20(3), 435 (1986)
2. R. Pena, C. Algora. Proc. 20th EU Conf. on PV Solar Energy (Barcelona, Spain, 2005), p. 488
3. V. Bogushevskaya, B. Zhalnin, O. Zayats, Ya. Maslyakov, I. Matsak, A. Nikonov, Ye. Obrucheva, V. Tugaenko. Thermal Engineering, 59(13), 975 (2012).
4. M. Smith, B. Tillotson, J. Oliver, N. Tarasenko, T. Schoelzel, H. Brandhorst. Proc. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC) (Austin, TX, USA, 2012) p. 002825
5. J.T. Howell, M.J. O'Neill, R.L. Fork. Proc. 5th Wireless Transmission Conf. / 4th Int. Conf. on Solar Power from Space (Granada, Spain, 2004), p. 187
6. M. A. Mintairov V. V. Evstropov, S. A. Mintairov, M. Z. Shvarts & N.A. Kalyuzhnyy, 2019 J. Phys.: Conf. Ser., 1410, 012097

Исследование применения высокочастотной модуляции оптического излучения лазера для улучшения точностных характеристик ВОГ

Востриков Е.В.¹, Смирнов Д.С.¹, Никифоровский Д.А.¹, Погорелая Д.А.¹, Алейник А.С.¹,

¹Университет ИТМО

e-mail: vostrikov-e@mail.ru

В настоящее время широкое распространения получило новое научно-техническое направление радиофотоника. Данное направление позволяет создавать устройства с параметрами, недостижимыми обычными электронными устройствами. В основе работы радиофотонных устройств заложен принцип взаимодействия высокочастотных сигналов (ВЧ) УВЧ и СВЧ-диапазонов и оптического излучения. Применение радиофотонных технологий позволяет не только создавать, но и улучшать параметры уже созданных волоконно-оптических измерительных приборов [1]. В последнее время радиофотонные технологии начинают активно использоваться во многих прикладных областях, в том числе в области волоконно-оптической гироскопии. В данных работах [2, 3] авторы использовали ВЧ модуляцию для улучшения параметров волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Основной идеей работы [3] является модуляция оптического сигнала лазерного источника ВЧ шумоподобным сигналом в полосе до 27 ГГц. Данный способ [3] позволил снизить дрейф и случайные отклонения угловой скорости ВОГ при использовании лазерного

источника оптического излучения до уровня, достижимого с использованием широкополосного источника, что потенциально может увеличить стабильность масштабного коэффициента, уменьшить стоимость и сложность разработки ВОГ. Таким образом, последние достижения в области волоконно-оптической гироскопии [2, 3] показали, что применение радиофотонных технологий является одним из возможных направлений по улучшению точностных характеристик ВОГ.

В настоящей работе содержатся теоретические и экспериментальные данные, полученные авторами при применении ВЧ модуляции оптического излучения лазерного источника ВОГ. В качестве подготовительного этапа запланированного исследования была собрана экспериментальная схема, основными элементами которой являлся генератор SMA 100В с полосой до 40 ГГц и максимальным усилением 28 дБм, ферритовый вентиль ФВКЗ-28 с частотной полосой от 1 до 2 ГГц, фазовый модулятор с рабочей полосой до 20 ГГц и полуволновым напряжением $U_p = 5$ В, предоставленный ФТИ им. А.Ф. Иоффе, и ВОГ. В качестве источника оптического излучения использовался лазерный диод FRL15TCWx-D86-xxxxxA компании Fitel. Последовательно лазерному диоду был подключен фазовый модулятор, на который поступал ВЧ сигнал. Ферритовый вентиль ФВКЗ-28 был установлен для защиты генератора SMA 100В от обратных отражений. В основной части настоящей работы содержатся экспериментальные данные применения ВЧ модуляции излучения лазерного источника. В ходе выполнения эксперимента были выявлены зависимости параметров сигнала ВОГ от частоты и усиления ВЧ сигнала. Оценка применения ВЧ модуляции излучения лазерного источника производилась по результатам обработки выходного сигнала ВОГ. Наиболее широкое распространение для оценки сигнала ВОГ получила дисперсия Аллана – оценка среднеквадратического отклонения (СКО) выходного сигнала ВОГ. В результате оценки экспериментальных данных была выявлено, что применение данного способа позволяет уменьшить СКО сигнала ВОГ по сравнению с использованием лазерного источника без применения модуляции. Также была произведена оценка применения данного способа при использовании широкополосного источника оптического излучения. Заключительным этапом данной работы являлось сравнение сигналов ВОГ при использовании лазерного и широкополосного источников оптического излучения.

Результаты исследований показали, что ВЧ модуляция лазера позволила расширить спектр и подавить несущую лазерного излучения, что позволило снизить СКО сигнала угловой скорости ВОГ более чем в 2.5 раза (согласно вариации Аллана в области окон усреднения до 10 секунд) по сравнению с использованием лазера без модуляции. Тем не менее, для достижения уровня шумов сигнала ВОГ, сравнимого с уровнем шумов при использовании широкополосного эрбиевого источника, необходимо подавать равномерный шум в большей полосе и большей мощности, результаты этого исследования будут опубликованы в следующих работах.

Список литературы

1. Востриков Е.В., Литвинов Е.В., Волковский С.А., Алейник А.С., Польте Г.А. Применение радиофотоники в волоконно-оптических измерительных приборах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 1–23 doi:10.17586/2226-1494-2020-20-1-1-23
2. Chamoun J., Digonnet M.J.F. Pseudo-random-bit-sequence phase modulation for reduced errors in a fiber optic gyroscope. Optics Letters, 2016, vol. 41, no. 24, pp. 5664–5667. doi: 10.1364/OL.41.005664

3. Chamoun J., Dignonnet M.J.F. Aircraft-navigation-grade laser-driven FOG with Gaussian-noise phase modulation. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 8, pp. 1600–1603. doi: 10.1364/OL.42.001600

Моделирование спектральных и мощностных характеристик светодиодных структур среднего инфракрасного диапазона на основе InAs(Sb)

Липницкая С.Н.¹, Семакова А.А.^{1,2}, Мынбаев К.Д.^{1,2}, Баженов Н.Л.²

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: snlipnitskaya@itmo.ru

Светодиоды с активной областью на основе InAs(Sb), работающие в среднем инфракрасном диапазоне (длина волны 3-5 мкм), где находятся основные полосы поглощения углеводородов, широко востребованы в устройствах для газового анализа, контроля технологических процессов, медицинской диагностики и т.п. [1]. Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками таких приборов, является повышение их эффективности, что может быть достигнуто, в том числе, оптимизацией дизайна приборных структур. Часто такая оптимизация проводится экспериментальным путем, что является дорогостоящим и времязатратным процессом, поскольку включает в себя выращивание гетероструктур с определенным дизайном, их процессирование, изготовление светодиодов и измерение их параметров. В то же время, современные средства моделирования физических процессов в приборных структурах позволяют проводить анализ даже сложных по дизайну структур, предоставляя широкие возможности в части выборов параметров и моделей различных процессов, протекающих в структурах при их работе.

В настоящей работе мы сообщаем о результатах моделирования вольт-амперных, спектральных и мощностных характеристик светодиодных структур на основе InAs(Sb). Для разработки численной модели использовалась программная среда COMSOL Multiphysics. Предварительно были проведены экспериментальные исследования структур, выращенных в российской компании Microsensor Technology, LLC и ФТИ им. А.Ф. Иоффе методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Активная область экспериментально исследованных структур была изготовлена из InAs(Sb) с мольной долей InSb от 0 до 0.16. Она была не легирована и имела электронный тип проводимости. Гетероструктуры различались порядком чередования слоёв, типом проводимости и уровнем легирования подложки из InAs, а также химическим составом барьерных слоев, изготовленных из InAs(Ga,Sb,P).

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены вольт-амперные характеристики и спектры электролюминесценции структур в широком диапазоне температур (4.2-300 К), а также их ватт-амперные характеристики при 300 К. Полученные в эксперименте данные были использованы для верификации численной модели при проведении моделирования. После этого были проведены параметрические расчеты модели светодиодных структур на основе совместного решения уравнения Пуассона и уравнений непрерывности для носителей заряда в стационарной постановке методом конечных объемов по противопотоковой схеме Шарфеттера-Гуммеля. В модели

учитывались только межзонные механизмы рекомбинации и спонтанная эмиссия. Элементы матрицы перехода задавались через время жизни излучательной рекомбинации. При моделировании рассматривалась полная гетероструктура (на её боковых поверхностях задавалось граничное условие изоляции, на границах слоев задавалось условие непрерывности/гетероперехода с использованием модели термоионной эмиссии). Параметры материала и выражения для их расчетов при моделировании были взяты из работы [2]. При проведении параметрических расчетов варьировались такие параметры, как тип и уровень легирования слоев, химический состав барьерной области, толщина и порядок следования слоев. Также были проведены исследования на сеточную сходимость.

Сопоставление данных моделирования и результатов экспериментов позволило определить основные механизмы протекания тока и рекомбинации носителей в исследованных структурах и выявить предположительные механизмы, ограничивающие эффективность работы структур.

Работа была поддержана грантом РФФИ 19-32-90091 «Рекомбинационные процессы в светодиодных гетероструктурах среднего инфракрасного диапазона».

Список литературы

1. Jung D., Bank S., Lee M.L., Wasserman D., Next-generation mid-infrared sources, *Journal of Optics*, vol. 19, 123001, 2017
2. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R., Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys, *Journal of Applied Physics*, vol. 89, 5815-5875, 2001

Номер проекта РФФИ: 19-32-90091

Влияние температуры на оптические и электрические свойства длинноволновых светодиодных гетероструктур на основе InAsSb

Семакова А. А.¹, Мынбаев К. Д.^{1,2}, Баженов Н. Л.², Романов В. В.², Моисеев К. Д.²

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: antonina.semakova@itmo.ru

Светодиоды среднего инфракрасного (ИК) диапазона (2-6 мкм) являются перспективными источниками излучения в системах экологического мониторинга и неинвазивной медицинской диагностики [1]. На сегодняшний день одной из актуальных задач является оптимизация дизайна гетероструктур для повышения эффективности и надежности работы светодиодов при наличии внешних возмущающих факторов, таких как изменение температуры окружающей среды. Особый интерес представляет длинноволновая граница данного спектрального диапазона. При формировании гетероструктуры необходимо увеличивать содержание атомов сурьмы в твердом растворе InAsSb, что ведет к рассогласованию по параметру кристаллической решетки относительно подложки InAs.

В настоящей работе представлены результаты исследования электролюминесценции и вольт-амперных характеристик ассиметричных двойных гетероструктур InAs/InAsSb/InAsSbP с мольной долей InSb (x_{InSb}) в активной области 0.15 и 0.16, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.

Исследования проведены в температурном диапазоне 4.2-300 К. Анализ спектральных характеристик структур позволил выявить основные каналы излучательной рекомбинации. В гетероструктуре с $x_{InSb}=0.16$ при $T<50$ К доминировали линии излучения, связанные с рекомбинацией на гетероинтерфейсе InAsSb/InAsSbP. Однако увеличение температуры ($T>80$ К) способствовало уменьшению локализации носителей на интерфейсе и определяющим становилось излучение, вызванное рекомбинацией носителей в объеме активного слоя. Вследствие изменения основного канала излучательной рекомбинации, энергия излучения слабо зависела от температуры диода. В тоже время, для структуры с $x_{InSb}=0.15$ рекомбинация носителей проходила в объеме активного слоя во всем температурном диапазоне. По результатам исследования вольт-амперных характеристик определены основные механизмы протекания тока, регулирующие перенос заряда при увеличении температуры диода от 4.2 до 300 К. Напряжение отсечки по величине было меньше соответствующей ширины запрещенной зоны узкозонного слоя, расположенного в активной области гетероструктур, что, вероятно, связано с наличием тока утечки через интерфейс. С повышением температуры заметно увеличивался обратный ток вольт-амперных характеристик обеих структур. Данный эффект может быть связан с ростом туннелирования через гетерограницу InAsSb/InAsSbP.

Сильная локализация носителей заряда в активной области, обеспечиваемая конструкцией гетероструктур, а также слабая зависимость длины волны излучения от температуры диода представляют данные структуры перспективными для изготовления температурно-стабильных ИК-излучателей данного спектрального диапазона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90091.

Список литературы

1. Ting D., Soibel A., Khoshakhlagh A., Keo S., Rafol B., Fisher A., Pepper B., Luong E., Hill C., Guhapala S., Advances in III-V semiconductor infrared absorbers and detectors, Inf. Phys. Technol., 97, 210-216, 2019

Номер проекта РФФИ: 19-32-90091

Исследование поглощения в волноводных InGaAs гетероструктурах «квантовые яма-точки»

Харченко А.А.¹, Надточий А.М.^{1,2}, Минтаиров С.А.³, Максимов М.В.¹

¹ СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

² Высшая школа экономики

³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: antoshkerr@gmail.com

В настоящее время для гетероструктур на основе квантовых ям (КЯ) InGaAs и квантовых точек (КТ) InAs на подложках GaAs найдено множество прикладных применений, в частности в области создания полупроводниковых светоизлучающих приборов и фотопреобразователей. Одной из самых ценных особенностей квантоворазмерных структур является возможность гибкого варьирования длины волны поглощения/излучения, что практически недостижимо в приборах на основе объемных материалов. В то же время, структурам на основе КЯ и КТ присущи свои недостатки, связанные в первую очередь с

низкой плотностью массивов In(Ga)As КТ и значительными упругими напряжениями в КЯ InGaAs. Относительно недавно был разработан новый тип кванторазмерных InGaAs гетероструктур – квантовые яма-точки (КЯТ) [1], которые представляют собой InGaAs/GaAs квантовую яму со значительными модуляциями по толщине и составу. КЯТ можно также рассматривать как сверхплотный массив мелких InGaAs КТ, представляющих собой In-обогащенные области внутри КЯ. Было показано, что этот новый тип гетероструктур лишен некоторых недостатков как КЯ, так и КТ, но сохраняет их ключевые преимущества [2]. В частности есть возможность последовательно выращивать более 15 слоев КЯТ без образования дислокаций, что невозможно для КЯ InGaAs/GaAs без применения слоев, компенсирующих упругие напряжения. КЯТ обладают значительно большим усилением (поглощением) по сравнению с КТ InAs/GaAs. В фотопреобразователях на основе GaAs был получен рекордно высокий прирост фототока [3], что доказывает перспективность КЯТ для фотовольтаических применений.

В силу своей новизны многие свойства и особенности КЯТ еще не изучены, поэтому их исследования актуальны. В настоящей работе экспериментально измерена величина показателя модального поглощения КЯТ. Для этого была синтезирована *p-i-n*-структура с КЯТ и получены спектры fotocувствительности (в т.ч. поляризационно-зависимые) в волноводных структурах в планарной геометрии. Исследование фотоотклика таких структур с различной длиной волновода (от 100 мкм до 2 мм) позволило рассчитать модальный показатель поглощения.

Было обнаружено, что в спектрах фотоотклика присутствуют пики поглощения на «основном» (1060 нм) и «возбужденном» (980 нм) состояниях. При этом, в структуре с одним слоем КЯТ наблюдается сильная ТЕ-поляризация основного состояния и практически отсутствует поляризация возбужденного состояния, что говорит о сходстве энергетической структуры квантовых яма-точек с состояниями легкой и тяжелой дырки в квантовой яме, а не в квантовых точках.

Зависимости fotocувствительности образцов от длины волновода для длин волн 960 и 1060 нм были аппроксимированы аналитическим выражением для величины поглощенной доли интенсивности излучения на основе закона Бугера, что позволило оценить величину модального показателя поглощения КЯТ как 90 и 110 см⁻¹ для основного и возбужденного состояний, соответственно. Справедливость такого подхода подтверждается нечувствительностью вида полученных зависимостей фотоотклика к варьированию интенсивности падающего света, что свидетельствует об отсутствии эффектов насыщения в образцах, работающих в фотогальваническом режиме. Значения модального показателя поглощения соответствуют предельно достижимым значениям модального усиления в таких структурах. При этом полученные величины значительно превосходят таковые для массивов КТ – 6-10 см⁻¹ [4].

Полученные данные о структуре энергетических состояний в КЯТ и предельно достижимого модального усиления могут быть полезны при проектировании приборов на их основе.

Список литературы

1. Kalyuzhnyy N.A. et al. // Electron. Lett. 2015. Vol. 51, № 20. P. 1602– 1604.
2. Maximov M. V. et al // Appl. Sci. 2020, Vol.10, P.1038;
3. Mintairov S. A. et al. //Semiconductors. 2018. Vol.. 52. – №. 10. – P. 1249-1254.
4. Maximov M. V. et al. // Semicond. Sci. Technol. 2008. Vol. 23, P. 105004

Двухспектральные фотодиоды на основе ГС с фоточувствительными слоями из твердых растворов InAsSb для средней ИК области спектра ($\lambda=3-5$ мкм)

Климов А. А.¹, Кунков Р.Э.¹, Лебедева Н.М.¹, Лухмырина Т.С.¹, Матвеев Б.А.¹, Ременный М.А.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ООО «ИоффеЛЕД»

e-mail: a.klimov@mail.ioffe.ru

Фотоприемники, работающие в средней ИК области спектра (3-5 мкм), являются ключевыми элементами многих приборов и систем, в частности: систем дистанционного зондирования Земли, диагностики состояния природных и техногенных систем, раннего обнаружения чрезвычайных ситуаций и экологического мониторинга, приборов пирометрического и газового анализа, капнографии [1]. Использование двухспектральных приемников для дистанционного определения температуры нагретых объектов в пирометрии, получения картины распределения температуры в инфракрасной термографии, позволяет снизить погрешности измерений, связанные с неточностью используемых значений излучательной способности измеряемого объекта, а также с влиянием оптических помех [2].

Для создания двухспектральных приемников, в которых фоточувствительные области находятся на одной оптической оси используется расположение дискретных фотоприемников «друг за другом», в том числе с использованием их иммерсионной стыковки друг с другом [3], а также выращивание гетероструктур с последовательным расположением фоточувствительных слоев [4].

Использование твердых растворов InAsSb в гетероструктурах с *p-n*-переходом является одним из наиболее перспективных направлений для создания фотоприемников для средней ИК области спектра, что связано с металлургической стабильностью материалов A^3B^5 , доступностью подложек для их роста, а также с достигнутыми высокими параметрами фоточувствительности, не уступающими параметрам лучших фотоприемников на основе материалов КРТ [5].

Данная работа посвящена созданию высокоэффективных двухспектральных фотодиодных фотоприемников на основе материалов A^3B^5 с длинноволновыми границами чувствительности 4 и 5 мкм в каждом из каналов, в которых требуемый диапазон спектральной чувствительности достигается за счет использования фоточувствительной области на основе твердых растворов InAsSb_x в диапазоне составов $x \leq 0.2$. При этом достижение предельных значений обнаружительной способности и широкого спектрального отклика обеспечиваются за счет использования двойных гетроструктур N-InAsSbP/n-InAsSb_x/P-InAsSbP, освещаемых со стороны подложки и стыковки чипа фотоприемника с иммерсионной линзой. Ранее, мы сообщали о получении двухспектральных фоточувствительных структур для средней ИК области спектра [6, 7]. В данной работе рассматриваются свойства указанных выше двухспектральных фотоприемников, а также обсуждаются особенности постростовой обработки, включающие комбинирование «сухого» плазмохимического и «мокрого» травлений для получения заданной геометрии чипа.

Работа, выполненная в ООО «ИоффеЛЕД», поддержана проектом ФЦП (ID: RFMEFI57618X0104).

Список литературы

1. Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, «Светодиоды средневолнового ИК диапазона на основе гетероструктур A^3B^5 в газоаналитическом приборостроении. Возможности и применения 2014-2018», Оптика и спектроскопия, 2019, том 127, вып. 2, 300 – 305.
2. Galina Yu.Sotnikova et al., “ A^3B^5 photodiode sensors for low-temperature pyrometry”, Proc of SPIE Vol. 8073, 80731A
3. Сотникова Г.Ю. и др., «InAs – InAsSb двухспектральные фотодиодные сенсоры для низкотемпературной пирометрии», труды 24-ой Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, стр.155-159 (2016)
4. E. R. Blazejewski, J. M. Arias, G. M. Williams, W. Mclevige, M. Zandian and J. Pasko, “Bias-switchable dual-band HgCdTe infrared photodetector”, J. Vac. Sci. Technol. B10, 1626 (1992)
5. A. Rogalski, M. Kopytko, P. Martyniuk, “Antimonide-based Infrared Detectors: A New Perspective”, SPIE PRESS, 2017
6. Р. Э. Кунков и др., “Двухспектральные “флип-чип” фотоприемники на основе ГС P-InAsSbP/n-InAsSbP/P-InAsSbP/n-InAs ($\lambda_{\max}=3.3, 4.0$ мкм 300 К)”. Тезисы докладов 21-й Всероссийской молодежной конференции “Физика полупроводников и наноструктур, Полупроводниковая опто- и наноэлектроника”, СПб, 2019, с. 110.
7. А.А. Климов и др., “Двухспектральные фотоприемники на основе ДГС N-InAsSbP/n-InAs(Sb)/N-InAsSbP ($\lambda_{\max}=3.3, 4.0$ мкм 300 К)”. Тезисы докладов 21-й Всероссийской молодежной конференции “Физика полупроводников и наноструктур, Полупроводниковая опто- и наноэлектроника”, СПб, 2019, с. 110

Быстродействующие фотодиоды для регистрации инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 0.9 – 1.85 мкм

Пивоварова А.А.¹, Куницына Е.В.¹, Андреев И.А.¹, Ильинская Н.Д.¹, Яковлев Ю.П.¹,
Коновалов Г.Г.¹, Иванов Э.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: pivovarova.antonina@gmail.com

В настоящее время для развития единой системы обработки и передачи информации, волоконных телекоммуникационных систем, для лазерной дальнометрии и локации наиболее важными являются длины волн 1.3 и 1.55 мкм. Для данных длин волн разработаны различные полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур InGaAsP/InP [1], AlGaInAs/InP [2], а также на основе относительно новых перспективных материалов GaInNAs и GaInNAsSb [3]. Создание быстродействующих фотоприемников для регистрации излучения в ближней инфракрасной (ИК) области спектра по-прежнему остается актуальной научно-технической задачей.

Нами были созданы быстродействующие фотодиоды на основе GaSb/GaSb/GaAlAsSb гетероструктур и рассмотрена возможность их применения для регистрации лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне.

Фотодиодные гетероструктуры n-GaSb/n-GaSb/p-GaAlAsSb выращивались методом жидкофазной эпитаксии. Концентрация носителей заряда в активной области GaSb была снижена почти на 2 порядка величины (от $n=(2-3)\times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до $n=2\times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) за счет использования свинца в качестве нейтрального растворителя в сочетании с легированием Te. На основе выращенных гетероструктур методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы фотодиодные чипы. Они имели мезу в форме несферической капли с точечным контактом, диаметр фоточувствительной площадки составлял 300 мкм.

Фотодиоды при комнатной температуре демонстрировали спектральную чувствительность в диапазоне от 0.9 мкм до 1.85 мкм с максимумом в области 1.3–1.7 мкм. Были проведены исследования электролюминесцентных характеристик созданных фотодиодов. Спектры излучения при $T=300 \text{ К}$ состояли из двух полос. Основная полоса излучения с максимумом интенсивности при $\lambda=1.72 \text{ мкм}$ соответствует межзонной излучательной рекомбинации в активной области GaSb ($E_g=0.72 \text{ эВ}$). Интенсивность второго пика $\lambda=1.94 \text{ мкм}$ (энергия фотона 0.64 эВ) не зависит от концентрации Te и предположительно определяется участием в генерации излучения двухзарядных акцепторов, образующихся при размещении Ga в узлах Sb кристаллической решетки.

Исследование вольт-фарадных характеристик показало, что емкость фотодиода составляет 65–70 пФ. Емкость является величиной, определяющей быстродействие фотодиода. Поскольку гетерограница GaSb/GaAlAsSb практически совпадает с положением p-n-перехода и носители сразу разделяются электрическим полем, время отклика определяется только RC-компонентой. Быстродействие фотодиодов измерялось при помощи InGaAsP/InP лазера с длиной волны $\lambda=1.55 \text{ мкм}$, длительность импульса 300 нс. Измеренное время нарастания и спада импульса составляло 40–60 нс.

Показано, что созданные быстродействующие GaSb/GaSb/GaAlAsSb фотодиоды могут использоваться для регистрации лазерного излучения в ближней ИК области спектра.

Список литературы

1. G. Belenky, L. Shterengas Trends in semiconductor laser design: Balance between leakage, gain and loss in InGaAsP/InP MQW structures. In: Handbook of Nanophysics: Nanoelectronics and Nanophotonics. Klaus D. Sattler (N. Y., McGraw Hill, 2011).
2. А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, П.В. Горлачук, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин, Полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры со сверхузкими волноводами, Квантовая электроника, 47 (3) 272 (2017).
3. J.W. Ferguson, P. Blood, P.M. Smowton, H. Bae, T. Sarmiento, J.S. Harris, N. Tansu., L.J. Mawst. Optical Gain in GaInNAs and GaInNAsSb Quantum Wells. IEEE Journal of quantum electronics, 47 (6), 870 (2011).

Реализация магнитного резонанса с использованием вертикально-излучающих лазеров с внутрирезонаторными контактами и ромбовидной токовой апертурой для магнитоэнцефалографических систем

Бобров М. А.¹, Блохин С.А.¹, Малеев Н.А.¹, Блохин А.А.², Васильев А.П.², Кузьменков А.Г.², Пазгалев А.С.¹, Петренко М.В.¹, Дмитриев С.П.¹, Вершовский А.К.¹, Устинов В.М.², Новиков И.И.³, Карачинский Л.Я.³

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² НТЦ Микроэлектроники РАН

³ ООО «Коннектор Оптикс»

e-mail: largaseal@gmail.com

Традиционные системы магнитоэнцефалографии головного мозга (МЭГ), использующие сверхпроводящие квантовые интерферометры (SQUID), требуют охлаждения до температур жидкого гелия и фиксированной формы шлема для исследований, что ведет к громоздкости и падению пространственного разрешения системы. Недавно продемонстрирован альтернативный вариант МЭГ, не требующий охлаждения и неподвижного положения пациента, в котором используются коммерчески доступные оптически накачиваемые атомные магнитометры (АМ), работающие в режиме, свободном от спинобменного уширения (SERF) и обладающие чувствительностью $10 \text{ фТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ в полосе частот $1 - 130 \text{ Гц}$ [1]. Используемые компактные АМ фирмы QuSpin Inc. (USA) реализованы в однолучевой M_z схеме с лазерной накачкой и нагретой до 150°C миниатюрной газовой ячейки ($3 \times 3 \times 3 \text{ мм}^3$) с парами ^{87}Rb . В качестве источника излучения использованы вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ). Недостатками АМ в режиме SERF при использовании в МЭГ являются необходимость обеспечения сверхслабого однородного магнитного поля (единицы нТс) и сильное взаимное влияние находящихся рядом датчиков. Недавно была продемонстрирована возможность получения сравнимой чувствительности АМ при использовании эффекта сужения линии магнитного резонанса при высокой мощности оптической накачки и больших концентрациях щелочных атомов в ненулевых магнитных полях в двухлучевой M_x схеме [2]. В экспериментах использовалась накачка лазерами с внешним резонатором и компактной газовой ячейкой (0.5 см^3) с парами ^{133}Cs .

Для реализации АМ необходимы лазерные источники с возможностью прецизионной настройки на используемую спектральную линию длину волны, одномодовым излучением с узким спектром (менее 100 МГц) и фиксированным направлением поляризации. Использование разработанной ранее конструкции ВИЛ с внутрирезонаторными контактами и ромбовидной селективно окисленной токовой апертурой (ВК-ВИЛ) [3] позволило создать ВК-ВИЛ спектрального диапазона 894 нм с выходной оптической мощностью лазера более 1 мВт , частотой эффективной модуляции более 5 ГГц , шириной линии излучения менее 60 МГц в рабочем диапазоне токов при температуре $65-75^\circ\text{C}$ [4]. В настоящей работе исследована возможность использования ВК-ВИЛ для возбуждения магнитного резонанса в нагретой до температуры 85°C кубической ($5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$) газовой ячейке с парами ^{133}Cs и азота (N_2) под давлением 100 торр . Измерения производились в постоянном магнитном поле 12.0 мкТс . Были получены сигналы магнитного резонанса с характерной шириной $\text{FWHM}=0.58 \text{ кГц}$ и отношением сигнал/шум 5×10^6 , что сравнимо с параметрами, достигнутыми при использовании полупроводниковых лазеров с внешними резонаторами. Разработанные ВК-ВИЛ потенциально пригодны для применения в компактных АМ для МЭГ-систем. Следует отметить, что при использовании разработанных ВК-ВИЛ

в отличие от лазеров с внешними резонаторами, не потребуются распределение излучения накачки по оптическим волокнам с сохранением поляризации, а сниженная по сравнению с компактными АМ на ячейках с парами Rb рабочая температура позволит снизить расстояние от чувствительного элемента до объекта исследований и поднять разрешающую способность системы.

Список литературы

1. Boto E. et al., Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system, *Nature* 555, 657–661, 2018
2. Ossadtchi A.E. et al., Towards magnetoencephalography based on ultrasensitive laser pumped non-zero field magnetic sensor, *Proceedings of 18th International Conference Laser Optics (ICLO) (St. Petersburg, Russia, 4-8 June 2018)* pp. 543
3. Bobrov M.A. et al., Mechanism of the polarization control in intracavity-contacted VCSEL with rhomboidal oxide current aperture, *Journal of Physics: Conference Series* 741(1), 012078, 2016
4. Blokhin S.A. et al., Vertical-cavity surface-emitting lasers with intracavity contacts and a rhomboidal current aperture for compact atomic clocks, *Quantum Electronics* 49(2), 187, 2019

Гибкие мембраны n-/p-GaP нитевидных нанокристаллов в матрице модифицированных силиконов с прозрачным электродом из одностенных углеродных нанотрубок

Кочетков Ф.М.¹, Неплох В.В.¹, Федоров В.В.¹, Большаков А.Д.¹, Цырлин Г.Э.¹, Исламова Р.М.², Мухин И.С.¹

¹СПБАУ РАН

²СПБГУ

e-mail: azemerat@rambler.ru

Привлекательные свойства органических светоизлучающих диодов (OLED), такие как относительно простое и недорогое изготовление, а также достаточно эффективная электролюминесценция (EL) позволили отрасли на основе OLED завоевать рынок. Однако органические материалы отстают от неорганических материалов по стабильности и внешней квантовой эффективности EL в оптическом диапазоне. Технологию тонких пленок неорганических материалов трудно адаптировать для небольших экранов с высоким разрешением из-за необходимости применения сложных постростовых методов или комбинации очень разных кристаллических материалов. Изготовление гибких устройств на основе тонких пленок накладывает еще большие сложности, т. е. сверхтонкую эпитаксию на подложках или высвобождение синтезированного материала с подложек.

В данной работе предложены новые химические и механические материалы и технологии для формирования мембран на основе массивов полупроводниковых A^3B^5 нитевидных нанокристаллов (NW) в матрице силиконовых полимеров и изготовления оптоэлектронных устройств. Синтезированные молекулярно-пучковой эпитаксией n-, p- и i-GaP NW были методом центрифугирования инкапсулированы в модифицированный винильными группами полидиметилсилоксан и отделены от ростовой подложки. К полученным мембранам были созданы электроды из различных материалов, включая одностенные

углеродные нанотрубки, ферроцинилсодержащий полиметилгидросилоксан с добавлением многостенных углеродных нанотрубок и без них. Электрический контакт изготовленных мембран был проверен методом спектроскопии тока, наведенного электронным лучом (EBIC). Разработанные методы и материалы могут быть использованы для создания высококачественных гибких неорганических оптоэлектронных устройств.

Авторы работы выражают благодарность за финансовую поддержку РФФИ в рамках проекта №19-32-60040 "Перспектива".

Номер проекта РФФИ: №19-32-60040

Система визуального контроля и передача данных по технологии Li-Fi для пациентов в вегетативном состоянии и состоянии минимального сознания

Дегтярева С.А.¹, Бугров В.Е.¹, Смирнова И.Г.¹, Полухин И.С.¹,
Андреев Ю.С.¹, Кондратьева Е.А.²

¹Университет ИТМО

²РНХИ им. проф. А. Л. Поленова

e-mail: s.degtiareva94@gmail.com

В силу развития высоких технологий появляется необходимость использовать компьютерные системы для поддержки все более сложных видов человеческой деятельности. Это обеспечивает высокую точность и скорость проведения различных исследований и медицинских осмотров. Учитывая ежедневную загрузку врачей отделения интенсивной терапии, во многих лечебно-диагностических центрах внедряются дистанционные системы медицинской диагностики в целях прогнозирования течения заболеваний. Так как принятие решений является результатом обработки определенной информации, его истории болезни и базируется на использовании накопленных знаний, можно сделать вывод, что автоматизированные и визуальные системы контроля способны облегчить процесс восприятия информации и сделать процесс диагностики более точным, дополнив ее автоматизированной составляющей и объектом визуального контроля. Цель работы – разработка опико-электронной системы визуального контроля и передачи данных пациентов в коме по видимому свету.

Применение технологии Li-Fi в системе медицинской диагностики

Большая перспектива применения беспроводной передачи данных по видимому свету находится во многих направлениях, одно из них — медицинская практика. Принцип работы Li-Fi (Light Fidelity) заключается в изменении интенсивности света светодиодных источников с очень высокой скоростью, который не заметен человеческому глазу. В настоящее время скорость передачи по данной технологии составляет 10 Гбит/с с использованием различных видов модуляции [1-3]. Актуальность технологии Li-Fi как метода передачи данных в медицине объясняется отсутствием влияния электромагнитных помех на передачу информации. Внедрение беспроводной передачи данных от сенсоров, установленных на теле пациента, к медицинскому оборудованию могло бы решить достаточно серьезную проблему с большим количеством проводов во время проведения операции или других процедур. Технология Li-Fi не использует радиочастотный спектр и может использоваться там, где Wi-Fi недоступен. Еще одно важное преимущество технологии –

высокая защищенность: световой сигнал не проникает через стены, а значит его невозможно перехватить. В то же время предъявляются высокие требования к системам передачи больших объемов данных, таким показателям как скорость обработки и последующая обработка сигналов на мобильных или иных устройствах, служащих в качестве приемника.

Системы мониторинга помогают быстрее получить необходимую информацию о пациенте и следить за изменениями состояния больного во время лечения, что актуально для мониторинга состояния больных в реанимации и палатах интенсивной терапии. В таком случае функция передачи данных по видимому свету обеспечивала бы своевременное получения данных, содержащих сведения о пациенте. В работе рассматривается система визуального контроля и передачи данных с симплексной связью монитор – Li-Fi модуль с адаптивной цветностью излучения (текущее предложение – на основе одеяла) для непрерывного мониторинга основных параметров жизнедеятельности. Мониторы позволяют следить за электрокардиограммой, частотой пульса, дыхания, температурой различных участков тела, артериальным и венозным давлением и т. д. Современные модели информируют об отклонении данных показателей в ограниченном пространстве. На данный момент модуль работает от сети 220 вольт и визуализирует три параметра: частотно-сердечное сокращение, температуру тела, давление (определяются функциями конкретного монитора). Одеяло на основе встроенных RGB лент подключается к прикроватному монитору посредством разработанного кабеля, получает данные по протоколу RS232, визуализирует полученные данные в виде цвета и в случае отклонения передает их по видимому свету во внешнюю сеть на фотоприемник.

В работе проведен процесс прототипирования и первичное апробация макета в лабораторных условиях. Работа выполнена в сотрудничестве с отделением анестезиологии и реаниматологии Российского научно-исследовательского нейрохирургического института имени профессора А.Л. Поленова.

Список литературы

1. Mengjie Zhang, Meng Shi, Fumin Wang, Jiaqi Zhao, Yingjun Zhou, Zhixin Wang, and Nan Chi "4.05-Gb/s RGB LED-based VLC System Utilizing PS-Manchester Coded Nyquist PAM-8 Modulation and Hybrid Time-frequency Domain Equalization", 2017
2. Svilen Dimitrov, Harald Haas "Principle of LED Light Communications", 2015
3. Mohamed Sufyan Islim, Ricardo X. Ferreira, Xiangyu He, Enyuan Xie, Stefan Videv, Shaun Viola, Scott Watson, Nikolaos Bamiedakis, Richard V. Penty, Ian H. White, Anthony E. Kelly, Erdan Gu, Harald Haas, and Martin D. Dawson "Towards 10 Gb/s orthogonal frequency divisionmultiplexing-based visible light communicationusing a GaN violet micro-LED", 2017
4. C. Chatelle, D. Lesenfants, Q. Noirhomme "Electrophysiology in Disorders and Consciousness: from conventional EEG visual analysis to brain computer interfaces"

Изменение профиля распределения концентрации дефектов по площади светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур в процессе токовых испытаний

Фролов И.В.^{1,2}, Радаев О.А.¹, Сергеев В.А.^{1,2}

¹УФирЭ им. В.А.Котельникова РАН

²УлГТУ

e-mail: ilya-frolov88@mail.ru

Представлен способ измерения профиля распределения концентрации дефектов по площади кристалла светодиода [1]. В основе способа измерения лежит общепринятая ABC модель рекомбинации носителей заряда в гетероструктуре светодиода, устанавливающая связь внутреннего квантового выхода излучения светодиода с концентрацией носителей заряда в активной области через рекомбинационные коэффициенты: коэффициент А безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла, прямо пропорциональный концентрации дефектов N_T в светоизлучающей гетероструктуре, коэффициент излучательной рекомбинации В и коэффициент безызлучательной Оже-рекомбинации С. Способ основан на измерении профиля распределения яркости излучения и граничных частот модуляции электролюминесценции светодиода по площади кристалла светодиода при двух малых значениях импульсного тока со скважностью 2 [2]. Регистрация профиля распределения яркости излучения проводится цифровой КМОП камерой в режиме накопления сигнала при частоте следования импульсов тока 1 кГц. Измерение граничной частоты модуляции светодиода производится по спаду яркости пикселей изображения, полученных с цифровой камеры, в 1.19 раз при увеличении частоты импульсов тока светодиода.

Проведено исследование изменения профиля распределения концентрации дефектов N_T по площади кристалла светодиода при испытаниях под действием импульсного тока. Исследованы коммерческие зеленые и синие InGaN светодиодов производства Oasistek с размерами кристалла 200×130 мкм, максимальной плотностью постоянного тока 95 А/см², центральной длиной волны спектра излучения 525 и 468 нм соответственно. Измерение профиля распределения концентрации дефектов выполнено с пространственным разрешением 0,65 мкм. Определено, что исследованные светодиоды имеют неоднородный профиль распределения N_T . Среднее значение N_T составило $3,2 \cdot 10^{13}$ см⁻³ для зеленых светодиодов и $1,8 \cdot 10^{13}$ см⁻³ для синих светодиодов.

Испытания светодиодов проводились в течение 500 ч при следующих значениях импульсов тока: амплитудное значение плотности тока 300 А/см², длительность импульса 100 мкс, период 10 мс. У зеленых светодиодов контролируемый спад внешней квантовой эффективности наблюдался через 150 ч испытаний, у синих – после 500 ч. Определено, что процесс деградации светодиодов сопровождается неравномерным увеличением плотности дефектов в различных областях кристалла, при этом происходит увеличение площади областей кристалла с повышенным значением N_T .

Полученные результаты качественно подтверждают математическую модель, устанавливающую связь между площадью светоизлучающей InGaN/GaN гетероструктуры с повышенным значением N_T и параметрами ватт-амперной характеристики светодиода [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00562 А.

Список литературы

1. И. В. Фролов, О. А. Радаев, А. А. Гавриков, В. А. Сергеев, О связи локальных параметров электролюминесценции зеленых InGaN светодиодов с параметрами вольт-амперных и шумовых характеристик в диапазоне токов начала свечения, Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 10, 2019.
2. Frolov I. V., Radaev O. A., Sergeev V. A., Measurement and analysis of the recombination coefficients distribution on the area of light-emitting InGaN/GaN heterostructures, Journal of Physics: Conference Series, 1410, 012092, 2019.
3. Ходаков А. М., Сергеев В. А., Фролов И. В., Влияние неоднородности распределения дефектов в структуре InGaN/GaN светодиода на оптическую мощность излучения, Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – С. 54–58.

 Номер проекта РФФИ: 19-07-00562 А

Низкоплотные InAs квантовые точки для применения в источниках однофотонного излучения спектрального диапазона 1.3 мкм

Блохин С.А.¹, Блохин А.А.¹, Бобров М.А.¹, Малеев Н.А.¹, Васильев А.П.², Кузьменков А.Г.², Устинов В.М.²

¹НТЦ Микроэлектроники РАН

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: blokh@mail.ioffe.ru

В последние годы растет интерес к источникам однофотонного излучения для систем квантовой криптографии и линейных оптических квантовых вычислений. В отличие от источников однофотонного излучения на основе лазеров с ослабленной мощностью излучения, полупроводниковые квантовые точки (КТ) потенциально пригодны для контролируемого излучения одиночных фотонов благодаря нульмерному ограничению носителей и квантованию уровней. Подавляющая часть работ сосредоточена на InGaAs КТ, излучающих в спектральном диапазоне 900-1000 нм, тогда как развитие источников однофотонного излучения телекоммуникационного диапазона на основе InAs КТ все еще находится в зачаточном состоянии [1]. Дело в том, что для создания таких источников однофотонного излучения одновременно необходимы низкая поверхностная плотность КТ и длинноволновое излучение при криогенных температурах [2-3]. В этой связи решение проблемы получения низкоплотных InAs/InGaAs КТ спектрального диапазона 1.3 мкм представляется крайне важной задачей.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по отработке режимов роста структур с низкоплотными КТ спектрального диапазона 1.3 мкм на установке молекулярно-пучковой эпитаксии Riber Compact 21, включая оптимизацию скорости осаждения InAs, температуры подложки и потока As, а также наклона и скорости вращения образца, с целью снижения поверхностной плотности КТ и длинноволнового смещения полосы излучения КТ. При стандартных условиях роста КТ уменьшение потока адатомов In только за счет снижения скорости роста InAs приводит к улучшению однородности массива КТ, но не оказывает существенного влияния на его поверхностную плотность.

Дополнительное повышение температуры роста ведет к увеличению поверхностной миграции адатомов In и позволяет снизить поверхностную плотность КТ до уровня несколько единиц 10^9 КТ/см². При переходе от использования мышьяка As₄ к мышьяку As₂ и одновременном снижении его потока наблюдается усиление поверхностной миграции адатомов In и дополнительное снижение поверхностной плотности КТ до уровня $\sim 1 \cdot 10^9$ КТ/см². Остановка вращения и изменение угла наклона образца относительно диаграммы направленности эффузионной ячейки In ведет к образованию градиента поверхностной плотности КТ, что открывает возможность локального снижения плотности КТ до уровня несколько единиц 10^8 КТ/см². Для сдвига длины волны излучения КТ в область 1.3 мкм при криогенной температуре низкоплотный массив КТ зарощивался слоем InGaAs при температуре осаждения КТ (чтобы избежать десорбции адатомов In и перемешивания с адатомами Ga) с последующим зарощиванием GaAs.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-52-12006 ННИО_a.

Список литературы

1. Michler P., Quantum Dots for Quantum Information Technologies, Springer 2017
2. Alloing B. et al., Structural and optical properties of low-density and In-rich quantum dots, Journal of Applied Physics 101 (2), 024918, 2007
3. Trevisi G. et al., Low density InAs/(In)GaAs quantum dots emitting at long wavelengths, Nanotechnology 20 (41), 415607, 2009

Номер проекта РФФИ: 20-52-12006 ННИО_a

Вертикально-излучающий лазер спектрального диапазона 1.55 мкм, изготовленный методом спекания пластин, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

Рочас С.С.¹, Блохин С.А.², Бобров М.А.², Блохин А.А.², Малеев Н.А.², Гладышев А.Г.³, Новиков И.И.³, Карачинский Л.Я.³, Егоров А.Ю.¹

¹Университет ИТМО

²ФТИ

³ООО Коннектор Оптикс

e-mail: stanislav_rochas@itmo.ru

В последние годы наблюдается заметный интерес к вертикально-излучающим лазерам (ВИЛ) спектрального диапазона 1.55 мкм – перспективным лазерным источникам для информационно-телекоммуникационных систем связи и различных устройств радиофотоники. Для преодоления ряда фундаментальных ограничений, присущих монолитной конструкции InAlGaAsP/InP ВИЛ, предложены гибридные конструкции ВИЛ с инжекцией носителей через внутррезонаторные контактные слои n-InP и зарощенный туннельный переход в сочетании с распределенными брэгговскими отражателями (РБО), обладающие одновременно высокой теплопроводностью и отражательной способностью [1]. Один из подходов основан на двукратном спекании гетероструктуры активной области InAlGaAs/InP с гетероструктурами AlGaAs/GaAs РБО, что позволяет объединить преимущества обеих систем материалов [2]. Для минимизации поглощения света и потерь на

свободных носителях широко используется туннельный переход n^{++}/p^{++} -InAlGaAs/InAlGaAs. В большинстве работ по ВИЛ с зарощенным туннельным переходом используют метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМС), поскольку в технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) невозможно удалить окисел с поверхности InAlGaAs без применения in-situ систем подчистки поверхности пластин и, как следствие, обеспечить двумерный рост при зарощивании гетероструктуры активной области верхним внутрирезонаторным контактным слоем InP. В этой связи представляется актуальной задача разработки конструкции туннельного перехода, пригодной для реализации зарощенного туннельного перехода методом МПЭ без существенного изменения уровня внутренних оптических потерь.

В работе приведены результаты исследования характеристик InAlGaAsP/AlGaAs ВИЛ с туннельным переходом n^{++}/p^{++} -InAlGaAs/InAlGaAs (далее ВИЛ-1) и InAlGaAsP/AlGaAs ВИЛ (далее ВИЛ-2) с туннельным переходом $n^{++}/p^{++}/p^{++}$ -InGaAs/InGaAs/InAlGaAs. Базовая конструкция ВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм состоит из нижнего РБО на основе 35 пар GaAs/Al_{0.95}Ga_{0.05}As, оптического резонатора InAlGaAsP общей толщиной 2.5λ с туннельным переходом (расположенным в минимуме электромагнитного поля оптической моды резонатора) и активной областью на основе напряженных InGaAs/InAlGaAs квантовых ям, и верхнего РБО на основе 20.5 пар GaAs/Al_{0.92}Ga_{0.08}As. Исходные гетероструктуры активных областей и гетероструктуры РБО выращены методом МПЭ, а для зарощивания поверхностного рельефа в туннельном переходе для ВИЛ-1 и ВИЛ-2 использовались методы ГФЭМС и МПЭ, соответственно. Применение туннельного перехода n^{++}/p^{++} -InAlGaAs/InAlGaAs наряду с оптимизацией профиля легирования структуры позволило обеспечить низкий уровень внутренних оптических потерь и высокую эффективность токовой инжекции: менее 6.5 см⁻¹ и более 90% при 20°C, соответственно [3]. В результате ВИЛ-1 с размером мезы зарощенного туннельного перехода 7-8 мкм демонстрируют одномодовую лазерную генерацию с пороговым менее 1.5 мА и дифференциальной эффективностью ~0.48 Вт/А. В случае применения туннельного перехода $n^{++}/p^{++}/p^{++}$ -InGaAs/InGaAs/InAlGaAs благодаря эффекту Бурштейна-Мосса в n-InGaAs (коротковолновый сдвиг края межзонного поглощения света) удалось избежать существенного повышения внутренних оптических потерь в лазерах. В результате, ВИЛ-2 с размером мезы зарощенного туннельного перехода 8 мкм демонстрируют одномодовую лазерную генерацию с пороговым менее 2 мА и дифференциальной эффективностью ~0.46 Вт/А при сравнимом с ВИЛ-1 уровне потерь на вывод излучения. Следует отметить, что использование туннельного перехода $n^{++}/p^{++}/p^{++}$ -InGaAs/InGaAs/InAlGaAs вместо туннельного перехода n^{++}/p^{++} -InAlGaAs/InAlGaAs позволяет воспроизводимо синтезировать гетероструктуры для ВИЛ методом МПЭ без необходимости применения технологии ГФЭМС для зарощивания туннельного перехода.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект тематики научных исследований № 2019-1442.

Список литературы

1. R.Michalzik, VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface emitting Lasers, Springer-Verlag, 2013
2. A. Syrbu et al., 1.5-mW single-mode operation of wafer-fused 1550-nm VCSELs, IEEE Photon. Technol. Lett. 16 (5), 1230 (2004)
3. С.А. Блохин и др., Анализ внутренних оптических потерь вертикально-излучающего лазера спектрального диапазона 1.55 μ, сформированного методом спекания пластин, Оптика и спектроскопия, 127 (1), 145 (2019)

Исследование хаотической динамики спин-волнового оптоэлектронного генератора

Кондрашов А.В.¹, Устинов А.Б.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: avkondrashov@etu.ru

Интерес к исследованию методов генерации динамического хаоса объясняется возможностью использования его в качестве несущего колебания в телекоммуникационных [1, 2] и радиолокационных системах [3], генераторов случайных чисел [4], радиоосвещения [5], разработки новые методов шифрования изображений [6] и др.

Целью работы было экспериментальное исследование особенностей развития СВЧ динамического хаоса в спин-волновом оптоэлектронном генераторе при условии, что развитие хаоса обусловлено одновременно двумя видами нелинейности: оптической и спин-волновой.

Экспериментальный макет генератора состоял из двух частей: СВЧ тракта и оптоэлектронного тракта. Оптоэлектронная часть состояла из полупроводникового лазера, электрооптического модулятора Маха-Цендера и СВЧ фотодетектора. Сверхвысокочастотный тракт состоял из СВЧ усилителя, нелинейной спин-волновой линии задержки, переменного аттенуатора, направленного ответвителя и тройника смещения. Компоненты СВЧ-тракта соединялись СВЧ-кабелями. Нелинейная линия задержки была сконструирована на основе эпитаксиальной пленки железо-иттриевого граната толщиной 6.9 мкм. Намагниченность насыщения равнялась 1750 Гс. Пленка помещалась на антенны спиновых волн, расположенные на расстоянии 3 мм друг от друга. Пленка была намагничена до насыщения постоянным магнитным полем напряженностью 1244 Э. Поле было направлено по касательной к плоскости пленки, перпендикулярно направлению распространения спиновых волн. Такая ориентация поля позволяла возбуждать в пленке ЖИГ поверхностные спиновые волны.

В ходе эксперимента исследовался сценарий развития динамического хаоса при плавном увеличении коэффициента усиления кольца G , определяющего мощности сигнала, циркулирующего в цепи генератора. Исследование было проведено для разных значений напряжения смещения, которым осуществлялось управление рабочей точкой электрооптического модулятора. Изменение положения рабочей точки модулятора задавало пороговое значение мощности, при которой возникал нелинейный отклик модулятора.

Результаты показали, что в спин-волновых оптоэлектронных генераторах при плавном увеличении мощности циркулирующего сигнала последовательно возникает генерация монохроматического сигнала, затем периодического сигнала, хаотического сигнала и последовательности хаотических импульсов. При дальнейшем увеличении мощности, циркулирующей в цепи, наблюдается окно регулярной динамики и вновь развитие генерации хаотического сигнала. Описанный сценарий перехода не является «классическим» сценарием развития хаотической динамики, но имеет некоторые особенности, схожие как со сценариями развития динамического хаоса в спин-волновых кольцевых генераторах, так и в оптоэлектронных генераторах без спин-волновой линии задержки. Так, развитие генерации периодического сигнала при относительно малых значениях коэффициента усиления кольца, не наблюдавшейся в оптоэлектронном генераторе, говорит о развитии модуляционной неустойчивости спиновых волн, возникновение которой чаще всего позволяет наблюдать сценарий Рюэлля-Такенса. В то же время форма наблюдавшихся хаотических импульсов характерна для нелинейности электрооптического модулятора,

развитие которой обычно приводит к генерации хаоса через последовательность бифуркаций удвоения периода. Таким образом, анализ сценария развития хаотической динамики в спин-волновом оптоэлектронном кольцевом генераторе говорит об одновременном присутствии двух видов нелинейности, проявляющихся при разных значениях мощности сигнала циркулирующего в цепи генератора.

Экспериментальная часть работы была поддержана грантом Президента Российской Федерации для молодых ученых и докторов наук МК-2531.2019.8, численные исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. – 252 с.
2. Argyris A., et. al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links, *Nature*, vol 438, 343–346, 2005
3. Nijssure Y., Kaddoum G., Leung H. Cognitive chaotic UWB-MIMO radar based on nonparametric Bayesian technique, *IEEE Trans. Aero Electron. Syst.*, vol. 51, P. 2360–2378, 2015.
4. Akgul A., et. al. Chaos-based engineering applications with a 3D chaotic system without equilibrium points, vol. 84, P. 481–495, 2016.
5. Dmitriev A. S., et.al. Radio lighting based on ultrawideband dynamic chaos generators, *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 61, P 1259–1268, 2016.
6. Matthews R.A. The use of genetic algorithms in cryptanalysis, *Cryptologia*, vol. 17, P. 187–201, 1993.

Номер проекта РФФИ: 15-32-20357

Инжекционный источник однофотонного излучения спектрального диапазона 1.3 мкм на основе вертикального микрорезонатора с пассивным диэлектрическим резонатором

Кузьяменков А.Г.¹, Блохин С.А.², Бобров М.А.², Малеев Н.А.², Блохин А.А.¹, Васильев А.П.¹, Shchukin V.A.^{3,4}, Ledentsov N.N.⁴, Reitzenstein S.³, Устинов В.М.¹

¹НТЦ Микроэлектроники РАН

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³Technische Universität Berlin, Berlin, Germany

⁴VI Systems GmbH, Berlin, Germany

e-mail: Kuzmenkov@mail.ioffe.ru

В настоящее время развитие квантовых источников света на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) стало ключевым направлением исследований в нанопотонике. Однофотонное излучение можно использовать как носитель информации в системах квантовой криптографии и/или фотонных кубитов в квантовых вычислительных цепях [1]. Конструкция источника должна обеспечивать не только направленность однофотонного излучения, но и высокую эффективность вывода света из микрорезонатора. Для планарной структуры эффективность вывода излучения КТ не превышает 2%, однако формирование на поверхности микролинзы и применение нижнего распределенного брэгговского отражателя позволяет увеличить эффективность вывода излучения КТ до ~29% при

оптической накачке [2]. Применение фотонных наноантенн (нанопроволка с переменным сечением) позволяет поднять эффективность вывода излучения КТ до $\sim 72\%$ при оптической накачке, однако реализация инжекционных устройств представляется проблематичной [3]. В конструкции вертикального микрорезонатора удастся обеспечить высокую эффективность вывода излучения КТ как при оптической накачке ($\sim 74\%$ [4]), так и при инжекционной накачке ($\sim 61\%$ [5]). Однако большинство работ сфокусировано на коротковолновом спектральном диапазоне, тогда как эффективность вывода излучения КТ телекоммуникационного диапазона существенно ниже 40% [5-6]. В этой связи разработка конструкций эффективных инжекционных однофотонных излучателей телекоммуникационного диапазона является актуальной задачей.

В настоящей работе приведены результаты моделирования конструкций источника одиночных фотонов спектрального диапазона 1.3 мкм с инжекционной накачкой. В качестве базовой конструкции вертикального микрорезонатора взята геометрия пассивного диэлектрического микрорезонатора с нижним полупроводник-оксид и верхним диэлектрическим распределенными брэгговскими отражателями (РБО) с инжекцией носителей через внутриврезонаторные контакты. Активная область на основе низкоплотных InAs/InGaAs КТ спектрального диапазона 1.3 мкм расположена в сверхтонком слое, непосредственно окружённом слоями с низким показателем преломления. Таким образом, эффективный показатель преломления активной области оказывается ниже, чем средний показатель преломления многослойной структуры, и распространение излучаемого света в латеральной плоскости оказывается подавлено (т. н. антиволноводная конструкция). Благодаря высокому контрасту показателей преломления GaAs/AlGaO РБО обеспечивает эффективное отражения света практически во всем диапазоне углов падения и подавляет утечку излучения в подложку. Формирование микро-столбика диаметром 2 мкм в диэлектрической части структуры обеспечивает эффективность вывода излучения $\sim 65\%$ в числовой апертуре $NA=0.7$. Более того, создание дополнительной радиальной структуры из концентрических колец в верхнем РБО и введение токовой оксидной апертуры (для инжекционной накачки одиночной КТ) позволяет частично подавить латеральные потери света и повысить эффективность вывода излучения до $\sim 85\%$ для $NA=0.7$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-52-12006 ННИО_а.

Список литературы

1. Michler P., Quantum Dots for Quantum Information Technologies, Springer 2017
2. Schlehahn A. et al., Applied Physics Letters 107(4), 041105 (2015)
3. Claudon J. et al Nature Photonics 4, 174-177, 2010
4. Unsleber S. et al., Optics Express 24(8), 8539-8548, 2016
5. Unsleber S. et al., APL Photonics 1(1), 011301, 2016
6. Srocka N et al., AIP Advances 8, 085205 (2018)
7. Kim J–H et al., Optica 3, 577 (2016)

Природа температурного падения эффективности мощных синих InGaN/GaN светодиодов

Шабунина Е.И.¹, Шмидт Н.М.¹, Карташова А.П.¹, Закгейм А.Л.², Черняков А.Е.²,
Тальнишних Н.А.², Иванов А.Е.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ микроэлектроники РАН

e-mail: jenni-85@mail.ru

Эффект температурного падения внешней квантовой эффективности (ВКЭ) мощных синих InGaN/GaN светодиодов, наблюдаемый в широком диапазоне температур (15 – 450 К) и плотностей тока (10 – 1000 А/см²), изучается много лет, но до сих пор является предметом обсуждения [1-4]. Эти эффекты препятствуют повышению экономичности светодиодного освещения и ограничивают применение светодиодов при повышенных температурах. Ряд механизмов предложен для объяснения падения ВКЭ [1-4]. В рамках предложенных механизмов не находят объяснения отсутствие температурной зависимости ВКЭ, начиная с плотностей тока 30 А/см², и нарастающий спад ВКЭ с ростом уровня инжекции, в том числе при проведении измерений в импульсном режиме. Наименьшее количество работ посвящено изучению вклада делокализованных носителей в этот эффект.

Целью работы является выяснение вклада делокализованных носителей в температурное падение ВКЭ в широком интервале плотностей тока синих InGaN/GaN светодиодов, излучающих в спектральном диапазоне 450 – 460 нм, с максимальными значениями ВКЭ 45 – 50%.

Детальное исследование падения ВКЭ до очень высоких значений плотностей тока $J = 7$ кА/см² (в импульсном режиме при длительности импульсов 100 нс на частоте 50 Гц исключая саморазогрев) в диапазоне температур 100 – 450 К показало, что наиболее крутой участок падения ВКЭ наблюдается в диапазоне плотностей тока 30-500 А/см² и начало этого участка с хорошей точностью совпадает с напряжением открытия р-п перехода. При этом падение ВКЭ достигает двух раз, далее процесс замедляется и при $J > 3$ кА/см² практически достигает насыщения при низких абсолютных значениях ВКЭ 5 – 10%. Эти результаты находятся в хорошем соответствии с приведенными в публикациях [1-3]. Для анализа роли делокализованных носителей заряда в электролюминесценции InGaN/GaN светодиодов при низком (1 А/см²) и умеренном (30 А/см²) уровнях инжекции в диапазоне температур 50 – 420 К изучались спектры электролюминесценции, зависимости ВКЭ от плотности тока, а также профили распределения носителей при нулевом смещении при 300 и 400 К. Кроме того, анализировались распределения ВКЭ по длинам волн в диапазоне токов 0.2 – 1000 мА при 300 и 400 К. Анализ значений ВКЭ по длинам волн в указанном диапазоне токов при этих температурах показал, что при 300 К вид распределения при смещении в прямом направлении менее 2.76 В на фиксированной длине волны выявляет излучательную рекомбинацию локализованных носителей, а также проявление эффекта Штарка, что согласуется с положением максимума ВКЭ, наблюдаемого на зависимости ВКЭ от плотности тока. При 400 К картина распределения резко меняется: эффект Штарка не наблюдается, слабо выраженная излучательная рекомбинация локализованных носителей демонстрирует существенное уменьшение ВКЭ в максимуме. Ширина спектра на полувьсоте при 50 К с ростом уровня инжекции от 1 до 30 А/см² изменяется от 60 мэВ до 100 мэВ, а при 420 К при тех же уровнях инжекции всего на 10 мэВ от 130 до 140 мэВ. Эти данные позволяют предполагать участие локализованных и делокализованных носителей в излучательной рекомбинации. При этом роль последних растет со

смещением в прямом направлении с открытием р-п перехода, а при 400 К, согласно особенностям распределения пиковых значений ВКЭ по длинам волн, наблюдается термический выброс носителей из ямы. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о слабости локализирующего потенциала, что может быть обусловлено случайными флуктуациями состава твердого раствора. Таким образом, наблюдаемое отсутствие температурной зависимости ВКЭ и ее низкие значения при плотностях тока более 30 А/см^2 вызвано определяющей ролью делокализованных носителей и случайных флуктуаций состава твердого раствора. Падение ВКЭ синих светодиодов в импульсном режиме, достигающее насыщения при плотности тока 4 кА/см^2 , вызвано захватом делокализованных носителей дефектной системой в твердых растворах и в нитриде галлия.

Список литературы

1. Ryu H-Y., Ryu G-H., and Onwukaeme C., Efficiency droop and effective active volume in GaN-based light-emitting diodes grown on sapphire and silicon substrates, *Applied Science*, vol. 9, 4160, 2019.
2. De Santi C., Meneghini M., La Grassa M., Galler B., Zeisel R., Goano M., S. Dominici, Mandurrino M., Bertazzi F., Robidas D., Meneghesso G., and Zanoni E., Role of defects in the thermal droop of InGaN-based light emitting diodes, *Journal of Applied Physics*, vol. 119, 094501, 2016.
3. Titkov I. E., Karpov S. Yu., Yadav A., Zerova V. L., Zulonas M., Galler B., Strassburg M., Pietzonka I., Lugauer H-J., and Rafailov E. U., Temperature Dependent Internal Quantum Efficiency of Blue High-Brightness Light-Emitting Diodes, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 50(11), 911, 2014.
4. Olivier F., Daami A., Licitra C., and Templier F., Shockley-Read-Hall and Auger non-radiative recombination in GaN based LEDs: A size effect study, *Applied Physics Letters*, vol. 111, 022104, 2017.

Номер проекта РФФИ: 17-08-01000

Влияние облучения на вольт-амперные характеристики диодов Шоттки на основе нитрида галлия

Стрельчук А.М.¹, Роенков А.Д.¹, Козловский В.В.², Лебедев А.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: anatoly.strelchuk@mail.ioffe.ru

Определение радиационной стойкости полупроводниковых приборов является одной из наиболее актуальных задач полупроводниковой электроники и физики дефектов. Особенно важна данная задача для приборов на основе сравнительно новых широкозонных полупроводников.

В данной работе исследована чувствительность вольт-амперных характеристик диодов Шоттки на основе GaN n-типа проводимости к электронному облучению при энергии электронов 0.9 МэВ и дозах $(0,5 \div 1) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Использовались специально не легированные слои n-GaN, выращенные на сапфире методом HVPE. Уровень легирования слоя до облучения составлял $(1 \div 3) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Диоды Шоттки диаметром около 800 мкм изготовлены методом термического напыления золота. Контролировались прямые и обратные

вольт-амперные характеристики диодов на трех подложках. Последовательное дифференциальное сопротивление R_s в исходных и облученных диодах определялось из вольт-амперных характеристик при прямом смещении и максимальных измеряемых токах (10-20 мА) или напряжениях (10 В).

До облучения диоды характеризовались значительными 'утечками' как при прямом, так и при обратном смещении, вплоть до практически линейной в некоторых случаях вольт-амперной характеристики. Разброс последовательного дифференциального сопротивления R_s достигает в некоторых случаях почти порядка (например, от 60 до 440 Ом на одной из подложек).

Облучение диодов дозой 5×10^{15} см⁻² практически не изменяет прямую вольт-амперную характеристику. Облучение диодов дозой 1×10^{16} см⁻² несколько смещает прямую вольт-амперную характеристику в сторону больших напряжений. Данный эффект невелик и, учитывая значительный разброс R_s исходных диодов, может быть зафиксирован только при наблюдении за характеристиками конкретного диода. Оба отмеченных эффекта подтверждаются наблюдениями за изменениями вольт-амперных характеристик диодов на всех подложках и проявляются в характере изменения R_s с набором дозы, а именно, независимо от исходного сопротивления диода, при облучении дозой 5×10^{15} см⁻² R_s практически не изменяется, а при увеличении дозы начинается рост R_s . Характер изменения вольт-амперных характеристик диодов при обратном смещении в результате облучения качественно совпадает с характером изменения прямых вольт-амперных характеристик, а именно, облучение дозой 5×10^{15} см⁻² практически не меняет вольт-амперную характеристику, а при облучении дозой 1×10^{16} см⁻² вольт-амперная характеристика начинает смещаться в сторону больших обратных напряжений. Таким образом, можно сделать вывод, что достоверно регистрируемое изменение вольт-амперных характеристик исследуемых диодов Шоттки при облучении электронами с энергией 0,9 МэВ начинается при дозе 1×10^{16} см⁻². Если предположить, что увеличение дозы приведет к дальнейшему росту последовательного сопротивления диода, то дозу 1×10^{16} см⁻² можно (по аналогии с эффектом, наблюдающимся при облучении SiC диодов) назвать пороговой, характеризующей радиационную стойкость данного типа диодов (с легированием $\sim 10^{17}$ см⁻³) по такому критерию, как величина последовательного сопротивления диода.

Исследование перестройки частоты малощумящего многокольцевого спин-волнового оптоэлектронного генератора

Устинов А.Б.¹, Никитин А. А.¹, Кондрашов А.В.¹, Лебедев В.В.², Петров А.Н.², Шамрай А.В.², Калиникос Б.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: ustinov_rus@yahoo.com

В последние годы наблюдается повышенный интерес к исследованиям в области радиофотоники (или сверхвысокочастотной (СВЧ) оптоэлектроники). Актуальность таких исследований обусловлена возможностью разработки устройств с рекордными техническими параметрами. Одним из перспективных устройств радиофотоники является оптоэлектронный СВЧ генератор. Для реализации перестройки частоты в конструкции генератора используется перестраиваемый СВЧ фильтр [1, 2]. Основным недостатком

генераторов, сконструированных по однокольцевой схеме является наличие близко расположенных спектральных составляющих шумовой генерации, ослабленных относительно основной генерируемой гармоники на несколько десятков децибел. Использование многокольцевых схем позволяет ослабить боковые гармоники до -100 дБ.

Целью работы являлось исследование перестройки частоты генерации оптоэлектронного СВЧ генератора, в конструкции которого использовался планарный спин-волновой СВЧ фильтр [3-5]. Фильтр был изготовлен на пленке железо-иттриевого граната толщиной 5.7 мкм и намагниченностью насыщения 1750 Гс. Пленка находилась в однородном поле электромагнита. Для возбуждения и приема спиновых волн были использованы микрополосковые антенны шириной 50 мкм. Для проведения экспериментов в макете фильтра была предусмотрена возможность изменения расстояния между антеннами от 2 до 15 мм. Это позволяло изменять длину пробега спиновой волны в пленке ЖИГ и тем самым регулировать наклон фазочастотной характеристики фильтра. Для теоретического исследования особенностей перестройки частоты генерации была разработана модель генератора.

Результаты показали, что перестройка частоты генерации реализуется за счет изменения поля подмагничивания пленки. Скачкообразная перестройка происходила на величину порядка сотен кГц в зависимости от длины оптоволокна и расстояния между антеннами спиновых волн. Величину скачков можно было легко подстраивать путем изменения расстояния между антеннами. Кроме скачкообразной перестройки, в оптоэлектронном генераторе реализуется плавная перестройка частоты на величину порядка кГц.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Belkin M. E., Loparev A. V., Semenova Y., Farrell G., Sigov A. S., Tunable RF-band optoelectronic oscillator and optoelectronic computer-aided design model for its simulation. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53(11), 2474-2477, 2011.
2. Ustinov A. B., Kondrashov A. V., Nikitin A. A., Lebedev V. V., Petrov A. N., Shamrai A. V., & Kalinikos B. A., A tunable spin wave photonic generator with improved phase noise characteristics, *J. of Phys.: CS*, vol. 1326, 012015, 2019.
3. Ustinov A.B., Drozdovskii A.V., Nikitin A.A., Kalinikos B.A., Spin-wave band-pass filters based on yttrium iron garnet films for tunable microwave photonic oscillators, *J. of Phys.: CS*, vol. 661, 012058, 2015.
4. Геворкян В., Кочемасов В., Устинов А., Перестраиваемые по частоте СВЧ-фильтры на основе ферритовых материалов. Часть 1, *Компоненты и технологии*, 3(188), 76-81, 2017.
5. Геворкян В., Кочемасов В., Устинов А., Перестраиваемые по частоте СВЧ-фильтры на основе ферритовых материалов. Часть 2, *Компоненты и технологии*, 4(189), 25-32, 2017.

Исследование влияния температуры на концентрирующую способность линзы Френеля

Филимонов Е.Д.¹, Левина С.А., Шварц М.З.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: efilimonov@mail.ioffe.ru

В современных высокоэффективных фотоэлектрических модулях линзы Френеля используются в качестве основных оптических элементов концентрирования солнечного излучения. В зависимости от региона размещения солнечной электростанции, фотоэлектрические модули могут эксплуатироваться в режимах значительно меняющихся температур: температура окружающей среды может быть ниже нуля зимой и превышать 40 °С в летний период. Очевидно, что высокая солнечная радиация будет способствовать повышению температуры фотоэлектрических модулей еще больше. Влияние температуры на эффективность солнечных элементов является хорошо изучено, тогда как температурное поведение оптических характеристик линзы Френеля требует дополнительного исследования, прежде всего в части оценки реакции спектрального и энергетического распределений сфокусированного излучения на изменение температуры и, как следствие, влияние этого изменения на эффективность концентрирования солнечного излучения.

Концентраторы излучения типа линза Френеля обычно выполняются из мономатериала методом горячего прессования из полиметилметакрилата (ПММА) [1] или в виде комбинации типа «силикон на стекле» [2]. Увеличение температуры линзы при нагреве модуля приводит к тепловому расширению материала линзы (деформации материала линзы или поверхности) и к изменению (уменьшению) показателя преломления оптического материала. Основным следствием снижения значений показателя преломления является увеличение фокусного расстояния линзы, что приводит к увеличению размера фокального пятна в плоскости расположения солнечного элемента и пространственно-спектральному изменению распределения энергии сконцентрированного излучения.

В работе представлена методика моделирования температурных режимов работы линзы Френеля и оборудование для регистрации пространственно-спектрального распределения энергии сконцентрированного излучения при температурном воздействии, представлены результаты исследования линз Френеля. В основу методики измерений, предлагаемой в данной работе, положено прецизионное сканирование фокального пятна оптоволночным приёмником с диаметром входной апертуры 200 мкм, направляющим излучение к спектрометру. Исследуемая линза помещалась в оптическую термокамеру, обеспечивающую прецизионное управление тепловыми режимами и контроль температуры объекта испытаний. Получаемые «спектральные картины» позволили проследить динамику изменения профилей освещенности в строго выделенных спектральных диапазонах, соответствующих диапазонам чувствительности субэлементов многопереходного солнечного элемента, и определить степень снижения концентрирующей способности линзы Френеля.

Список литературы

1. В. Fassbender et al, «Reliability of PMMA for CPV lens applications», Materials Science Published, 2011, DOI:10.18086/swc.2011.03.04
2. M.Z.Shvarts et al, «Flat-plate fresnel lenses with improved concentrating capabilities: designing, manufacturing and testing», Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008 DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922751

Особенности спектров усиления гетероструктур с активной областью переходной размерности

Корнышов Г. О.¹, Гордеев Н.Ю.², Паюсов. А.С.², Серин А.А.², Шерняков Ю.М.², Минтаиров С.А.², Калюжный Н.А.², Максимов¹ М.В., Жуков¹ А.Е.

¹СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: supergrigoir@gmail.com

Наряду с уже давно известными гетероструктурами пониженной размерности, такими как квантовые ямы (КЯ) и квантовые точки (КТ), широко исследуются гетероструктуры переходной размерности. Мы предложили новый тип активной среды для полупроводниковых лазеров — InGaAs квантовые ямо-точки (КЯТ) [1, 2], которые морфологически представляют собой тонкую квантовую яму с неравномерным распределением концентрации индия в слое. Преимуществом такой активной области является высокий уровень усиления на слой, близкий к аналогичным показателям в КЯ. В то же время, подобно квантовым точкам упругие напряжения между такой активной областью и волноводом эффективно компенсируются, что позволяет создавать бездефектные структуры с множеством слоёв КЯТ, что было показано в предыдущих работах [3]. КЯТ были успешно использованы для создания солнечных элементов, микродисковых лазеров с рекордными характеристиками, а также торцевых лазеров высокой мощности. В торцевых лазерах, помимо высоких мощностей были достигнуты низкие величины внутренних оптических потерь $0,5 \text{ см}^{-1}$ [3]. Изучение особенностей усиления КЯТ позволит оптимизировать дизайн мощных лазеров и откроет возможности для разработки других приборов на их основе. Целью настоящей работы было изучение спектров усиления активной области на КЯТ методом Хакки-Паоли.

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложках GaAs была выращена лазерная гетероструктура. Активная область содержит один слой КЯТ номинальной толщиной 3 нм, расположенный в центре GaAs волноводного слоя толщиной 450 нм, вставленного между $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ эмиттерами. Из эпитаксиальных гетероструктур были изготовлены торцевые лазеры с шириной полоска 4 мкм различной длины от 100 до 2000 мкм. Длина волны излучения лазеров длиной 2 мм составляет 1080 нм.

Спектры модального усиления вычислялись по методу Хакки-Паоли из контраста мод Фабри-Перо спектров электролюминесценции лазеров с длиной резонатора от 100 до 200 мкм которые за счёт высоких выходных оптических потерь, работают в допороговом режиме. Контраст мод Фабри-Перо снижается за счёт инструментального контура спектрометра, теплового и токового дрейфов спектра излучения, поэтому вычисления по методу Хакки-Паоли дают заниженные значения усиления и по сути, определяют его нижнюю границу. В исследованной гетероструктуре усиление, определённое таким методом, составило 35 см^{-1} для одного слоя КЯТ. Для достижения максимального модального усиления активной области обычно используются многослойные структуры с КЯ. Рекордные значения такой активной области превышают 100 см^{-1} , однако усиление на слой составляет 5 см^{-1} [4]. Рекордным же значением для однослойной КЯ является 48 см^{-1} [5]. При анализе спектра усиления можно заметить, что в нём отсутствуют пики, соответствующие возбужденным уровням квантово-размерной структуры, а ширина спектра достигает 90 нм. В лазерах на многослойных КТ возможно получить ширину усиления больше 100 нм при генерации и с основного, и с возбужденного состояния, однако величина усиления в таких структурах невелика, порядка 10 см^{-1} [6]. Рекордное значение 41 см^{-1} было получено

для структуры с 10 слоями КТ [7]. Широкий спектр усиления необходим для таких приборов оптоэлектроники как перестраиваемые лазеры, многочастотные лазеры и суперлюминесцентные диоды. При плотностях тока, превышающих 7 кА/см^2 , в исследованной структуре наблюдается насыщение усиления в активной области, связанное с заполнением энергетических уровней КЯТ, и появление спонтанного излучения вблизи 900 нм, что соответствует излучению волноводного слоя GaAs.

В ходе работы впервые были проведены исследования спектра усиления КЯТ методом Хакки-Паоли. Показано, что активные области с КЯТ имеют высокое усиление на слой, сопоставимое с усилением в однослойной КЯ. Вместе с этим ширина спектра усиления лишь незначительно уступает ширине усиления многослойных структур с КТ. Таким образом в КЯТ возможно объединить преимущества обеих гетероструктур для создания полупроводниковых приборов.

Список литературы

1. S. A. Mintairov *et al.*, “Hybrid InGaAs quantum well-dots nanostructures for light-emitting and photo-voltaic applications,” *Nanotechnology*, vol. 26, no. 38, p. 385202, 2015
2. А.М. Надточий и др., “Лазеры на основе квантовых яма-точек, излучающие в оптических диапазонах 980 и 1080 nm”, *Письма в ЖТФ*, том 45, вып. 4, 2019
3. G. O. Kornyshev *et al.*, “High-power 0.98 μm range diode lasers based on InGaAs/GaAs quantum well-dot active region”, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1400 (2019)
4. F. Tanoue *et al.*, “High net modal gain ($>100 \text{ cm}^{-1}$) in 19-stacked InGaAs quantum dot laser diodes at 1000 nm wavelength band”, *OPTICS LETTERS*, Vol. 38, No. 13, 2013
5. A.P.Ongstad *et al.*, “Determination of carrier lifetimes using Hakki–Paoli gain data” *APPLIED PHYSICS LETTERS VOLUME 72, NUMBER 7*, 1998
6. Y. Li *et al.*, “Enhancing the 3-dB Bandwidth via the Gain-Lever Effect in Quantum-Dot Lasers”, *IEEE Photonics Journal*, Volume 2, Number 3, June 2010
7. M. V. Maximov *et al.*, “A 1.33 μm InAs/GaAs quantum dot laser with a 46 cm^{-1} modal gain”, *Semicond. Sci. Technol.* 23, 105004 (4pp), 2008

Номер проекта РФФИ: 18-02-01123 А

Метод низкокогерентной рефлектометрии для исследования микрокольцевых оптических резонаторов

Рябцев И.А.¹, Никитин А.А.¹, Кондрашов А.В.¹, Витько В.В.¹, Конкин Д.А.², Коколов А.А.², Бабак Л.И.², Устинов А.Б.¹, Калининос Б.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²ТУСУР

e-mail: ryabcev.ilya@gmail.com

Интегральные микрокольцевые оптические резонаторы получили широкое распространение в качестве ключевых компонентов активных и пассивных устройств радиофотоники [1, 2]. В свою очередь использование кольцевых резонаторов подразумевает предварительное исследование их параметров, таких как потери на распространение сигнала α , дисперсия волновода β , коэффициенты связи по мощности k . Следовательно, необходимы высокочувствительные и эффективные методы, которые дают прямой доступ к

параметрам оптического микрорезонатора. Среди существующих способов [3-5] все чаще выделяют использование современных методов рефлектометрии [6-8]. В настоящее время появились различные приборы такие, как, например, оптические рефлектометры обратного рассеяния, которые позволяют получать спектры исследуемых структур с высоким разрешением.

Цель данной работы заключается в определении рабочих параметров микрокольцевых интегрально-оптических резонаторов при помощи метода низкокогерентной рефлектометрии.

Исследуемый резонатор из кремния диаметром 256 мкм, изготовленный по технологии кремний на изоляторе, состоит из подводящего и отводящего прямых волноводов, и кольца прямоугольного поперечного сечения. Для ввода и вывода оптической мощности использовались брэгговские решетки. Измерение характеристик кольцевого резонатора проводилось с помощью рефлектометра модели LUNA OBR 4600. Зондирующий сигнал с рефлектометра подавался на входной порт резонатора при помощи оптического волокна SMF-28. Отраженный сигнал регистрировался рефлектометром.

Для расшифровки и обработки рефлектограмм был разработан алгоритм, позволяющий рассчитать искомые параметры кольцевого резонатора. Таким образом были получены: коэффициент связи по мощности $\kappa = 0.03636$, потери на распространение сигнала $\alpha = 12.773$ дБ/см, а также добротность $Q = 49516$. На заключительном этапе, были проведены прямые измерения добротности, которые показали хорошее согласование с результатами, полученными посредством метода низкокогерентной рефлектометрии.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Blumenthal D. J., Heideman R., Geuzebroeck D., Leinse A., and Roeloffzen C., Silicon nitride in silicon photonics, Proc. IEEE, Vol.106, №12, pp. 2209-2231, 2018;
2. Marpaung D., Yao J., and Capmany J., Integrated microwave photonics, Nat. Photonics, Vol. 13, №2, pp. 80-90, 2019;
3. Himel M. D., and Gibson U. J., Measurement of planar waveguide losses using a coherent fiber bundle, Appl. Opt., Vol. 25, №23, pp. 4413-4416, 1986;
4. Okamura Y., Yoshinaka S., and Yamamoto S., Measuring mode propagation losses of integrated optical waveguides: a simple method, Appl. Opt., Vol. 22, №23, pp. 3892-3894, 1983;
5. Barfuss H., and Brinkmeyer E., Modified optical frequency domain reflectometry with high spatial resolution for components of integrated optic systems, J. Light. Technol., Vol. 7, №1, pp. 3-10, 1989;
6. Gottesman Y., Rao E. V. K., and Rabus D. G., New methodology to evaluate the performance of ring resonators using optical low-coherence reflectometry, J. Light. Technol., Vol. 22, №6, pp. 1566-1572, 2004;
7. Zhang A. P., Guan Z. G., and He S., Optical low-coherence reflectometry based on long-period grating Mach-Zehnder interferometers, Appl. Opt., Vol. 45, №22, pp. 5733-5739, 2006;
8. Sanogo Y., Obaton A. F., Delezoide C., Lautru J., Lièvre M., Dubard J., and Nguyen C. T., Phase sensitive-optical low coherence interferometer: a new protocol to evaluate the performance of optical micro-resonators, J. Light. Technol, Vol. 31, №1, pp. 111-117, 2012.

Частотно-временной анализ акустических волн в интегральном акустооптическом модуляторе на кристалле LiNbO_3

Варламов А.В.¹, Иванов С.И.², Лавров А.П.², Шамрай А.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: IvanovSI-SPb@mail.ru

Акустооптические фильтры и переключатели, выполненные на XY-срезе кристалла LiNbO_3 (ниобата лития), очень привлекательны для многих применений, так как обладают широким диапазоном перестройки частоты, выполняемой с большой скоростью, компактностью и низкой стоимостью [1, 2]. Они широко используются в различных областях науки и техники, особенно в системах оптической связи с мультиплексированием и разделением каналов по длине волны (WDM), в измерительных оптических приборах различного назначения. Работа таких устройств основана на взаимодействии оптической и поверхностной акустической волны (ПАВ), коллинеарно распространяющихся в интегрально-оптической структуре (ИОС). Для оптической и акустической волн в ИОС сформированы волноводы. ПАВ возбуждается с помощью встречно-штыревого преобразователя. Помимо рабочих ПАВ в акустическом волноводе возбуждаются паразитные объемные волны, в том числе псевдо-ПАВ. Объемные волны, как псевдоповерхностные акустические волны, так и поверхностные скиммирующие объемные волны (SSBW), являются паразитными волнами, которые снижают акустическую эффективность, поскольку они распространяются в подложку и, следовательно, не взаимодействуют с направляемыми оптическими полями в LiNbO_3 волноводе. Кроме того, генерация SSBW может вызвать дополнительные перекрестные помехи в характеристиках оптического преобразования рассматриваемых устройств. Подавление перекрестных помех является строгим требованием для компонентов, используемых в системах передачи с применением WDM.

Строгая математическая модель, удовлетворительно описывающая результаты эксперимента по возбуждению акустических волн в приборах с пьезоэлектрической подложкой, требует мощных вычислительных ресурсов, и поэтому имеет ограниченное инженерное применение. В то же время достаточно полно представлены результаты расчетов функции Грина для различных срезов пьезокристаллов, в том числе для ниобата лития [3-4].

В данной работе представлена методика, позволяющая проводить расчеты входной проводимости акустооптического модулятора с подложкой на XY-срезе ниобата лития для заданной структуры встречно-штыревого преобразователя, не прибегая к сложным численным вычислениям и сохранением точности. Методика основана на задании особых точек функции Грина для данного пьезокристалла. Методика применяется для анализа работы ИОС, представляющей собой акустооптический модулятор оптического излучения диапазона 1500 нм, работающего как преобразователь типа волны ТЕ-ТМ в интегрально-оптическом волноводе. Также представлен метод измерения параметров и определения типов возбуждаемых акустических волн, основанный на совместном частотно-временном анализе характеристик акустооптического модулятора с применением современных векторных анализаторов цепей. Проведенные исследования на образце разработанного акустооптического модулятора [5-6] показали хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Herrman H, and Mendis H 1999 Broadly tunable integrated acoustooptical polarization converters in LiNbO₃ *Proc. Europ. Conf. on Integrated Optics (Torino)* pp 229–232
2. Xiangnan Pang, and Yook-Kong Yong 2019 Simulation of Nonlinear Resonance, Amplitude-Frequency, and Harmonic Generation Effects in SAW and BAW Devices *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 67 pp 422-430
3. Peverini O A, Orta R, and Tascone R 2000 Full-wave modeling of piezoelectric transducers for SAW acousto-optical interactions *Optical and Quantum Electronics* 32 pp 855-867
4. Peverini O A, Orta R and Tascone R 2002 A Fast Green's Function Method for the Analysis of IDT's for Acousto-Optical Devices *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 49 pp 365-373
5. Varlamov A V, Lebedev V V, Agruzov P M, Ilichev I V, and Shamray A V 2019 Optimal configuration of the waveguide acousto-optic TE-TM polarization mode convertor on X-cut lithium niobate substrate *J. Phys.: Conf. Ser.* 1236 012034
6. Варламов А. В., Лебедев В.В., Агрузов П.М., Ильичёв И.В., Шамрай А.В. 2019 Влияние конфигурации и материала встречно-штыревых преобразователей на возбуждение поверхностных и псевдоповерхностных акустических волн в подложках ниобата лития Письма в Журнал технической физики 45(14) с 40-43

Номер проекта РФФИ: 20-07-00928 А

Двухступенчатое сжатие и нагрев плазмы многозарядных ионов, создаваемой в малоиндуктивном сильноточном Z-разряде капиллярного типа, как метод накачки активной среды коротковолновых лазеров

Калинин Н.В.¹, Тимшина М.В.¹, Бурцев В.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nvkalinin@rambler.ru

На основании результатов численного моделирования показана возможность ступенчатого формирования активной среды лазеров на плазме многозарядных ионов, возможного благодаря применявшейся системе питания, основанной на высоковольтном генераторе и накопительных и формирующих линиях [1]. Этот метод аналогичен известному перспективному методу лазерной накачки активной среды лазерными импульсами. Рассмотренный тип системы питания разряда обеспечивает возможность получения требуемых высоких параметров плазмы многозарядных ионов при более крутых фронтах и меньших амплитудах тока, чем в случае применения систем питания другого типа. Он открывает перспективы создания компактных и эффективных источников высокой яркости на плазме многозарядных ионов в широкой спектральной области, включая область «углеродного» и «водяного окна», создаваемой в сильноточных электрических разрядах капиллярного типа.

Для численного исследования динамики неравновесной плазмы многозарядных ионов применялась нестационарная одномерная (1D) двухтемпературная МРГД модель, в которой согласованно описываются гидродинамические процессы, нестационарная

ионизации, перенос сплошного и линейчатого излучения и процессы, протекающие в электрической цепи системы накачки. Разработанная упрощенная атомная столкновительно – излучательная модель позволяет рассчитывать инверсную населенность уровней ионов и коэффициент усиления на рабочем переходе при уже определенных гидродинамических характеристиках плазмы. Для оценки влияния пленения резонансного излучения использовался фактор ускользания, полученный в рамках приближения Бибермана-Холдстейна [2].

Показано, что при максимальных токах $I_m \geq 200$ кА в режиме ступенчатой накачки возможно получение параметров плазмы Хе с температурой электронов $T_e > 400$ eV, и концентрацией $N_e > 10^{20}$ см⁻³, при которых возможно усиление спонтанного излучения в плазме Ni-подобного Хе на нескольких переходах в спектральной области $\lambda \approx 10$ nm. На основании результатов расчетов определены электрические и энергетические характеристики накачки, обеспечивающие получение коэффициента усиления на рабочих переходах $g^+ \sim 1-2$ см⁻¹.

Список литературы

1. Бурцев В.А., Калинин Н.В. Ступенчатое сжатие плазмы многозарядных ионов в протяженном продольном малоиндуктивном сильноточном Z-разряде // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 18. С. 9 – 12.
2. Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И. Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. Энергоатомиздат, 1986

Алгоритм калибровки полупроводниковых газовых сенсоров и определение концентраций летучих углеводородов в атмосферном воздухе с применением преобразований Фурье

Казаков С.А.¹, Гревцев М.А.¹, Хавров Г.Д.²

¹ФТИ

²СПбПУ

e-mail: kazakov59@mail.ioffe.ru

В работе предложен новый подход в области полупроводникового газового анализа, позволяющий однозначно решить вопрос селективности газового сенсора при его работе в достаточно сложной многокомпонентной газовой смеси из летучих углеводородов, содержащихся в атмосферном воздухе [1, 2]. Основанный на модификации оптических методов Фурье-спектроскопии подход позволяет получать спектральную характеристику датчика из суммарного изменения его электропроводности во времени при увеличении (уменьшении) температуры датчика в анализируемой среде. Применение преобразования Фурье для неперiodических функций позволяет выделить из полезного сигнала детектора амплитудно-частотный спектр концентрационного воздействия на проводимость полупроводника того или иного компонента газовой смеси, причем частотная характеристика преобразования Фурье определяет селективность детектора, а отсутствие частотного сдвига отвечает за стабильность его работы. При этом амплитуда выделенной частоты ответственна за концентрационное воздействие того или иного измеряемого компонента газовой смеси. В работе описан алгоритм калибровки для полупроводниковых сенсоров концентраций летучих углеводородов на примере метана, пропана, бензина, паров сольвента, толуола. При калибровке газочувствительных элементов получены данные по изменению электропроводности датчика во времени в процессе его нагрева или остывания. Оказалось, что для указанных молекул выделенные частотные характеристики составляют для различных концентраций компонентов в атмосферном воздухе следующие значения: для бензина $\sim 0.0406 \text{ с}^{-1}$ (остывание) и $\sim 0.036 \text{ с}^{-1}$ (нагрев), для паров сольвента: 0.459 с^{-1} (нагрев), для толуола – 0.208 с^{-1} (нагрев). Эти значения частотных характеристик датчика по порядкам величин соответствуют значениям констант скоростей десорбции типичных молекулярных газов с поверхности оксидных полупроводниковых сенсоров: $k_2 \sim 0.05 \text{ с}^{-1}$ [3]. Можно предположить, что полученные нами (из аналогии с оптическими измерениями) частотные характеристики сенсоров на основе SmS также соответствуют параметрам констант скоростей обратных реакций хемосорбции для изученных нами углеводородов. Стабильность спектральной характеристики датчика подтверждается отсутствием сдвига характеристической частоты, отвечающей за адсорбцию.

Алгоритм процесса измерения представляется достаточно простым и удобным для практического применения. Согласно [1], оптимальная температура детектирования примеси соответствует точке экстремума калибровочной характеристики датчика. Между безразмерной электропроводностью газочувствительного элемента в представленных координатах и концентрацией примеси, содержащейся в атмосферном воздухе, наблюдается

линейная взаимосвязь, что полностью соответствует механизмам и представлениям по адсорбции активных частиц, рассмотренным подробно в [3]. Таким образом, алгоритм измерения состоит в поиске температурного экстремума и в расчете в безразмерных координатах адсорбции того или иного компонента (селекция определяется частотной характеристикой).

Авторы выражают благодарность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за финансирование работы.

Список литературы

1. Казаков С.А., Соколов А.В., Гревцев М.А., Шаренкова Н.В., Каминский В.В. Полупроводниковые газовые датчики концентраций метана и пропана на основе поликристаллических пленок SmS. Научное приборостроение, т.28, 3, страницы: 137-140, 2018
2. Казаков С.А., Гревцев М.А., Соколов А.В., Каминский В.В., Казанин М.М. Полупроводниковые газовые датчики концентраций паров бензина и сольвента на основе поликристаллических плёнок SmS. Научное приборостроение, т.29, 4, страницы: 80-83, 2019
3. И.А. Мясников, В.Я. Сухарев, Л.Ю. Куприянов, С.А. Завьялов. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях. Наука, М. (1991), 327с.

Номер проекта РФФИ: 18-03-00660 А

Кардинальные изменения электронной структуры и формирование углеродной наноструктуры на поверхности SiC(111)-4° при адсорбции металлов

Тимошнев С.Н.¹, Бенеманская Г.В.², Кукушкин С.А.³

¹СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

³ИПМаш

e-mail: timoshnev@mail.ru

Карбид кремния (SiC) представляет собой широкозонный полупроводник, перспективный для использования в полупроводниковых приборах благодаря своим уникальным электронным свойствам. Карбид кремния широко применяется в высокотемпературной и высокочастотной силовой электронике. Несмотря на значительный технический прогресс в росте материалов, в настоящее время недостаточно экспериментальных, а также теоретических данных об электронной структуре SiC. Исследования поверхностных состояний, формирования границ раздела и изгиба зон в SiC имеют особое значение как с практической, так и с когнитивной точек зрения. Особенности поверхности SiC могут оказывать существенное влияние на электронные свойства и, таким образом, отвечать за благоприятные решения при дальнейшем развитии технологии.

В работе исследованы электронные свойства ряда вицинальных поверхностей SiC/Si(111)-4°, впервые выращенных оригинальным методом замещения атомов Si в подложке Si(111) на атомы С [1, 2]. Выполнены детальные исследования электронных свойств ряда вицинальных поверхностей SiC/Si(111)-4°, а также модификация свойств

при адсорбции на поверхность адатомов металла. Эксперименты проведены на синхротроне BESSY II *in situ* в сверхвысоком вакууме методом фотоэлектронной спектроскопии при возбуждении фотонами 120-450 эВ. Изучены спектры валентной зоны и спектры остовных уровней C 1s, Si 2p при различных субмонослойных металлических покрытиях.

Впервые обнаружена кардинальная модификация электронной структуры поверхностей SiC/Si(111)-4° при адсорбции атомов металла. Найдены резкие изменения в спектре остовного уровня C 1s и практически неизменность спектра Si 2p. Установлено, что спектр C 1s для исходной поверхности SiC состоит из двух мод. Главная мода является фотоэмиссией из объема образца. Мода при больших энергиях связи соответствует фотоэмиссии из атомов C, расположенных на террасах в поверхностном слое и образующих димерный слой C-Si. При адсорбции ультратонких металлических покрытий обнаружено появление в спектре двух новых пиков, один из них пик встряски ~292 эВ ранее наблюдался только для органических соединений и не наблюдался, в частности, для графена и графита. Установлено, что эффект обусловлен созданием новой, ранее неизвестной углеродной наноструктуры на поверхности SiC/Si(111)-4°. Это указывает на неординарные электронные и морфологические особенности атомов C на vicинальных поверхностях с террасами и ступенями. Появление в спектре C 1s пика встряски (~292 эВ) свидетельствует об индуцированном создании на поверхности SiC/Si(111)-4° углеродных колец со связями sp^2 и sp^3 , а также переход между связывающими (π) и антисвязывающими (π^*) молекулярными орбиталями.

Авторы выражают благодарность русско-немецкой линии синхротрона BESSY II за предоставленные возможности для проведения экспериментов и помощь во время экспериментов.

Список литературы

1. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films, J. Phys. D: Appl. Phys. 47, 313001, 2014.
2. Venemanskaya G.V., Dementev P.A., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Timoshnev S.N., Carbon-based aromatic-like nanostructures on the vicinal SiC surfaces, ECS J. Solid State Sci. Technol. 8, M53, 2019.

Электронно-стимулированная десорбция атомов калия из слоя калия, адсорбированного на вольфраме, покрытым плёнкой золота

Лапушкин М.Н.¹, Громов И.А.¹, Кулешова Т.А.¹, Кузнецов Ю.А.¹, Самсонова Н.С.¹

¹ФТИ

e-mail: lapushkin@ms.ioffe.ru

Впервые обнаружена и зарегистрирована электронно-стимулированная десорбция (ЭСД) атомов К из слоя К, адсорбированного на W, покрытом плёнкой Au, и прямым методом измерен выход ЭСД q в зависимости от энергии бомбардирующих электронов E_e , концентрации К и толщины плёнки Au.

Измерения выполнены *in situ* в высоковакуумной установке «Спектрометр ЭСД» [1]. На поверхность W ленты напылялось Au при температуре $T = 300$ К. В дальнейшем на

слой золота при $T = 300$ К напыляли покрытие К толщиной не более 3 монослоёв. Концентрация напылённых Au и К определялась по времени напыления. Монослой атомов К соответствовал поверхностной концентрации 5×10^{14} см⁻². При этой величине концентрационная зависимость выхода атомов К при ЭСД достигает насыщения.

Измерения выполнялись при $T = 300$ К при энергии бомбардирующих электронов в диапазоне 0,300 eV. Поток десорбирующихся положительных ионов задерживался в пространстве времяпролётного дрейфа, а прошедшие его нейтральные атомы ионизовались в детекторе на основе поверхностной ионизации, и их ионный ток регистрировался с помощью вторично-электронного умножителя.

На зависимости выхода $q(E_e)$ ЭСД от энергии возбуждающих электронов наблюдаются два квазирезонансных пика с максимумами при 64 и 82 eV, соответствующие энергиям ионизации уровней Au $5p_{3/2}$ и $5p_{1/2}$. Такого вида зависимость $q(E_e)$ наблюдалась ранее в системе Cs/CsAu/W [1].

Выход атомов К при ЭСД из слоя К на поверхности W, покрытого двумя монослоями Au, не наблюдается при покрытиях К меньше одного монослоя, что отражает металлический характер интерфейса К/Au/W. Для покрытий больше 1 монослоя К начинает наблюдаться ЭСД атомов К. Этот факт коррелирует с тем, что полупроводниковая плёнка K_xAu_y начинает формироваться только после напыления одного монослоя К на Au. При увеличении дозы напылённого К происходит линейный рост q вплоть до дозы напыленного К, соответствующей двум монослоям К. При дальнейшем напылении атомов К выход ЭСД остается неизменным. Это может означать, что при напылении дозы в 2 монослоя К происходит формирование полупроводникового соединения KAu, а при напылении дозы в 3 монослоя К происходит формирование полупроводникового соединения K_2Au .

Влияние толщины напыляемой плёнки Au на выход ЭСД атомов К подтверждает представления о формировании соединения K_xAu_y на поверхности W. Для любой толщины слоя Au при напылении субмонослойного покрытия К процесс ЭСД не наблюдается. Однако, если доза напыляемого К больше, чем 1 монослой, то наблюдается следующая картина: ЭСД атомов К наблюдается при 1 монослое Au. С увеличением покрытия Au выход атомов К растёт линейно и после напыления двух монослоёв Au достигает максимума. Дальнейшее увеличение слоя Au приводит к незначительному спаду выхода атомов К, что может быть вызвано уменьшением концентрации К на поверхности вследствие диффузии его в плёнку Au с образованием соединения K_xAu_y , где $y > x$.

Предложена модель процессов ЭСД в исследуемой системе с учётом электронной структуры интерфейса К/ K_xAu_y /Au/W. При облучении электронами образуются дырки на уровнях Au $5p_{3/2}$ и Au $5p_{1/2}$. В дальнейшем они заполняются электронами с более высоких уровней, приводя к различным Оже-процессам. В результате электронных переходов происходит образование нейтрального атома К в поверхностном слое, который в дальнейшем десорбируется. Все электронные переходы происходят в интерфейсе К/ K_xAu_y .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00370.

Список литературы

1. Кузнецов Ю.А., Лапушкин М.Н., Электронно-стимулированная десорбция атомов цезия, адсорбированных на поверхности золота, Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Тверь: Твер. гос. ун-т, В. 7. С. 333-340, 2015

Создание графенового и графитового покрытия на металлических полевых электронных эмиттерах для улучшения их характеристик

Павлов В.Г.¹, Бернацкий Д.П.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vpavlov@ms.ioffe.ru

Полевые электронные эмиттеры в форме острия позволяют получать узкие потоки электронов с большой плотностью тока в пучке. Они перспективны для использования в электроннолучевых технологиях и экспериментальных методиках. Острия легко изготовить химическим или электролитическим травлением металлической проволоки. Основным препятствием для внедрения полевых электронных эмиттеров считается недостаточная стабильность работы в плохих вакуумных условиях, что связано с изменениями работы выхода при адсорбции остаточных газов и изменениями локального электрического поля при нарушении рельефа поверхности под действием ионной бомбардировки.

Более устойчивы к воздействию адсорбции и ионной бомбардировки углеродные эмиттеры. Основной трудностью при их использовании является сложность изготовления острия из углеродных материалов. Возможным способом преодоления этой трудности могут быть комбинированные эмиттеры, состоящие из металлического острия с углеродным покрытием. Для решения этой задачи необходимо изучить рост углеродных покрытий на поверхности металлического острия.

В работе изучается рост углеродного покрытия на остриях из иридия и рения при разложении молекул бензола, а также эмиссионные свойства полученных эмиттеров. Данные металлы не образуют объемных карбидов. В тоже время иридий практически не растворяет углерод, а рений образует с углеродом твердые растворы. Исследования проводились в вакуумной металлической установке полевого эмиссионного микроскопа. Использовались методы полевой электронной и десорбционной микроскопии и измерение характеристик полевой электронной эмиссии. Острия изготавливались электрохимическим травлением и отжигались в вакууме ($p < 10^{-9}$ Торр) при температуре $T = 2500$ К. Углеродное покрытие наносилось нагреванием 1700 К острия в парах бензола при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ Торр. До и после экспозиции регистрировались эмиссионные изображения, измерялись вольтамперные характеристики Фаулера-Нордгейма, из которых определялась работа выхода поверхности.

Выдержка рениевого острия в парах бензола менее 25 минут не изменяла работу выхода, что обусловлено растворением углерода в объеме рения. После выдержки более 25 минут работа выхода снижалась с 4.9 eV до 4.1 eV. Полученная работа выхода ($4.1 \div 4.2$ eV) характерна для металлических поверхностей, на которых образовались графитовые структуры.

Науглероживание иридиевого острия происходило в несколько стадий. На первых этапах происходило образование пленки графена на плоских гранях. На окружающих грани ступенях оставались отдельные атомы углерода и их скопления. На следующей стадии начиналось зарождение и рост графита на ступенях. Затем графитовое покрытие распространялось на всю поверхность острия, включая плоские грани. Такой процесс существенно отличается случая плоских поверхностей, где образование углеродного покрытия ограничивается монокристаллической пленкой графена.

Характеристики Фаулера-Нордгейма обоих эмиттеров хорошо аппроксимируются прямыми линиями. Нагревание эмиттеров с углеродным покрытием приводило к

различным результатам. Нагрев рения до 3000 К не приводил к изменению эмиссионных характеристик, что говорит о высокой термической стабильности полученного углеродного покрытия. В тоже время, с поверхности иридия можно было термически десорбировать весь углерод. Различие можно объяснить растворением углерода в объеме рения. При нагревании углерод с поверхности уходит в объем рениевого острия, а при последующем охлаждении возвращается на поверхность.

Измерение эмиссионных характеристик эмиттеров с графитовым покрытием показало хорошую устойчивость по отношению к адсорбции остаточных газов и к ионной бомбардировке. Характеристики практически не изменялись после выдержки в течении десятков суток в атмосфере остаточных газов при давлении 10^{-3} Торг.

Номер проекта РФФИ: 11-08-00561-а

Формирование клатратных структур в приповерхностных слоях сильно разбавленных водных растворов

Шостка В.И.¹, Шостка Н.В.¹, Вершицкий В.И.²,

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского

e-mail: vshostka@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с формированием клатратных структур в сильно разбавленных гидрофильных водных растворах. Применен метод, основанный на интерференции лазерных лучей, прошедших через водяную линзу различной конфигурации. Показано, что исследуемые растворы обладают свойствами, связанными с самоорганизацией структуры в клатратных состояниях вследствие кооперативного эффекта изменений в неоднородной сетке водородных связей. Обнаружено, что в диапазоне небольших концентраций растворенных веществ в водных растворах, несмотря на некоторую стабилизацию структур в сформированных клатратах, в зависимости от количества взаимодействующих молекул возможны образования ассоциатов различной формы.

Процессы получения эллиптических дифракционных омбиликов в водяной линзе треугольной формы достаточно подробно были рассмотрены в работах М.В. Берри с соавторами [1]. Однако, при изучении оптических каустик, не было уделено достаточного внимания тонкой структуре полученных дифракционных картин.

Исследуя образование каустик в капле воды, помещенной в треугольную ячейку, более 15 лет назад, мы уже тогда обратили внимание на то, что по мере высыхания капли существенно изменяется структура ее приповерхностного слоя [2]. Вода, широко распространенный в природе растворитель, благодаря межмолекулярным водородным связям отличающаяся от других гидридов, имеющая ассоциативную структуру и являющаяся в структурном отношении очень чувствительной системой, в которой присутствует огромное количество метастабильных состояний. Отсутствие же строгих представлений о структуре воды и ее организации на молекулярном уровне существенно тормозит развитие методов не только количественного анализа, но и качественной оценки структурированности воды. Взаимодействие воды с различными гидрофильными и гидрофобными веществами с точки зрения изменения структуры их водных растворов практически не изучено. В связи с вышеизложенным данное исследование является актуальным как с чисто

научной точки зрения, так и с точки зрения практического применения данных растворов в фармакологии, медицине и пищевой промышленности. В отличие от воды, смешанные ассоциаты в водных растворах могут формироваться, распадаться и вновь образовываться в различных комбинациях. Как было показано в работах [3, 4], более устойчивыми являются сдвоенные молекулы воды, имеющие по две водородные связи. Стабилизация кластеров, образующих клатраты в приповерхностном слое воды, может быть связана с высокой структурной упорядоченностью слоя разбавителя. По мере удаления от поверхности раздела вглубь раствора степень упорядоченности понижается и, наоборот, на некотором расстоянии от поверхности упорядоченность соответствует состоянию жидкости в объемной фазе [5-7].

Поскольку в воде существуют две разновидности молекул, одна из которых образует тетраэдрический каркас, а другая заполняет его полости, то в результате проведенных исследований и идентификации зафиксированных структур клатратов (ассоциатов) в сильно разбавленных гидрофильных водных растворах можно предположить, что молекулы растворенных в воде веществ образуют кластеры различного типа, связанные друг с другом посредством водородных связей. Дальнейшее повышение содержания растворенного вещества в растворе приводит к разрушению упорядоченной структуры и переходу к разупорядоченной структуре, в которой избыточные молекулы соединяясь вместе, образуют агрегаты или островки в виде замкнутых образований или цепочек.

Список литературы

1. Berry M.V., Nye J.F., et. al., The Elliptic Umbilic Diffraction Catastrophe, Phil. R. Soc. – Lond., A 291, 451-543, 1979
2. Shostka V. I., Lapaeva S. N., Vershitskiy V. I., Vortical structure of wave caustics, Proc. of SPIE, V.5582(26), 187-195, 2004
3. Шостка В.И., Шостка Н.В., Доненко И.Л. Вестник, Visualization of the cluster water structure with laser radiation, Записки Физико-технического института Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского, Т.1. (3), 44-52, 2017
4. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И., Формирование кластерных структур в приповерхностных слоях воды, Сборник трудов второй всероссийской конференции «Физика водных растворов». Президиум Российской Академии Наук, 94-96, 2019
5. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И., Динамика фрактально-кластерных структур приповерхностного слоя спиртосодержащих водных растворов, Самара: сборник трудов ИТНТ-2019, 128-132, 2019
6. Shostka V.I., Shostka N.V., Metastable states of the fractal-cluster structure of alcoholcontaining aqueous solutions, Journal of Physics: Conference Series, V.1400, 066036, 2019
7. Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И., Сравнительный анализ клатратных структур в приповерхностных слоях водных растворов, Сборник научных трудов IX международной конференции по фотонике и информационной оптике, 330-332, 2019

Оптические свойства щелочно-галоидных кристаллов

Каплунов И.А.¹, Кропотов Г.И.², Роголин В.Е.³

¹ТвГУ

²ООО «Тидекс»

³ИЭЭ РАН

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Щелочно-галоидные кристаллы (ЩГК) широко применяются в оптике ИК диапазона. Однако они интересны и для использования в других диапазонах. С появлением лазеров оптическое приборостроение стало стремительно развиваться, и появились возможности исследования спектральных характеристик материалов в дальнем ИК и ТГц диапазонах.

В настоящей работе сообщается об экспериментальном исследовании оптических свойств некоторых ЩГК в широком диапазоне длин волн – от УФ до 3000 мкм. Данная работа является продолжением наших исследований [1-3].

Спектральное пропускание регистрировалось с помощью спектрофотометра Photon RT компании Essent Optics, Фурье-спектрометров Bruker Vertex 70 и Bruker IFS 66v/s в спектральном диапазоне 0.9 – 670 мкм, а в диапазоне 100 – 3000 мкм на приборе TeraK8 MenloSystems. Следует отметить, что последний прибор в диапазоне 100 – 1500 мкм обеспечивает возможность проведения количественных измерений; в области 1500 – 3000 мкм обеспечиваются лишь качественные измерения.

В работе приведены результаты проведенных измерений для кристалла хлорида натрия (NaCl), хлорида калия (KCl), бромиды йода (KBr) и йодида рубидия (RbI). В кристалле хлорида натрия зафиксировано, что после полосы прозрачности в ИК области наблюдается широкая полоса поглощения 15 – 500 мкм. Далее, вплоть до области 3000 мкм кристалл вполне прозрачен. Схожие результаты получен и для других кристаллов. Для KCl фоновая полоса поглощения составляла 25 – 1000 мкм, для KBr – 35 – 600 мкм, для RbI – 55 – 1000 мкм. Снижение пропускания в ТГц области, по сравнению с ИК областью, объясняется как ростом френелевского отражения из-за увеличившегося показателя преломления, так и некоторым увеличением коэффициента поглощения.

В области фонованого поглощения интересна область аномального изменения показателя преломления. В области начала полосы фонованого поглощения коэффициент отражения, как и следует из модели Маделунга, близок нулю, а далее (в области 50 – 60 мкм; NaCl) наблюдается пик отражения – почти 90 %. Эти эффекты наблюдаются и в других ЩГК, однако абсолютные значения соответствующих длин волн отличаются, что дает возможность варьировать применение на практике этих свойств.

Список литературы

1. В.Е. Роголин, И.А. Каплунов, Г.И. Кропотов Оптические материалы для THz диапазона // Оптика и спектроскопия, 2018, том 125, вып. 6. С. 851-863.
DOI: 10.21883/OS.2018.12.46951.190-18
2. И.А. Каплунов, А.И. Колесников, Г.И. Кропотов, В.Е. Роголин Оптические свойства монокристаллического германия в терагерцовой области спектра // Оптика и спектроскопия, 2019, том 126, вып. 3. С. 271-274. DOI: 10.21883/OS.2019.03.47365.194-18
3. THzMaterials [электронный ресурс]. Режим доступа:
http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_materials/

Рецептурно-технологические приемы повышения эффективности минерализации древесной матрицы

Килюшева Н. В.¹, Данилов В.Е.¹, Айзенштадт А.М.¹, Беляев А.О.¹

¹САФУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: n.volkova@yandex.ru

Для ускоренной петрификации древесины, как было показано нами в предварительных исследованиях [1], можно эффективно использовать водорастворимый органо-минеральный комплекс (ОМК), состоящий из арабиногалактана и полиминерального песка в оптимальном соотношении компонентов. Поверхностная пропитка растительного сырья данным ОМК приводит к увеличению плотности и изменению физико-химических свойств поверхности материала (экспериментально определяемому поверхностному натяжению твердой фазы). Механизм действия ОМК связан с переносом растворимого комплексного соединения через поверхность опытных образцов за счет капиллярно-пористой структуры материала, последующего замещения материала клеточных стенок на минеральный компонент и заполнения свободного пространства древесной матрицы различными минеральными составляющими [2]. Согласно [3] для эффективной и долговременной защиты древесины от биodeградации предпочтительней использовать автоклавный способ ее обработки. Практически все системы для защиты древесины от биodeградации необходимо вводить в поровое пространство древесины и структуру клеточных стенок [4]. Пропитка может происходить под действием капиллярных сил, внешнего избыточного давления, а также вследствие диффузионного перемещения молекул или ионов проточных веществ по капиллярам древесины, заполненным водой [5].

В данной работе представлены результаты исследования эффективности пропитки образцов древесины сосны органо-минеральной суспензией, а также отдельными ее компонентами для получения искусственно петрифицированной древесины путем погружения ее в раствор и выдерживания в нем в течение 24 часов при температуре 25°C, а также в условиях автоклавной пропитки при избыточном давлении до 1,5 МПа. В специально изготовленном лабораторном автоклаве для создания необходимого рабочего давления использовали инертный газ (аргон).

В качестве рабочих растворов для автоклавирования использовали 5% водный раствор (АГ) арабиногалактана (водорастворимый полисахарид лиственницы), водную суспензию (П), содержащую предварительно диспергированный до тонкодисперсного состояния полиминеральный песок (массовая доля песка составила 2,5%) и растворимый комплекс, полученный путем механического смешения вышеперечисленных компонентов (5%АГ-2,5%П). Опытные образцы изготавливали стандартных размеров (20×20×30 мм) из древесины сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris L.*). Эффективность пропитки оценивалась по увеличению плотности образцов. Кроме того, получены данные по изменению твердости по Бринеллю, прочности образцов на сжатие вдоль волокон, а также водопоглощению пропитанной древесины. Установлено, что автоклавирование в данном исследуемом режиме приводит к увеличению плотности образцов до 30% по сравнению с контрольными образцами. Кроме того, показано, что автоклавная обработка древесины проточными составами позволяет получить прирост прочности (до 70%) материала. Таким образом, в результате проведенных исследований определены составы органо-минеральных пропиточных растворов и методика их приготовления, а также режимные (подготовка образцов, временной фактор, рабочее давление и пр.) параметры автоклавирования.

Сочетание вышеперечисленных факторов позволяет повысить эффективность процесса минерализации древесной матрицы.

Список литературы

1. Danilov V. E., Ayzenshtadt A. M., Kilyusheva N. V., Makhova T. A., Belyaev A. O. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1400.
2. Mustoe G.E., Wood Petrification: A New View of Permineralization and Replacement. *Geosciences*, 2017, №7(4), 119, pp. 1-17.
3. V.A. Shamaev et al. *Systems Methods Technologies*. Wood impregnation. 2018 № 4 (40), pp. 152-156.
4. Zimmer K., Larnoy E., Hoibo O. Assessment of fluid flow paths and distribution in conifers. *Wood Research*. 2012. №. 57(1), pp. 1–14.
5. Черненко В.А. Анализ существующих технологий пропитки древесины различными полимерными композициями, *Строительство уникальных зданий и сооружений*, 2017, №7 (58). С. 32–52.

Номер проекта РФФИ: 18-43-292002р_мк

Воздействие мощного ультрафиолетового лазерного импульса на полированные металлы и полупроводники

Каплунов И. А.¹, Хомич Ю.В.², Малинский Т.В.², Миколуцкий С.И.², Роголин В.Е.², Ямщиков В.А.², Иванова А.И.¹

¹ТвГУ

²ИЭЭРАН

e-mail: i.kaplunov@yandex.ru

Исследована модификация полированной поверхности ряда металлов и полупроводников при воздействии интенсивного наносекундного лазерного УФ излучения (длина волны $\lambda = 355$ нм, 3-я гармоника импульсно-периодического NdYаG лазера с длительностью импульса $\tau = 10$ нс и энергией до 8 мДж). После воздействия излучения морфология образцов исследовалась на оптическом трёхмерном профилометре Zygo NewView 7300 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV.

Обнаружено, что наряду с традиционно изучаемыми явлениями плавления, испарения и абляции – процессами, сопряжёнными с переходом вещества в другое агрегатное состояние [1, 2], в некоторых материалах наблюдалось новое явление – необратимое неравномерное поднятие поверхности ряда металлов (медь; бронзы Cu-Zr, Cu-Cr-Zr; золото). При этом верхняя граница интервала температур определялась условием сохранения исследуемого металла в конденсированном состоянии [3]. При предпороговых плотностях энергии (при $E \sim 0.6$ Дж/см²), в отсутствие заметных следов абляции, в зоне воздействия наблюдалось поднятие поверхности на величину приблизительно 100 нм [4, 5]. В некоторых случаях обнаруживались явления зернограничного проскальзывания. Различные зёрна по-разному реагировали на воздействие; проявлялось явление своеобразного лазерного травления, выявляющего отдельные зёрна металла. Также зафиксировано явление полос скольжения, изменяющих ориентацию при переходе границы зерна. То есть имели место классические результаты высокотемпературной пластической

деформации. В отличие от результатов работы [6] повторное исследование поверхности образцов, проведённое через 6 месяцев, показало отсутствие изменений. При увеличении числа воздействующих импульсов наблюдалось некоторое накопление эффекта.

В то же время, на поверхности ряда исследованных материалов (сталь ЧС 57, монокристаллы германия и кремния, твёрдый сплав на основе карбида вольфрама) это явление не наблюдалось. Это объясняется тем, что после достижения порога оптического пробоя механический импульс лазерной плазмы сдерживает движение материала образца на поверхность и поэтому данный эффект не проявлялся. В этом случае имели место эффекты сверхбыстрого плавления и остывания тонкого поверхностного слоя металла, подробно описанные в [1, 2].

Список литературы

1. Железнов Ю.А., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хасая Р.Р., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением. Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1. С. 45-48.
2. Вашуков Ю.А., Демичев С.Ф., Еленев В.Д., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки. Прикладная физика. 2019. № 1. С. 82-87.
3. Мирзаде Ф.Х. Раздел 7 монографии под ред. Панченко В.Я. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 664 с.
4. Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Высокоэнергетическое воздействие ультрафиолетового лазера на полированную поверхность бескислородной меди // Тезисы докладов научно-практической конференции учёных России и Хорватии: Сборник – НИТУ «МИСиС», 2019. С. 171 -173.
5. Хомич Ю.В., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванов А.И. Воздействие мощного ультрафиолетового импульса на полированную бескислородную медь // Сб. научных трудов // IX Международной конференции «Фотоника и информационная оптика». М.: МИФИ, 2020. С. 191 – 192.
6. Васильев С.В., Иванов А.Ю., Лиопо В.А., Ситкевич А.Л. Изменения кристаллической структуры металлов под воздействием лазерного излучения // Труды 13-й Межд. Конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом». г. Минск, Беларусь, 2019. С. 221-223.

Парамагнетизм на температурной зависимости намагниченности в сверхпроводящем полупроводниковом твердом растворе $(Pb_zSn_{1-z})_{1-x}In_xTe$

Денисов Д. В.¹, Михайлин Н. Ю.¹, Шамшур Д. В.¹, Парфеньев Р. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ddenisov10@mail.ru

Легирование полупроводникового твердого раствора $Pb_zSn_{1-z}Te$ примесью In позволяет получить материалы с на порядок большими сверхпроводящими параметрам (критическая температура сверхпроводящего (СП) перехода T_c и критическое магнитное поле

СП перехода H_{c2}) по сравнению с другими полупроводниками [1]. Кроме того, соединение представляет интерес благодаря принадлежности к особому классу материалов – топологических кристаллических изоляторов [2]. Исходя из ранее полученных зависимостей критической температуры от содержания свинца в твердом растворе [1], было проведено исследование магнитных свойств образцов в области максимума T_c соединения, а именно, образцов с содержанием индия $In(x) = 0.16, 0.2$ и свинца $Pb(z) = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$.

Измерения проводились на установке Quantum Design Physical Property Measurement System 14 при помощи вставки для измерения намагниченности, в основе которой лежит вибрационный магнитометр (VSM). Были получены зависимости намагниченности m от температуры T и магнитного поля H в области СП состояния материала при температурах $T > 2$ К и в магнитных полях $H < 30$ кЭ. На полученных зависимостях намагниченности от поля $m(H)$ в СП состоянии образцов в полях вблизи H_{c2} и температурах, ниже критической $T < T_c$ наблюдается дополнительный экстремум, интерпретируемый нами как пик-эффект. Данный эффект наблюдается в образцах $(Pb_{0.5}Sn_{0.5})_{0.8}In_{0.2}Te$, $(Pb_{0.4}Sn_{0.6})_{0.8}In_{0.2}Te$, $(Pb_{0.3}Sn_{0.7})_{0.84}In_{0.16}Te$ и $(Pb_{0.4}Sn_{0.6})_{0.84}In_{0.16}Te$. С повышением температуры происходит уменьшение амплитуды, а также смещение максимумов пик-эффекта на зависимости $m(H)$ в область меньших магнитных полей.

На зависимостях намагниченности от температуры $m(T)$ для исследованных образцов наблюдается характерная для СП второго рода зависимость – увеличение диамагнитного вклада при уменьшении магнитного поля. В то же время, в образцах $(Pb_{0.4}Sn_{0.6})_{0.8}In_{0.2}Te$ при $H < 7$ кОе и $(Pb_{0.4}Sn_{0.6})_{0.84}In_{0.16}Te$ при $H < 11$ кОе в более высоких полях на кривых, полученных в режиме охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) вблизи области СП перехода при понижении T наблюдаются минимум, а затем максимум, переходящий в парамагнитную область. С увеличением магнитного поля происходит увеличение амплитуды экстремумов, а также их смещение в область меньших температур. Следует отметить, что данный эффект проявляется в том же диапазоне температур и магнитных полей, что и пик-эффект на зависимости $m(H)$. Можно предположить, что оба явления вызваны одними и теми же процессами перераспределения вихрей магнитного поля в сверхпроводнике, связанными с изменениями свойств вихревой решетки и ее взаимодействия с центрами пиннинга при изменении H и T .

Список литературы

1. Р. В. Парфеньев et al, ФТТ, 43, 10, 1772 (2001)
2. Zhong, R., et al, Crystals, 7(2), 55 (2017)

Релаксационные переходы в приповерхностных нанослоях СВМПЭ, обнаруживаемые методом плазмоиндуцированной термолюминесценции

Myasnikova L.¹, Marikhin V., Gladkov A., Radovanova E., Solovieva O.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: liu2000@mail.ru

В настоящее время в мире активно разрабатывается безрастворный («сухой») метод получения сверхпрочных высокомолекулярных пленочных нитей сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) непосредственно из продуктов синтеза СВМПЭ (т.н реакторных порошков) [1, 2], альтернативный дорогостоящему и экологически небезопасному методу гель-технологии, в котором используется малоцентрированный раствор СВМПЭ в полярных растворителях. Сухой метод заключается в спекании частиц порошка в монолитную пленку при температуре ниже температуры плавления полимера и последующем упрочнении монолитной пленки методом ориентационной вытяжки. На пути к созданию сверхпрочной нити, наряду с необходимостью сохранения специфического характера внутренней надмолекулярной структуры частиц, стоит вопрос о «залечивании» межчастичных границ (создании между частицами когезионных связей), которые не должны преждевременно разорваться до достижения предельно возможных ориентационных удлинений. Очевидно, что структура поверхности частиц играет здесь ключевую роль. Существует много методов для исследования тонкой структуры поверхности, но лишь метод плазмоиндуцированной термолюминесценции позволяет получать информацию о релаксационных свойствах приповерхностных нанослоев частиц реакторного порошка, характеризующих молекулярную подвижность, которая обеспечивает создание когезионных связей. Лаборатория Физики прочности ФТИ им.А.Ф.Иоффе располагает уникальным прибором, Нанолюминографом, разработанным и запатентованным в России и США сотрудниками ФТИ, Российского института Радионавигации и Времени и фирмы PlasmaChem (Германия) [3, 4]. В Нанолюминографе активирование поверхности образца, предварительно откачанного до вакуума 10^{-7} торр и охлажденного до 77К, осуществляется низкотемпературной плазмой газового разряда в аргоне. С целью минимизации изменения поверхностной структуры в процессе активации время действия высокочастотного (13,56 МГц) тлеющего разряда и его вкладываемая мощность уменьшены до минимально возможных величин, ограниченных чувствительностью детектирующей системы (0,1-1 сек и (0.004 ± 0.001) Вт/см³, соответственно). Исследовались пленки из реакторных порошков СВМПЭ, синтезированных на разных катализаторах (металлоценовых односторонних и нанесенных Циглер-Наттовских) и обладающих разной способностью к монолитизации. Сложные профили зависимости интенсивности термолюминесценции от температуры (кривые свечения), наблюдаемые для всех исследованных образцов, свидетельствуют о наложении нескольких релаксационных переходов, как в области гамма-релаксации, так и в области бета-релаксации. Разложение экспериментальных кривых на элементарные пики, соответствующие размораживанию подвижности различных молекулярных сегментов, производили с помощью недавно разработанной программы FITYK. Прослеживается изменение кривых свечения компактизованных пленок после спекания. Обсуждается взаимосвязь релаксационных свойств приповерхностных нанослоев с поведением полимера в термомеханических полях.

Список литературы

1. 1.Yao, Y.F.; Rastogi, S.; Xue, H.J.; Chen, Q.; Graf, R.; Verhoef, R. *Polymer*, 2013, 54 (1), 411-422.
2. Rastogi, S.; Yao, Y.; Ronca, S.; Bos, J.; van der Eem, J. *Macromolecules*, 44, June 2011, 5558-5568.
3. Патент РФ 2212650, М-ва, 20.09, 2003
4. US patent 7,309,864D2 Dec (2007)

Номер проекта РФФИ: 19-03-00789.

Изучение надмолекулярной структуры поверхности текстурированного полимерного покрытия металлопроката

Смирнов В.В.¹, Максимова О.Г.¹, Осипов С.В.¹, Осипова Н.А.¹, Байджанов А.Р.¹, Меньшиков Е.В.¹, Максимов А.В.¹, Осипов Е.Б.¹

¹ЧГУ

e-mail: valentinesmirnov97@gmail.com

Объектами исследования данной работы являются поверхности образцов листового металлопроката с текстурированным полимерным покрытием типа «стальной бархат» производства ПАО «Северсталь». Результаты производственных испытаний показали, что текстура поверхности образцов зависит не только от типа краски, но и от температурного режима формирования покрытия, что влияет на механические и оптические свойства продукции.

Покрытие, обладающее рельефной поверхностью, создается за счет присутствия в лакокрасочном материале наполнителя: гранул полиакрила, полиамида и др. Размеры гранул варьируются в интервале 1-10 мкм. В процессе сушки покрытия на поверхности частиц адсорбируются молекулы полимера, образуя ассоциаты. Целью исследования является определение зависимости структуры поверхности от температуры формирования покрытия и размеров гранул.

Изучение поверхности образцов с помощью оптической микроскопии и методом сканирующей зондовой микроскопии показало, что она состоит из ассоциатов типа «радиальных вязких пальцев» [1], которые собираются в звездообразные сгущения, разбросанные по всей поверхности листа.

Для теоретического исследования поверхности была использована модифицированная модель липкой ленты [2], в которой часть полимерной цепи адсорбируется на сферической грануле, а другая часть вытягивается за счет эффективного среднего поля, формируемого вследствие межмолекулярных взаимодействий со свободными концами других цепей.

Рассмотрены два случая расположения адсорбированной полимерной молекулы на поверхности гранулы:

- 1) макромолекулы выстраиваются по нормали к поверхности гранулы;
- 2) макромолекулы деформируются и собираются в ассоциаты, в которых они параллельны друг другу внутри ассоциата.

Теоретическими расчетами показано, что полимерным молекулам, адсорбированным на частице, энергетически выгодно вытягиваться, образуя ассоциаты. Определен

телесный угол образовавшихся ассоциатов на поверхности гранул. Показано, что он уменьшается при увеличении радиуса гранулы и уменьшении температуры.

Теоретические расчеты подтверждаются экспериментально и данными производственных испытаний ЦПМ ПАО «Северсталь» г. Череповец.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований. Проект № 19-42-350001.

Список литературы

1. И. Нитман, Ж. Даккор, Х. Стенли. Когда вязкие «пальцы» имеют фрактальную размерность? В книге «Фракталы в физике» Труды IV международного симпозиума по фракталам в физике. (МЦТФ, Триест, Италия, 9-12 июля, 1985). Перевод с английского. Москва. Мир. 1988. Стр. 266-282.
2. Клушин Л.И., Скворцов А.М., Горбунов А.А., «Точно решаемая модель, демонстрирующая фазовые переходы первого и второго рода» *Успехи физических наук*, т. 168, № № 7, р. 719, 1998.

Номер проекта РФФИ: 19-42-350001

Создание композиционного материала Ag/por-Si методами электрохимии за один технологический этап

Гагарина А.Ю.¹, Спивак Ю.М.¹, Портнова М.О., Заикина А.В., Мошников В.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ), ООО «ТЕСКАН»

e-mail: gagarina.au@gmail.com

Применение пористого кремния (PorSi) является одним из перспективных направлений в областях медицины [3], электроники, плазмоники и солнечной энергетики [1]. PorSi обладает рядом уникальных свойств, в частности хорошо развитой морфологией с контролируемым диаметром пор от микрона до нанометра. Одним из самых дешевых и чистых с точки зрения получения методов синтеза PorSi является металл-стимулированное химическое травление (МАСЕ) монокристаллического кремния [2]. Для реализации метода МАСЕ необходимо создание упорядоченного массива металлических наночастиц на поверхности кремния. В качестве материала металла выступают, как правило, серебро, золото, платина. Технология нанесения металлических островков обычно довольно дорогая, т.к. требуется соблюдение выдерживать малые размеры металлических островков и расстояний между ними. Как правило, нанесение таких островков достигается методами электронно-лучевой литографии. Это сдерживает более широкое применение метода МАСЕ.

В данной работе предлагается методика получения композиционного материала Ag/PorSi с однородно распределенными наночастицами серебра по поверхности пористого кремния за один цикл электрохимической обработки монокристаллического кремния. Эффект достигается за счет применения электролита для получения пористого кремния особого состава, содержащего ионы серебра. При электрохимической анодной обработке монокристаллического кремния в электролите, содержащем $C_3H_8O:H_2O:HF$ с добавкой ионов серебра, происходит одновременное формирование пористого кремния и островков серебра на поверхности образца.

В работе исследуется влияние технологических условий анодирования (плотность тока анодирования, концентрация серебросодержащей соли) и характеристик кремния (тип проводимости) на геометрические характеристики островков серебра на поверхности пористого кремния. Морфология и текстуры полученных образцов (поверхность, сколы) исследовалась посредством растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Список литературы

1. Korotcenkov G., Cho B. K. Silicon porosification: state of the art // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2010, № 3. P. 153-260.
2. Metal-assisted chemical etching of silicon: a review / Z. Huang, N. Geyer, P. Werner, J. de Boor, U. Gösele // *Advanced Materials*. 2010, № 23(2). P. 285–308.
3. Способ получения и пример лекарственной функционализации поверхности наночастиц пористого кремния / Ю.М. Спивак, К.А. Беспалова, А.О. Белорус и др. // *Биотехносфера*. 2017, № 3 (51). С. 69-75.
4. Spivak Y. Porous Silicon as a Material for Nanocomposites and the Effect of its Parameters on the Morphology of Silver Clusters // *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*. 2018, P. 244-248.

Исследование влияния температуры субфазы на эффективный дипольный момент молекул жидкого кристалла 8CB

Беглецова Н.Н.¹, Миронюк В.Н.¹, Смирнова А.И.², Усольцева Н.В.², Глуховской Е.Г.¹

¹СГУ

²ИвГУ

e-mail: nadya-beg98@yandex.ru

В последнее время мономолекулярные слои амфифильных нерастворимых веществ на границе раздела фаз жидкость-газ приобретают все больший интерес изучения не только с фундаментальной, но и с прикладной стороны науки. Результаты исследований могут найти применение в физике (в частности, в нанoeлектронике и фотонике), химии, биологии и т.д. Наиболее распространенным методом для получения плотноупакованного монослоя амфифильного вещества является метод Ленгмюра-Блоджетт [1]. Контролирование параметров самосборки амфифильных молекул позволяет добиться получения 2D упорядоченных ленгмюровских монослоев на поверхности водной субфазы.

Согласно исследованиям [2-5] большое внимание изучения поведения амфифильных молекул на границе жидкость-газ, а также исследование физико-химических, оптических и других свойств пленочных структур на их основе вызывают жидкие кристаллы. Уникальность данного вещества заключается в наличии фазовых переходов при определенных температурах и в способности формировать стабильные монослои, выполняющие роль матрицы для растворимых веществ [4]. Благодаря наличию большого дипольного момента полярной части молекулы жидкого кристалла измерение поверхностного потенциала методом вибрирующего электрода во время сжатия монослоя дает дополнительную информацию о молекулярной организации. Особенно это заметно на ранних стадиях сжатия пленки, когда поверхностное давление находится вблизи нуля. Таким образом, можно

определить состав монослоя, молекулярную ориентацию, степень молекулярной диссоциации и молекулярные взаимодействия на границе раздела.

В работе исследовалось влияние температуры субфазы при 23 °С, 37 °С и 43 °С на процесс формирования монослоя жидкого кристалла 4'-октил-4-бифенилкарбонитрила (8СВ). Выбор исследуемого вещества обусловлен наличием фазовых переходов при повышении температуры вещества, а также большим дипольным моментом полярной части молекул 8СВ (около 6 Д [5]) по сравнению, например, с арахидовой кислотой, что дает возможность определить ориентацию молекул 8СВ в процессе формирования монослоя. Формирование монослоев 8СВ осуществлялось методом Ленгмюра-Блоджетт путем записи изотерм сжатия одновременно с измерением поверхностного потенциала при использовании дополнительного устройства KSV NIMA Surface Potential Sensor, подсоединенного к ванне KSV NIMA LB Trough Medium KN 2002. Для поддержания постоянной температуры водной субфазы использовали циркуляционный термостат LOIP LT-205a. Параметры формирования монослоя 8СВ были следующие: объем субфазы составлял 150 мл (деионизованная вода с удельным сопротивлением 18,2 МОм×см), на поверхность которой наносилось 50 мкл жидкого кристалла, растворенного в хлороформе с концентрацией 10^{-3} М. Скорость сжатия монослоя составляла 15 мм/мин. Время для испарения растворителя и равномерного распределения молекул 8СВ по поверхности субфазы составляло 5 минут.

По уравнению Гельмгольца [4] определяли значение эффективного дипольного момента молекул жидкого кристалла в точке коллапса для изучаемых температур субфазы. Из полученных расчетов следует, что с повышением температуры субфазы от 23 °С до 43 °С значение эффективного дипольного момента уменьшается в примерно в 13 раз. Полученный результат может объясняться изменением ориентации молекул 8СВ относительно нормали к поверхности монослоя в результате взаимодействия между молекулами 8СВ в уплотненном состоянии при сжатии монослоя. Кроме того, фазовые переходы жидкого кристалла также вносят вклад в изменение степени упорядоченности диполей молекул 8СВ на поверхности субфазы.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 19-03-00763-а.

Список литературы

1. Блинов Л.М. Ленгмюровские пленки. Успехи физических наук. 1988. Т. 155, Вып. 3. С. 443-480.
2. Popov N., Honaker L.W., Popova M., Usol'tseva N., Mann E.K., Jáklí A., Popov P. Thermotropic Liquid Crystal-Assisted Chemical and Biological Sensors, Materials, Vol. 11, Iss. 1, pp. 1-28, 2018.
3. Modlińska A., Bauman D. The Langmuir-Blodgett Technique as a Tool for Homeotropic Alignment of Fluorinated Liquid Crystals Mixed with Arachidic Acid / Int. J. Mol. Sci., Vol. 12, pp. 4923-4945, 2011.
4. Inglot K., Kaleta A., Martynski T., Bauman D. Molecular aggregation in Langmuir-Blodgett films of azo dye/liquid crystal mixtures, Dyes and Pigments, Vol. 77, pp. 303-314, 2008.
5. Kawski A., Kukielski J. Dipole Moments of 4-Alkyl-Substituted 4'-Cyanobiphenyl-Formed Liquid Crystals, Mol. Cryst. Lig. Cryst. B, Vol. 182, Iss. 1, pp. 209-213, 1990.

Особенности самоорганизации ленгмюровских монослоев производных порфирина на границе раздела фаз жидкость-газ

Беглецова Н.Н.¹, Миронюк В.Н.¹, Смирнова А.И.², Усольцева Н.В.², Глуховской Е.Г.¹

¹СГУ

²ИвГУ

e-mail: begletsova98@gmail.com

Формирование упорядоченных мономолекулярных структур поверхностно-активных веществ на границе раздела фаз жидкость-газ является актуальным вопросом при создании устройств нового поколения для микро- и нанoeлектроники. Наиболее распространенным методом получения таких пленок является технология Ленгмюра-Блоджетт, которая позволяет формировать монослои различных амфифильных соединений [1-3].

В работе представлены исследования по изучению особенностей формирования монослоев производных порфирина с помощью технологии Ленгмюра-Блоджетт в зависимости от состава [4, 5] и объема наносимой аликвоты производных порфирина на поверхность субфазы. В качестве субфазы использовалась деионизованная вода с удельным сопротивлением 18,2 МОм·см, полученная с помощью системы очистки воды Milli-Q от фирмы Millipore. На поверхность субфазы наносились аликвоты исследуемых производных порфирина объемом 30, 50 и 100 мкл, растворенных в хлороформе с концентрацией $5 \cdot 10^{-4}$ М. Скорость сжатия монослоя составляла 20 мм/мин. Перед процессом сжатия монослоя проходило 5 минут, что было необходимо для испарения растворителя и равномерного распределения молекул исследуемого вещества на поверхности деионизованной воды. Все эксперименты осуществлялись при температуре субфазы 23 °С, поддерживаемой постоянное значение с помощью термостата LOIP LT-205a.

Из анализа изотерм сжатия было установлено, что с увеличением объема наносимой аликвоты раствора производных порфирина независимо от их состава наблюдается сдвиг графиков вправо в сторону больших значений площадей, приходящихся на молекулу монослоя, что согласуется с ранее полученными данными.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 19-03-00763-а.

Список литературы

1. Kazak A.V., Usol'tseva N.V., Bykova V.V., Semeikin A.S., Yudin S.G. Influence of meso-substituted porphyrins molecular structure on their self-organization in floating layers, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 541, No. 1, pp. 266-272, 2011.
2. Chumakov A.S., Al-Alwani A.J.K., Gorbachev I.A., Ermakov A., Shinkarenko O.A., Begletsova N.N., Kolesnikova A., Glukhovskoy E. The Formation of Quantum Dots – Liquid Crystal monolayers by Langmuir-Blodgett method, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 917, No. 092002, pp. 1-6, 2017.
3. Al-Alwani A.J., Chumakov A., Shinkarenko O., Qassime M., Begletsova N., Gorbachev I., Venig S., Kazak A., Glukhovskoy E. Effect of Subphase Conditions on the Formation of Graphene Langmuir layers, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 1135, No. 012029, pp. 1-5, 2018.
4. Facci P., Fontana M.P., Dalcanale E., Costa M., Sacchelli T., Molecular Reorganization in Langmuir-Blodgett Films of Mesogenic Zn-Porphyrin Octaesters, *Langmuir*, Vol 16, No. 20, 7726-7730, 2000.
5. Desroches M.-C., Kassalouri A., Meyniel M., Fontaine P., Goldmann M., Prognon P., Maillard P., Rosilio V., Incorporation of Glycoconjugated Porphyrin Derivatives into Phospholipid Monolayers: A Screening Method for the Evaluation of Their Interaction with a Cell Membrane, *Langmuir*, Vol. 20, No. 26, pp. 11698-11705, 2004.

Технология нанопланарной подготовки поверхности подложек GaSb и InP

Жирнов А.М.¹, Маричев А.Е.², Эполетов В.С.², Прасолов Н.Д.², Левин Р.В.², Пушный Б.В.²

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: artemzhi38@gmail.com

Цель работы была в разработке технологии подготовки подложек GaSb и InP, позволяющей получить нанопланарную поверхность близкую к атомарно-гладкой для выращивания на ней квантово-размерных гетероструктур и возможности использования для «бондинга» (от англ. bonding – «воссоединение»). Использовались следующие методы: анодное окисление, травление, отжиг и выращивание буферного слоя.

Для подложек GaSb лучшие результаты из перечисленных методов были получены при комбинации «мокрого» травления при комнатной температуре с последующим отжигом.

1. для удаления естественного оксида – травление подложек GaSb в HCl 1 мин с последующей промывкой деионизованной водой в течение 30 сек;
2. для удаления механически нарушенного слоя – травление 3 мин в травителе ($H_2O+H_2O_2+40\%$ водный раствор $C_4H_6O_4+HF$) (25:25:22:1.5) с последующей промывкой деионизованной водой в течение 1 мин;
3. травление в HCl 5 мин с последующей промывкой деионизованной водой в течение 3 мин;
4. сушка в центрифуге при 500об/мин;
5. отжиг GaSb в потоке водорода (H_2) при 650°C в течение 8 минут.

Приведенная предэпитаксиальная подготовка подложек GaSb позволила получить R_q (среднеквадратичная шероховатость поверхности – измерена методом АСМ) поверхности величиной порядка 10-12Å при плотности дефектов менее 10^3 см^{-2} .

Для подложек InP лучшие результаты были получены при комбинации «мокрого» травления при комнатной температуре с последующим отжигом:

1. для удаления естественного оксида – травление подложек InP в H_3PO_4 1 мин с последующей промывкой деионизованной водой в течение 30 сек;
2. для удаления механически нарушенного слоя – травление 1 мин в травителе (HBr + насыщенный водный раствор $K_2Cr_2O_7$) (2:1) с последующей промывкой деионизованной водой в течение 1 мин;
3. травление в H_3PO_4 3 мин с последующей промывкой деионизованной водой в течение 3 мин;
4. сушка в центрифуге при 500 об/мин;
5. отжиг InP в смеси потоков $H_2 + PH_3$ (1000:1) при 600°C в течение 6 минут.

Для подложек InP R_q поверхности составила 10Å при плотности дефектов менее 10^3 см^{-2} .

После обработки подложек на них был выполнен рост методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений нелегированного буферного слоя GaSb на GaSb или InP на InP. Оптимальная толщина слоя составляет – 500 нм. Выращивание буферного слоя позволила снизить R_q поверхности подложек GaSb и InP с 10-12Å до 6-8Å. На

подготовленных по представленной технологии подложках были выращены квантово-размерные гетероструктуры InAs/GaSb и выполнены операции «бондинга» на InP.

Проведенные исследования позволяют говорить об эффективности предложенной технологии подготовки поверхности подложек.

Номер проекта РФФИ: 20-08-00982

Покрyтия с регулируемой степенью гидрофобности на основе порошковых полимерных композиций

Ваганов Г.В.^{1,2}, Радченко И.Л.², Ваганов В.В.², Ильина И.А.²

¹ИВС РАН

²СПбПУ

e-mail: glebvaganovv@mail.ru

Придание различным поверхностям гидрофобных свойств является важной научно-технической задачей, так как позволяет придать покрытиям устойчивость к биобрастанию, к неорганическим и некоторым органическим загрязнениям и обеспечить эффективное снижение скорости коррозионных процессов при эксплуатации стальных конструкций и сооружений в различных эксплуатационных условиях. Вблизи гидрофобной поверхности таких покрытий облегчено скольжение жидкого потока. Кроме того, получение лакокрасочных покрытий с повышенной гидрофобностью способно создать самоочищаемые и антиобледенительные поверхности. Существуют различные способы повышения гидрофобности покрытий, которые основаны на применении компонентов с выраженным эффектом водоотталкивания. Наибольший научный и практический интерес являются получения высокогидрофобных покрытий, краевой угол смачивания которых водой превышает 120°. В отдельную группу можно выделить супергидрофобные покрытия, которые характеризуются очень высоким углом смачивания (>150°) [1]. Следует отметить, что большинство исследований в области гидрофобизации поверхности полимерных покрытий относиться к жидким лакокрасочным материалам (органорастворимых или водно-дисперсионных). Однако данных по получении гидрофобных покрытий и в частности, высокогидрофобных и супергидрофобных на основе порошковых полимерных композиций практически отсутствуют. В связи с вышесказанным является актуальной разработка покрытий с различной степенью гидрофобности от гидрофобных до супергидрофобных на основе порошковых полимерных связующих.

В качестве основы для получения полимерных покрытий использовали эпоксидно-полиэфирную порошковую композицию. Для модификации поверхностных свойств покрытий применяли фторопласт с размером частиц до 5 мкм. Композиции наносили методом электростатического распыления на алюминиевые поверхности, в дальнейшем отверждали при температуре 190°C в течение 15 мин.

Исследовали физико-механические и поверхностные свойства сформированных гидрофобных покрытий. Известно [1], что максимальный краевой угол смачивания водой на гладкой гидрофобной поверхности не может превышать 120°. Для получения покрытий с более высокими значениями краевых углов необходимо использование совместного влияния химической структуры и шероховатости поверхности. Подбором поверхностной текстуры можно достичь супергидрофобных свойств покрытий. В связи с этим исследовали

шероховатость поверхности покрытия с помощью цифрового профилометра. Оценку других поверхностных свойств материала осуществляли с использованием прибора DSA4 фирмы Kruss. Оценку краевого угла смачивания осуществляли по методу лежащей капли. Расчет свободной энергии поверхности проведен по расширенному методу Фоукса [2], в котором используются значения краевого угла смачивания лежащей на твердой поверхности капли для двух жидкостей с известными полярной и дисперсной составляющими поверхностного натяжения.

Установлено, что за счет модификации фторопластом и варьирование его концентрации (от 0,5 до 2 мас.%) позволяет получать покрытия с различной гидрофобностью от гидрофобных, высокогидрофобных до супергидрофобных. Анализ свойств поверхности гидрофобных покрытий показал, что повышение краевого угла смачивания и снижение поверхностной энергии покрытия обусловлено миграцией фторорганической добавки в приповерхностные слои. Одновременное сочетание низкой поверхностной энергии и формирование микрорельефа обуславливает достижения супергидрофобного состояния поверхности.

Список литературы

1. Бойнович Л. Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение, Успехи химии, том. 77, 619-638, 2008 г.
2. Zenkiewicz M, Methods for the calculation of surface free energy of solids, J. Achiev in Mater. and Manufact. Eng., V. 24, 137-145, 2007.

Особенности функционализации наночастиц пористого кремния разного типа проводимости лекарственными веществами

Самторов М.Ш.¹, Спивак Ю.М.¹, Гавазюк Н.О.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

e-mail: Mansurjon_0700@mail.ru

Наночастицы пористого кремния чрезвычайно актуальны для применения в медицине, в частности в адресной доставке лекарств как транспортные матрицы-носители, в тераностике и т.п. [2-5]. Уникальное сочетание таких свойств пористого кремния, как биосовместимость, биodeградируемость, многофункциональность (не только матрица-носитель, но и одновременно сенсор, маркер и т.п. благодаря способности к фотолюминесценции в спектральном диапазоне прозрачности организма), возможности управления свойствами пористой частицы (варьирование свойств (пористость, развитость поверхности, гидрофобность-гидрофильность, зарядовое состояние поверхности (работа выхода), локальное распределение зарядов и т.п.) в широких диапазонах) при относительной простоте технологии получения обеспечивает его конкурентные преимущества по сравнению с другими материалами-носителями для адресной доставки лекарств [4, 5].

Известно, что фазовый и функциональный состав поверхности пористого кремния в зависимости от технологических условий получения и выбора типа монокристаллического кремния может существенно различаться, что влияет на характер связывания, например, частиц пористого кремния электронного типа проводимости с органическими молекулами [6].

Данная работа является развитием [6], и посвящена исследованию характера взаимодействия частиц пористого кремния р-типа проводимости с лекарственными веществами, содержащими различные функциональные группы.

Наночастицы пористого кремния получали методом электрохимического анодного травления с последующей ультразвуковой обработкой. Варьируемым параметром являлась плотность тока анодирования. Функционализацию частиц пористого кремния лекарственными веществами проводили методом импрегнации. Далее функционализированные частицы отделялись от раствора лекарственного вещества, диспергировались в дистиллированной воде. Таким образом полученные пробы исследовались с помощью одноручевого спектрофотометра марки ПЭ-5400 УФ в диапазоне волн 190 – 1000 нм. В работе обсуждаются особенности спектров поглощения частиц р-пористого кремния, функционализированных различными по содержанию функциональных групп лекарственными веществами, в сравнении с аналогично функционализированными коммерчески доступными частицами полисорба МП, аэросила А 100, белой сажи.

Список литературы

1. Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем направленной лекарственной доставки ко внутреннему уху. Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, А.А. Паневин, С.Г. Журавский, В.А. Мошников, К. Беспалова, П.А. Сомов, Ю.М. Жуков, А.С. Комолов, Л.В. Чистякова, Н.Ю. Григорьева // ЖТФ, 2018. Т. 88. Вып. 9. С. 1394-1403.
2. Microfluidic Nanoassembly of Bioengineered Chitosan-Modified FcRn-Targeted Porous Silicon Nanoparticles @ Hypromellose Acetate Succinate for Oral Delivery of Anti-Diabetic Peptides, J. P. Martins, D. Liu, F. Fontana, etc. // ACS Appl. Mater. Interfaces 2018, 10(51), 44354–44367.
3. Porous Silicon as a Platform for Radiation Theranostics Together with a Novel RIB-Based Radiolanthanoid. U. Jakobsson, E. Mäkilä, A. J. Airaksinen, etc. // Contrast Media & Molecular Imaging. – 2019 – Vol. 2019 – Article ID 3728563, 9 p. <https://doi.org/10.1155/2019/3728563>.
4. Yu. M. Spivak, S. V. Myakin, V. A. Moshnikov, M. F. Panov, A. O. Belorus, A. A. Bobkov, "Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions", Journal of Nanomaterials, vol. 2016, 2016
5. Пористый кремний и его применение в биомедицине. Мошников В. А., Спивак Ю. М., Леньшин А.С. Гл. 4, с. 70-116 в моногр. «Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине». Под общ. ред. Акад. РАН В. Я. Шевченко, акад. РАН О. И. Киселева, проф. В. Н. Соколова. СПб: Химиздат, 2015. 367 с.
6. K. Bepalova, P.A. Somov, Yu.M. Spivak, "Investigation of porous silicon nanopowders functionalized by antibiotic kanamycin fluorophore Indocyanine Green", *J. Physics: Conf. Ser.*, vol. 929, no. 012058, 2017

ПРИБОРЫ И МАТЕРИАЛЫ ТГц И СВЧ ДИАПАЗОНА

Повышение эффективности терагерцового излучения короткого электронного сгустка за счет стабилизации его длины низкочастотным излучением в волноводе

Oparina Yu.S.¹, Bratman V. ¹, Lurie Yu.²

¹Institute of Applied Physics, RAS, Russia

²Ariel University, Ariel, Israel

e-mail: oparina@appl.sci-nnov.ru

Современные фотоинжекторы позволяют формировать пикосекундные и субпикосекундные сгустки ультрарелятивистских электронов с большим зарядом [1]. Такие сгустки используются для генерации мощных электромагнитных импульсов в различных частотных диапазонах и, в частности, они очень привлекательны для возбуждения терагерцовых импульсов [2]. Главным препятствием для создания на этом пути эффективных источников когерентного излучения является сильное продольное кулоновское расталкивание частиц, ведущее к быстрому расширению сгустка, потере когерентности и уменьшению мощности излучения. В ряде работ рассмотрены методы удержания частиц в направлении их поступательного перемещения и среди них –компрессия (стабилизация) сгустка в поле излучаемой им волны [2, 3]. Эти эффекты наиболее значительны в режиме когерентного спонтанного излучения сгустка, когда его продольный размер меньше (порядка) длины излучаемой волны.

В данной работе предлагается использовать этот метод для получения когерентного ондуляторного и циклотронного излучения сгустков в волноводе в режиме одновременного возбуждения двух сильно отличающихся по частоте волн. В случае ондуляторного излучения в ситуации, когда длительность сгустка порядка периода низкочастотной волны и много больше периода высокочастотной волны в ондуляторе возможно эффективное спонтанное излучение низкочастотной волны, которое стабилизирует размер сгустка и тем самым ускоряет самогруппировку частиц и значительно повышает эффективность высокочастотного сверхизлучения. В случае циклотронного излучения высокочастотная волна возбуждается в режиме, близком к авторезанонсу [4] (фазовая скорость, близка к скорости света), в таком режиме волна не влияет на изменение фаз частиц, следовательно, исключается возможность группировки частиц. Группировка относительно высокочастотной волны может быть обеспечена низкочастотным излучением, благодаря тому, что в устойчивых нейтральных фазах низкочастотной волны образуются электронные сгустки, фазовый размер которых меньше длины волны высокочастотного излучения, в связи с чем становится возможной высокочастотная генерация в спонтанном режиме. Как показывают результаты численного моделирования, эффективность генерации на частотах терагерцового диапазона в таких двухволновых режимах выше на порядок.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект 19-38-90197, и Института Прикладной Физики Российской Академии Наук, проект 0035-2019-0001.

Список литературы

1. Power J G 2010 *AIP Conf. Proc* 1299 20
1. Bandurkin I V, Oparina Yu S and Savilov A V 2017 *Appl. Phys. Lett.* 110 263508
2. Bandurkin I V, Oparina Y S, Osharin, I V, Savilov A V, 2019 *Physics of Plasmas* 26(11)
3. Bratman V I, Ginzburg N S, Nusinovich G S, Petelin M I, Strelkov P S, 1981 *International Journal of Electronics* 51(4) 541-567
4. Davydovsky V Y, 1962 *Pis'ma V Zhurnal Eksperimental'noy I Teoreticheskoy Fiziki* 43 886–888.

Номер проекта РФФИ: 19-38-90197

Поглощение и трансформация СВЧ – электромагнитных волн в кварцсодержащих гетерогенных материалах

Махмудов Х. Ф.¹

¹ФТИ

e-mail: h.machmoudov@mail.ioffe.ru

В настоящей работе исследован механизм поглощения и трансформации микроволновой электромагнитной энергии в тепловую. Установлено, что поглощение и трансформация микроволновой энергии в тепловую, возникает вначале в местах, где есть критерии (поглощения) нестабильности образца [1]. Этот механизм трансформации и получения теплового эффекта в отличие от других способов нагрева эффективен [2] и вводит новый критерий и параметр в области изучения и разрушения диэлектриков. Тангенс угла диэлектрических потерь, имеющий место в минералах и гетерогенных породах, объясняется медленно устанавливающимися видами релаксации [3], которые проявляются из-за наличия в веществе полярных молекул, сложных комплексных анионных радикалов, химически связанной воды, границ твёрдой и жидкой фаз, границ диэлектриков и проводников. При этом, также выявлен новый механизм трансформации микроволновой энергии в тепловую в местах соприкосновения водонасыщенных пор в модельных образцах. Спроектирован эксперимент, моделирующий и описывающий модельный механизм трансформации микроволновой энергии в тепловую отличающий от рассмотренных (наличия в веществе полярных молекул) механизмов, основанный на резонансных колебаниях СВЧ- волн в порах гетерогенных образцах с последующей трансформацией в тепловую. Установлено важность и необходимость установления, исключения, и определения самого источника и способа получения и места появления первичного теплового эффекта от микроволнового воздействия при изучении разрушения гетерогенных материалов в области разрушения и модели изучения твердого тела.

Список литературы

1. Менжулин М. Г., Махмудов Х. Ф. ЖТФ, 89, 665-669, 2019
2. Менжулин М. Г., Махмудов Х. Ф. ЖТФ, 87, 1040-1048, 2017
3. Makhmudov Kh. F., J. Phys.: Conf. Ser., v.1400, 7 ArtNo: #077057, 2019

Вклад лучистой компоненты в тепловую проводимость среды

Шампаров Е.Ю.¹, Бугримов А.Л.¹, Родэ С.В.¹, Жагрина И.Н.¹

¹РГУ им. А.Н. Косыгина

e-mail: shamparov@bk.ru

При наличии нескольких механизмов задачи по переносу тепла относят к сложным [1]. Обычно их решают численно [2, 3], однако было найдено аналитическое решение задачи по радиационно-кондуктивному переносу тепла возле непрозрачной поверхности [4]. Эта работа посвящена практическим измерениям компонент переноса тепла в волокнистых и вспененных материалах.

В подобной среде вдали от границ выполняется уравнение Фурье в обобщенной форме: $\Phi = -\lambda \nabla T$ $\Phi = -\lambda \nabla T_\infty$, $\lambda = L + D$. Суммарная теплопроводность среды λ складывается из лучистой L и кондуктивной D компонент. $L = 16\sigma T^3 a / 3$ (1), σ – постоянная Стефана-Больцмана и a – глубина проникновения теплового излучения в среду. При постоянной плотности потока тепла Φ зависимость температуры среды от расстояния x до плоской границы имеет вид: $T = T_0 + x \nabla T_\infty + \tau \exp(-x/b)$ [4], где b – глубина радиационно-кондуктивной релаксации и τ – приповерхностный скачок температуры. $b = a / \gamma$, $\gamma^2 = \lambda / D$ и при полностью отражающей поверхности $\tau = (-a\Phi / \lambda)((\gamma^2 - 1) / \gamma)$.

Для измерений взят пласт вспененного полиэтилена толщиной 0.75 мм, из которого по размерам (85x85 мм²) рабочей части установки [5] вырезаны образцы. Вес образца 177 мг. Плотность 32.6 кг/м³. Доля занятого полиэтиленом пространства 3.3%. Измерена зависимость теплового сопротивления R от толщины среды d (числа слоев). По наклону зависимости рассчитана суммарная теплопроводность среды $\lambda = dd' / dR = 0.0483$ Вт/(м К). Измерена зависимость $R(d)$ для стопок образцов, по середине которых помещен экран из алюминиевой фольги. Данные с хорошей точностью легли на ожидаемую кривую вида $R = d / \lambda + 2R_s(1 - \exp(d / 2b))$. По сдвигу второй зависимости относительно первой при больших d рассчитано тепловое сопротивление поверхности $R_s = 0.0056$ м²К/Вт. Затем данные преобразованы к виду $A = (R - d / \lambda) / (2R_s)$ и посредством аппроксимации $A(d)$ найдено $2b = 1.90$ мм. Так как $R_s = \tau / \Phi$ и соответственно $L / D = \gamma^2 - 1 = R_s \lambda / b$, то $L = 0.0107$ и $D = 0.0376$ Вт/(м К), $\gamma = 1.13$, $a = 1.08$ мм. Точность измерений проверена по формуле (1) (при $T = 313$ К). Тогда $L = 0.0100$ Вт/(м К). На самом деле $L \approx 0.0104$ Вт/(м К). Ошибка ~4% обусловлена малой глубиной проникновения излучения, лишь в 1.5 раза большей толщины слоя материала. Тем не менее, нам удалось непосредственно увидеть глубину радиационно-кондуктивной релаксации и оценить вклад каждой из компонент. Кондуктивная составляющая $D = 0.038$ в свою очередь сложена из доли, обусловленной движением тепла через воздух $D_v = 0.026$ и обусловленной движением по полиэтилену $D_\tau = 0.012$ Вт/(м К).

При уменьшении занятой твердым веществом доли объема материала лучистая компонента теплопроводности растет, идущая по воздуху составляющая практически постоянна и вклад, обусловленный движением тепла по твердому веществу, уменьшается обратно пропорционально толщине.

Измерены зависимость 1 и 2 теплопроводности λ легкого волокнистого материала марки "холлофайбер" от толщины, до которой он сжат. Образцы сложены в два слоя начальной толщиной 20 мм, весом 998 мг и долей занятого полиэтилентерефталатом объема 0.5%. В серии 2 образцы вырезаны из "холлофайбера", на который с обеих сторон

посредством вакуумного термического распыления нанесен алюминий с фронтальной толщиной ~ 100 нм. Обе зависимости хорошо совпали с физически осмысленными кривыми вида $\lambda = 0.026 + k / (d + 0.2) + ld - md^{3/2}$. Показаны вклады, обусловленные изменениями плотности (ld) и расположения волокон ($md^{3/2}$). Коэффициенты составили $k_1=0.033$, $k_2=0.028$, $l_1=0.0045$, $l_2=0.0043$, $m_1=0.00051$, $m_2=0.00052$. При $d \approx 3$ мм суммарная теплопроводность обеих модификаций минимальна, $\lambda_1=0.0474$ и $\lambda_2=0.0449$ Вт/(м К). При этом вклад, обусловленный движением тепла по пластику в обоих случаях около 0.010, лучистая теплопроводность $L_1=0.0115$ и $L_2=0.009$ Вт/(м К). Несмотря на большое среднее расстояние между волокнами (250 мкм при $d=10$ мм), благодаря металлизации лучистая теплопроводность снизилась на 25% при $d=3$ мм и на 16% при $d=20$ мм. Таким образом, объяснен общий вид зависимости теплопроводности высокопористого материала от его плотности.

Оба метода измерений показали качественное и количественное согласие. Измерения радиационно-кондуктивного переноса тепла уникальны по информативности и крайне перспективны для исследования и понимания свойств материалов со сложной структурой, близкой к хаотической.

Список литературы

1. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. / Кутателадзе С.С. // – М.: Атомиздат – 1979. – 416 с.
2. Viskanta, R. Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium / R. Viskanta and R.J. Grosh // J. Heat Transfer – 1962. – Т.84(1) – Р. 63-72.
3. Doornink, D.G. Transient Combined Conductive and Radiative Heat Transfer / D.G. Doornink and R.G. Hering // J. Heat Transfer – 1972. – Т.9 – Р. 473-478.
4. Шампаров, Е.Ю. Исследование теплового переноса в полупрозрачной среде / Шампаров Е.Ю. // Журнал Технической Физики. – СПб.: – 2018. – №1 – С. 134-140.
5. Полезная модель №166709 Установка для прецизионных бесконвекционных измерений тепловой проницаемости материалов при температурах, близких к комнатной / Шампаров Е.Ю., Жагина И.Н. – заявл. 01.04.2016, опубл. 10.12.2016, бюл. №34.

Номер проекта РФФИ: 16-02-00789 А

Разработка методики и волоконно-оптической системы для проверки в безэховой камере диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки в дальней зоне

Мороз А. В.¹, В.В. Давыдов¹, В.Ю. Рудь³

¹СПбПУ

²АО «Заслон»

³ВНИИФ

e-mail: moroz.com3844@gmail.com

В современном мире постоянно расширяется круг задач, для решения которых применяются радиолокационные станции (РЛС). Среди широкого класса используемых РЛС

особое место занимают станции, в которых применяются активные фазированные антенные решетки (АФАР) [1, 2]. В большинстве случаев АФАР размещаются на подвижных объектах с ограничениями по движению в пространстве. Это не позволяет проводить сканирование (механическое) АФАР в горизонтальной и вертикальной плоскости в больших диапазонах (угол места и азимутальный угол в последних моделях можно изменять не более чем на 10°). Основное сканирование АФАР в пространстве осуществляется за счет изменения положения направления диаграммы направленности, которая формируется подачей управляющих сигналов на приемопередающие элементы антенны. Поэтому для РЛС воздушного базирования с АФАР, работающими в режиме обзора, очень важна точность определения диаграммы направленности, особенно в дальней зоне. Дальняя зона РЛС имеет множество определений, для активной фазированной антенной решетки наиболее целесообразно использовать следующее соотношение [2, 3]: $r_0 2L^2 / \lambda$, где r_0 – расстояние до объекта, L – расстояние между крайними преемо-передающими элементами антенны, λ – длина волны излучения. Необходимо отметить, что в дальней зоне угловое распределение поля несущественно зависит от изменения расстояния до антенны.

В большинстве находящихся в эксплуатации АФАР дальняя зона соответствует расстоянию более 300 м. Это создает большие проблемы при настройке и тестировании антенны в безэховой камере (БЭК). Использование БЭК для проверки АФАР позволяет выявить различные дефекты как в конструкции самой антенны, так и в излучательных элементах и системах монтажа. Это позволяет после устранения данных дефектов провести оптимальную настройку антенны для получения максимальной чувствительности при различных режимах сканирования. Современные конструкции БЭК имеют размеры не более 200 м в длину и ширину. Чем больше габариты БЭК, тем дороже её эксплуатация и стоимость изготовления, поэтому стандартный размер БЭК – 20×15 м. Это создает сложности с проведением исследований диаграммы направленности антенны в дальней зоне.

Для решения этой задачи нами предлагается следующий метод имитации проверки диаграммы направленности АФАР в дальней зоне. Тестирование проводится в безэховой камере с использованием широконаправленной рупорной антенны, расположенной на расстоянии l , кратном r_0 , от излучающей антенны. Так как значение r_0 изменяется по причине изменения длины волны СВЧ излучения, наши исследования проводятся на расстоянии $l = 1$ м.

При работе на таком расстоянии передающие тракты очень сложно защитить от наводок, вызванных большой излучательной мощностью АФАР. Большая мощность необходима, чтобы оценить уровень боковых лепестков и ширину диаграммы направленности. Искажения, возникающие при передаче сигнала приемной антенны из БЭК к оборудованию обработки измерений, не позволяют правильно оценить работоспособность АФАР.

Для решения этой задачи нами была разработана волоконно-оптическая система передачи, позволяющая передавать сигнал из БЭК к измерительной аппаратуре через зону сложной электромагнитной обстановки (в БЭК только один вход для всех коммутационных систем и питающих напряжений, в том числе высоковольтных).

Полученные результаты показали, что результирующая диаграмма направленности, снятая на расстоянии метра с использованием широконаправленной рупорной антенны, аналогична диаграмме направленности, измеренной на большом расстоянии (в дальней зоне) от АФАР на полигоне. Использование волоконно-оптической системы передачи предотвращает появление искажений при передаче сигнала из безэховой камеры к аппаратуре для последующей обработки, что позволяет выявлять дефекты, которые невозможно установить при использовании фидерных трактов для передачи СВЧ сигнала.

Список литературы

1. Moroz A. V., Davydov R. V., Davydov V. V. A New Scheme for Transmitting Heterodyne Signals Based on a Fiber-Optical Transmission System for Receiving Antenna Devices of Radar Stations and Communication Systems, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Vol. 11660 LNCS, 710-718, 2019
2. Савельев И. К., Кагановский В. Э., Волоконно-оптическая система передачи информации для тестирования активных фазированных антенных решеток в безэховой камере, Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017»
3. Волобоев В.П., Клименко В. П., Лосев В. Д., Радиолокационная станция воздушного (морского) базирования, работающая в динамически сложных внешних условиях, Математическое машиностроение и системы, № 4, 131 – 142, 2005

Исследование вакуумных автоэмиссионных ячеек с катодом, сформированным методом локального ионно-стимулированного осаждения

Шандыба Н.А.¹, Панченко И.В.¹, Коломийцев А. С.¹, Житяев И.Л.¹

¹ЮФУ

e-mail: shandyba.nikita@gmail.com

Перспективным направлением развития современной электроники является создание миниатюрных вакуумных приборов, работающих на явлении автоэлектронной эмиссии, которые отличаются высоким быстродействием и повышенной помехозащищенностью. Для снижения пороговых напряжений таких устройств необходимо стримиться к минимизации межэлектродного расстояния и уменьшению радиуса закругления острия эмиттера до нанометровых значений. Формирование автоэмиссионных структур с нанометровым разрешением сопровождается рядом технологических сложностей, связанных с изготовлением нанометрового межэлектродного зазора и воспроизводимостью геометрических размеров с нанометровой точностью. Применение метода локального ионно-стимулированного осаждения проводящих материалов фокусированным ионным пучком (ФИП) Ga⁺ способствует преодолению основных ограничений традиционных методов и расширению диапазона параметров получаемых наноразмерных структур. Метод ФИП позволяет в условиях высокого вакуума производить технологические операции локального ионно-лучевого травления и ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы без необходимости применения резистов, масок и жидкостных травителей.

Целью работы является теоретическое исследование влияния геометрических параметров вакуумных автоэмиссионных ячеек с эмиттером вертикального типа, сформированного методом локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама, на форм-фактор. Латеральные габариты автоэмиссионной ячейки зависят от её диаметра. В свою очередь, диаметр автоэмиссионной ячейки влияет на межэлектродное расстояние. Моделирование проводилось в программном обеспечении с использованием метода конечных элементов. Рассмотрена структура Si/Ni/SiO₂/Ni. W-остриё выращено методом ФИП на

Si-подложке с нанесенным Ni-слоем. Ni-слой, являющийся анодом отделен от катодного Ni-слоя диэлектриком (SiO₂).

По результатам теоретических исследований получены зависимости форм-фактора на вершине эмиттера от диаметра автоэмиссионной ячейки при фиксированных параметрах наноразмерного автоэмиссионного катода. В результате моделирования для острия с радиусом закругления вершины 50 нм и высотой 1200 нм при межэлектродном расстоянии 1000 нм было получено значение форм-фактора $1,4 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$. Уменьшении межэлектродного расстояния до 200 нм способствует увеличению форм-фактора до $2,43 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Таким образом, в работе показана важность и актуальность разработки вакуумных автоэмиссионных ячеек с эмиттерами, формируемыми методом локального ионно-стимулированного осаждения вольфрама из газовой фазы. Полученные в ходе теоретического исследования данные хорошо коррелируют с известными в литературе. Дальнейшее теоретическое исследование рассмотренных наноразмерных автоэмиссионных ячеек будет способствовать оптимизации их геометрических параметров и снижению порогового и рабочего напряжения.

Работа выполнена в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (Проект № МК-1811.2019.8).

Номер проекта РФФИ: 19-29-03041 mk

Оптический отклик плазменного кристалла: от рассеяния к усилению

Горбенко И.В.¹, Качоровский В.Ю.^{1,2}, Кнап В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Лаборатория CENTERA, Польша

e-mail: spbdriiya@gmail.com

Около 25 лет назад Михаил Дьяконов и Майкл Шур показали, что протекание постоянного тока в канале полевого транзистора может стать нестабильным по отношению к возбуждению плазменных волн. В результате прибор может излучать электромагнитные волны на ТГц частотах. Нелинейные свойства плазменных волн в канале могут быть также использованы для детектирования ТГц излучение. Силу взаимодействие света и плазменных волн можно эффективно повысить, используя периодические "решетчатые" и мультитатворные структуры вместо обычного полевого транзистора. Такие структуры отлично зарекомендовали себя в качестве ТГц детекторов, и также есть первые результаты по генерации ТГц излучения. В данной работе мы рассмотрели оптический отклик на ТГц излучение такой периодической структуры на примере 1D плазменного кристалла. Были рассмотрены случаи наличия и отсутствия постоянного тока в структуре. Актуальность данной теоретической задачи заключается в недавнем эксперименте, где исследовалось прохождение ТГц излучения через решетчатую мультитатворную структуру и наблюдалось усиление оптического сигнала в присутствии постоянного тока. Мы рассмотрели простейшую модель периодически повторяющихся полос с разными электронной плотностью и плазменной скоростью: активные области с высокой плазменной

скоростью и пассивные с низкой плазменной скоростью. ТГц излучение вызывает в структуре плазменные резонансы в активных полосках. Ширина резонансных пиков определяется коэффициентом затухания и утечкой плазмонов в пассивные области. Полагая что электрон-электронные столкновения доминируют, мы получили выражение для оптического отклика в рамках гидродинамической модели, используя уравнения непрерывности и Навье-Стокса с граничными условиями, требующими непрерывности тока и потока энергии на границах между активными и пассивными областями. Решение данных уравнений демонстрирует, что плазменные колебания в активных областях затухают за счет «утечки» в пассивные области, что приводит к уширению плазменных резонансов. Мы получили аналитическое выражение для темпа джоулевой диссипации в канале, которое в отсутствие тока имеет вид узких плазменных резонансов на частоте, определяемой размером активных областей. Ширина резонансов определяется как темпом примесного рассеяния, так и утечкой плазмонов в пассивные области. Ток возбуждения приводит к красному сдвигу резонансов и к уменьшению их амплитуд. При определенном значении тока в канале диссипация меняет знак, что означает индуцированное током усиление оптического сигнала в хорошем согласии с экспериментом.

Работа поддержана РФФИ (проект 20-02-00490) и Фондом «Базис».

Номер проекта РФФИ: 20-02-00490

«Волновая механика» импульсов в коаксиальном тракте при пикосекундном переключении диодного обострителя

Иванов М.С.¹, Брылевский В.И.¹, Родин П.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: lygeon@gmail.com

В большинстве работ [1-6] пикосекундный диодный обостритель импульсов [7], основанный на явлении задержанного лавинного пробоя высоковольтного *p-n* перехода, моделировался в упрощенной электрической цепи с сосредоточенными элементами. Однако, поскольку время переключения диодного обострителя составляет величину $\Delta t < 100$ пс, реализовать столь высокое быстродействие и получить корректные экспериментальные данные о переходных процессах переключения диодных обострителей возможно только в высококачественных коаксиальных трактах, которые оказывают существенное влияние на переходной процесс переключения обострителя. Это влияние обусловлено волновыми свойствами цепей с распределенными параметрами. Соответствующие экспериментальные данные о переходных процессах изменения напряжения на обострителях и тока через них в процессе переключения были получены в работах [8-10]. Очевидно, что корректное численное моделирование переходного процесса переключения обострителя также должно выполняться для цепей с распределенными параметрами.

В настоящей работе эта задача самосогласованного описания внутренней динамики переключения обострителя и волновых процессов в измерительной схеме впервые решена для переключения единичного прибора в условиях, соответствующих эксперименту [10]. Моделировалась экспериментальная схема, в которой исследуемый лавинный обостритель помещен в разрыв центральной жилы 50-Ω коаксиального кабеля. В такой схеме падающая волна, сформированная импульсом запускающего генератора, отражается от

исследуемого обострителя, так что напряжение на приборе определяется суперпозицией падающей и отраженной волны. Коэффициент отражения, сильно меняющийся в процессе переключения, зависит от импеданса обострителя, который, в свою очередь, определяется приложенным напряжением. Выбранный способ моделирования в полной мере учитывает эту критически важную для корректного описания эксперимента взаимосвязь динамики лавинного переключения и волновых процессов в схеме с распределенными параметрами. На основе анализа падающей и отраженной волн количественно описан эффект увеличения напряжения на диоде перед переключением, отсутствующий при традиционном подходе к моделированию. Моделирование было проведено средствами программного пакета TCAD Silvaco. Последовательный учет волновых процессов в измерительном тракте вместе с предположением о неоднородном характере переключения по площади прибора впервые позволил добиться хорошего количественного согласия результатов моделирования и эксперимента [10].

Список литературы

1. Ю.Д. Биленко, М.Е. Левинштейн, М.В. Попова, В.С. Юферев, Физика и Техника Полупроводников 17, 1812 (1983).
2. А.Ф. Кардо-Сысоев, М.В. Попова, Физика и Техника Полупроводников 30(5), 803-811 (1996).
3. R. J. Focia, E. Schamiloghu, C. B. Flederman, F. J. Agee, and J. Gaudet, IEEE Trans. Plasma Sci. 25, 138 (1997).
4. H. Jalali, R. Joshi, J. Gaudet, IEEE Trans. Electron Devices 45, 1761-1768 (1998).
5. P. Rodin, U. Ebert, W. Hudsorfer, I. Grekhov, J. Appl. Phys. J. Appl. Phys, 92, 958 (2002).
6. П. Б. Родин, А. М. Минарский, И. В. Грехов, Письма в Журнал технической физики, 38(11), 78-87 (2012).
7. A.F. Kardo-Sysoev. *Ultra-Wideband Radar Technology*, ed. by J. D. Taylor (London-N.Y.-Washington, CRC Press, Boca Raton, 2001) p. 205.
8. В. И. Брылевский, И.А. Смирнова, П.Б. Родин, И.В. Грехов, 40(8), 80-87 (2014).
9. V. I. Brylevskiy, I.A. Smirnova, A.V. Rozhkov, P.N. Brunkov, P.B. Rodin, I.V. Grekhov, IEEE Transactions on plasma science, 44(10), 1941-1946 (2016).
10. V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Gutkin, P. Brunkov, P. Rodin, I. Grekhov, Journal of Applied Physics, 122, 185701 (2017).

Электронные мазеры с селективным возбуждением супермоды типа Тальбо

Oparina Yu.S.¹, Peskov N.Yu.¹, Savilov A.V.¹, Schegolkov D.Yu.¹

¹ Institute of Applied Physics, RAS

e-mail: YuliaOparina1993@yandex.ru

При реализации ТГц-электронного мазера с сильноточным релятивистским электронным пучком возникает проблема: поперечный размер СВЧ-системы значительно (в несколько десятков раз) превышает длину рабочей волны. В этой ситуации трудно обеспечить селективное возбуждение определенной поперечной моды волновода, во-первых, из-за многомодового характера электронно-волнового взаимодействия, во-вторых, из-за сложности реализации селективной узкополосной обратной связи.

Однако в сверхразмерных системах реализуется эффект Тальбо, благодаря которому несколько поперечных мод, возбуждающихся в волноводе, образуют высокочастотную супермоду [1]. Это значит, что при определенных условиях можно создать простую микроволновую систему, в которой будет поддерживаться генерация только одной супермоды. На основе многомодового набора самосогласованных уравнений электронно-волнового взаимодействия показана возможность селективного самовозбуждения супермоды рабочим электронным пучком при большой сверхразмерности (отношение поперечного масштаба электродинамической системы к длине излучаемой волны 50-100).

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект 19-12-00212.

Список литературы

1. Oparina Y S, Peskov N Y, Savilov A V, Electron rf Oscillator Based on Self-Excitation of a Talbot-Type Supermode in an Oversized Cavity 2019 *Physical Review Applied* 12 044070.

Особенности построения волоконно-оптической линии связи для передачи сигналов в радиолокационных станциях в диапазоне частот от 0.135 до 40 ГГц

Пчелкин Г.А.¹, Давыдов В.В.^{1,2}, Рудь В.Ю.²

¹СПбПУ

²ВНИИФ

e-mail: beegrig@mail.ru

В настоящее время волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) являются одним из важнейших элементов в передаче различной информации. В зависимости от места и условий их эксплуатации, например, высокоскоростные ВОЛС или передача информации по ВОЛС на предприятиях сельскохозяйственного сегмента промышленности, структура и технические характеристики волоконно-оптические линии связи различаются, несмотря на сохранение общих принципов построения передающего тракта [1-3]. Основными элементами в конструкции ВОЛС являются передающий лазерный модуль, электрооптический модулятор, приемный модуль и оптические изоляторы и разъемы. Оптические усилители могут быть использованы в зависимости от расстояния, на которое передается по ВОЛС информация.

Особое место среди ВОЛС занимают оптические линии связи для передачи различных сигналов в радиолокационных станциях (РЛС) [1-3]. В этих линиях связи для передачи используется только одномодовое волокно. Кроме того, в последнее время к ВОЛС для передачи СВЧ сигналов стали предъявлять повышенные требования по универсальности их применения для передачи СВЧ сигналов в различных диапазонах частот. По этой причине возникла необходимость для расширения возможностей использования ВОЛС разработать универсальную конструкцию ВОЛС для передачи СВЧ сигналов в диапазоне частот от 0.135 до 40 ГГц. Проведенные нами исследования показали, что наиболее целесообразно разрабатывать конструкцию ВОЛС со следующим разбиением по частотным диапазонам (0,135–1,0) ГГц, (1,0 -2,0) ГГц, (2,0-4,0) ГГц, (4,0 – 8,0) ГГц, (8,0 –12,0) ГГц, (12,0 – 18,0) ГГц, (18,0 – 26,0) ГГц, (26,0 – 40,0) ГГц. Это позволяет использовать ряд элементов, например, передающий лазерный модуль или электрооптический модулятор в

различных каналах ВОЛС для передачи СВЧ сигналов. Особенностью данной схемы построения является использование для передачи СВЧ сигналов с внешней модуляции лазерного излучения, в отличие от ранее разработанных ВОЛС, где на низких частотах до 2 ГГц использовалась прямая модуляция [3]. Так как расстояние, на которое передается оптический сигнал не превышает 300 м, то можно использовать оптические делители для введения лазерного излучения в различные каналы от одного передающего модуля. Это также является особенностью построения ВОЛС. Незначительное расстояние для передачи оптического сигнала позволяет использовать электрооптические модуляторы, работающие в широком диапазоне частот с низкими требованиями по потерям и дисперсионным характеристикам. Это позволяет также сократить количество функциональных элементов, что важно при размещении ВОЛС передающего модуля и электрооптического модулятора в экранируемом корпусе в зоне помех, например, на верхней палубе мачты морского объекта.

Так как ВОЛС будет эксплуатироваться в различных климатических условиях были проведены исследования её характеристик и параметров от температуры. Это необходимо, потому что при изменении температуры окружающей среды в оптическом волокне происходят изменения коэффициента преломления, и удлинение волокна в результате теплового расширения или сжатия. Это оказывает воздействие на фазу модуляции. Полученные результаты показали, что изменение фазы модуляции составляет не более 3.0 градусов в выбранном диапазоне температур фазы модуляции составляющую не более 3.0 градусов в выбранном диапазоне температур от -55 до 60 °С, для частот передачи сигналов в диапазоне от 0.135 до 40 ГГц. Изменение в амплитудно-частотной характеристике передаваемого сигнала при изменении температуры при такой длине ВОЛС незначительное.

Проведенные эксперименты показали, что разработанная конструкция волоконно-оптической линии позволяет существенно расширить возможности радиолокационной станции при уменьшении общего числа функциональных элементов.

Список литературы

1. Lenets V. A., New method for testing of antenna phased array in X frequency range / Lenets V. A., Tarasenko M. Yu., Davydov V. V., Rodugina N. S. Moroz A. V. // Journal of Physics: Conference Series– 2018 – 1038(1)– 012037.
2. Filatov D. L., Features of transmission at analog intermediate frequency signals on fiber – Optical communication lines in radar station / Filatov D. L., Galichina A. A., Vysoczky M. G., Yalunina T. R., Davydov V. V., Rud V. Yu. // Journal Physics: Conference Series. – 2018. – 917(8). – P. 082005.
3. Davydov V. V., Fiber-optics system for the radar station work control/ Davydov V V, Sharova N. V., Fedorova E. N., Gilshteyn E. P., Malanin K. Y., Fedotov I. V., Vologdin V. A., Karseev A. Yu. // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – 9247. – P. 712-721.

Плазменная радиофотоника для управления потоком излучения миллиметрового и субмиллиметрового спектрального диапазона

Богачев Н.Н.¹, Алексеев Е.Е.², Артемьев К.В.¹, Гусейн-заде Н.Г.¹, Казанцев С.Ю.³,
Подлесных С.В.¹, Шохрин Д.В.⁴

¹ИОФ им. А.М. Прохорова РАН

²НИИ «Курчатовский институт»

³МТУСИ

⁴МИРЭА

e-mail: bgniknik@yandex.ru

В работе [1, 2] были представлены результаты исследований лазерных полупроводниковых плазменных антенн, которые могут быть перспективны в системах спутниковой связи и при построении наземных высокоскоростных систем беспроводной связи. Кроме того, в [1] была также предложена концепция создания материалов с управляемым поглощением в области СВЧ и ТГц спектральных диапазонов, что представляет значительный интерес при разработке медицинских устройств, а также для построения эффективных систем контроля безопасности.

В докладе предложены несколько конструкций активных плазменных систем на основе композиционных полупроводниковых радиофотонных структур для управления потоком излучения субмиллиметрового спектрального диапазона. В основе этих конструкций периодические структуры из кварцевых световодов с тонкой оболочкой из полупроводниковых и диэлектрических материалов. С помощью волокна к некоторым элементам структуры подводится лазерное излучение и в них формируется плазма за счет явления внутреннего фотоэффекта. Концентрация плазмы будет функцией от мощности падающего излучения. Энергетические затраты на формирование электрон-дырочной плазмы довольно низкие, например, в Ge – около 0.67 эВ), что заметно меньше энергетических затрат для создания электрон-ионной пары в газе. С помощью такого подхода могут создаваться плазменные дифракционные решетки, линзы Френеля, линзы с изменяемой фокусировкой, системы отклонения излучения на произвольный угол). В докладе представлены результаты численного моделирования динамики формирования лазерной полупроводниковой плазмы в таких структурах, изготовленных на основе Ge. Проведена экспериментальная демонстрация предложенного подхода для управления потоком СВЧ излучения с $\lambda=8$ мм.

Список литературы

1. Богачев Н.Н., Гусейн-заде Н.Г. и др. // *Письма в ЖТФ*, Том 45 (24), 6-9, 2019
2. Bogachev N.N. et al. // *Proc. SPIE*, V. 11322, 113221P, 2019.

Исследование радиационного образования (плазмоида) в воздушной среде радиолокационным методом

Фадеев В.Б.^{1,2}, Фадеев И.В.^{1,2}, Васильев Д.А.², Давыдов В.В.^{2,3}, Рудь В. Ю.³

¹СПбПУ

²АО «Концерн «Гранит-Электрон»

³ВНИИФ

e-mail: v21.07.96@mail.ru

В настоящее время постоянно происходит радиоактивное загрязнение атмосферы и поверхности Земли [1-2]. Это связано с развитием атомной энергетики, увеличением числа промышленных предприятий, использующих технологии с применением радиоактивных элементов. Наиболее опасными считаются выбросы в атмосферу. Они способны перемещаться на большие расстояния при сильном ветре достаточно быстро с последующим выпадением в виде осадков в зонах, где отсутствуют специальные средства защиты от радиации и т.д. Это может привести к массовой гибели различных живых организмов [3].

Для контроля состояния окружающей среды, особенно в непосредственной близости к радиоактивно опасным объектам, используются методики, большинство из которых обладают недостатками [1, 2]. Нередко возникают ситуации, в которых ряд методик анализа окружающей среды и приборов неприменим.

Радиолокационные методы считаются универсальными для мониторинга окружающей среды, при их использовании на больших безопасных расстояниях можно исключить риски, связанные с заражением техники и персонала от радиации.

Находящиеся в настоящее время в эксплуатации РЛС для решения этих задач постоянно требуют улучшения характеристик и расширения функциональных возможностей. Модернизация различных блоков РЛС, разработка новых алгоритмов обработки информации, изменение системы построения антенн в РЛС является актуальной задачей. Один из вариантов модернизации представлен в данной работе.

Предложенные ранее исследования показали, что при радиоактивном выбросе в атмосферу образуются ионизационные образования – плазмоиды [1, 2, 4]. В этих образованиях плотность и показатель преломления отличны от других воздушных образований в атмосфере. Кроме того, плазмоиды возникают в непосредственной близости от заражённых растений [3, 4]. Данные образования отражают СВЧ-излучение, что позволяет установить наличие радиоактивного заражения в воздушной среде. Обнаружение возможно почти при любых погодных условиях, за исключением сильного ветра, который способен разогнать (рассеять) исследуемое облако при его формировании. При высоком уровне мощности излучения можно контролировать стадию формирования плазмоида. Проведенные исследования, показавшие, что коэффициент отражения излучения R от плазмоидов зависит от величины экспозиционной дозы облучения $R_{обл}$ и длины волны λ излучения, также он зависит от состава радиоактивных частиц, которые принимали в формировании плазмоида.

Для решения задач расширения возможностей исследования плазмоида, особенно определения состава радиоактивных частиц в плазмоиде нами была разработана новая конструкция РЛС. Излучающая и приёмная антенны разделены: излучающей является параболическая антенна, установленная на вращающейся в диапазоне 360 градусов опоре. В качестве приёмных используются спиральные антенны (восемь антенн с диаграммой направленности в 60 градусов каждая, расположенных по кругу на равном расстоянии друг от друга). Это позволит осуществлять перестройку частоты излучающей антенны.

Приёмные антенны не зависят друг от друга, поэтому при выходе из строя одной приёмной антенны работоспособность комплекса не нарушится. На вход приёмных антенн поступает отраженный сигнал малой мощности. Для того, чтобы при использовании РЛС в зоне высоких электромагнитных помех сигнал был передан в устройство обработки от приёмных антенн без значительных искажений, в приёмном тракте РЛС используются ВОЛС на основе ранее используемых аналогов [5-7].

Предложенная нами конструкция РЛС позволила увеличить разрешающую способность РЛС при исследовании радиоактивных загрязнений малых размеров, в зонах повышенной электромагнитной активности. Использование разработанной РЛС позволяет исследовать при сканировании длины волны λ СВЧ-излучения структуру плазмоида, что ранее было затруднено по причине низкой чувствительности приёмных элементов. Данная информация необходима для прогнозирования поведения плазмоида в окружающей среде и планирования мероприятий по его дезактивации до выпадения в виде осадков.

Список литературы

1. Боярчук К. А. Радиолокационное обнаружение областей локальной ионизации в приземный слоях атмосферы / Боярчук К. А., Кононов Е. Н., Ляхов Г. А. // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19. -№ 6. – P. 67-72.
2. Elokhin A.P. Estimate of the emission rate of radioactive rare gases during an unanticipated accident at a VVER-1500 reactor / Elokhin A.P., Rau D.F., Berkovich V.M., Vinogradov A.P., Zhilina M.V. // Atomic Energy. – 2008. – Vol. 104(1) – P. 62-76.
3. Novikova O.V. Analysis of the change impact in the share of generation from HPPs in the structure of the unified power system energy balance to residential tariff / Novikova O.V., Grushkin A.N., Khrebtenko I.S., Yudina N.A. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 288(1) – 012065.
4. Elokhin A.P. Estimate of the emission rate of radioactive rare gases during an unanticipated accident at a VVER-1500 reactor / Elokhin A.P., Rau D.F., Berkovich V.M., Vinogradov A.P., Zhilina M.V. // Atomic Energy. – 2008. – Vol. 104(1) – P. 62-76.
5. Pchelkin G. A. Features of the transmission of microwave signals at offshore facilities / Pchelkin G. A., Fadeenko V.B. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368(2). – P. 022045.
6. Podstrigaev A.S. Features of Transmission of Intermediate Frequency Signals over Fiber-Optical Communication System in Radar Station / Podstrigaev A.S., Davydov R.V., Rud V.Y. // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11118 LNCS – P. 624-630.
7. Fadeenko V.B. New design of fiber-optic communication line for the transmission of microwave signals in the X-band / Fadeenko V. B., Kuts V. A., Vasiliev D. A. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1135(1) – P. 012053.

ПРИМЕСИ И ДЕФЕКТЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

First-principles calculation of possible carbon positions over cementite (Fe_3C) lattice

Okishev K.Yu.¹, Verkhovykh A.V., Mirzayev D.A., Mirzoev A.A.

¹South Ural State University

e-mail: k.okishev@inbox.ru

Iron carbide Fe_3C (cementite) is one of the most important phases in irons and steels. It has an orthorhombic crystal lattice belonging to the space group Pnma. Its unit cell consists of 4 formula units, viz. 16 atoms. Fe atoms occupy two non-equivalent positions termed G and S (from 'general' and 'special') filled in the proportion 2:1, that are well established.

However what concerns C atoms, the situation is no so clear. Even in the early works on X-ray study of the cementite structure (like Lipson and Petch, 1940) two possible positions were proposed that are both surrounded by six Fe atoms in prismatic or octahedral environment. Later works supported either of the two variants, but finally the 'prismatic' variant of C location has become prevalent in the literature.

But in the last years new facts re-initiated this old discussion. New data obtained by fine methods like NGR, EELFS and results of computer experiments using *ab initio* and MD methods revealed that C atoms are able to shift from prismatic interstices of the Fe sublattice to other ones.

Since Lipson and Petch, only two types of such interstices were considered, with centres lying at $z=1/4$ and $z=0$. But in our work [1] it was shown from crystal geometry considerations that in fact there are four, not two types of interstitial sites that C would be able to occupy. Unlike sites at $z=1/4$ with interatomic distance $R=1.99\text{--}2.04$ and at $z=0$ with $R=1.80\text{--}1.87$ Å that we termed 'normal' prismatic and octahedral sites (NP, NO) the new found sites were termed 'distorted' prismatic and octahedral ones (DP, DO). They lie at the same z 's but have different radius and Fe neighbourhood: 4 nearest Fe atoms at $R=1.62$ Å and 2 at $R=1.25$ Å respectively. It was also proposed that some C atoms may occupy these positions, first, because this increases the configurational entropy of the system, and second, because if a C atom occupies a 'distorted' site it has less Fe atoms to shift.

In this work this hypothesis was checked out by direct *ab initio* calculation. All calculations were made using WIEN2k software package implementing the FP-LAPW method with GGA'96 at the Tornado complex of the Supercomputer centre of the South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation). Calculation parameters were: $K_{\max}=5$ a.u.⁻¹; $R_{\text{mt}}(\text{Fe})=2.00$ a.u., $R_{\text{mt}}(\text{C})=1.45$ a.u.; $E_{\text{cut}}=-7.0$ Ry (340 eV). Accuracy of calculation was below 0.01 eV. The supercell used was a single 16-atom unit cell of cementite with fully relaxed structural parameters in which one or all C atoms were placed in some other sites than NP sites, after which a new structural relaxation was performed.

Results are as follows. Location of C atoms on NO sites retains the stability of the system, but its energy increases by 0.233 eV and volume by 3.59 % (1 of 4 C atoms on NO sites) or by 0.267 eV and 9.19 % (all 4 C atoms on NO sites), respectively.

The structure with 1 of 4 C atoms on DP site is stable but has the energy greater by 0.452 eV and the volume by 3.75 % compared to initial structure with all C atoms on NP sites.

Other investigated structures (4 C atoms on DP sites, 1 or 4 atoms on DO sites) were found to be mechanically unstable and to collapse spontaneously to the normal structure with all C atoms occupying NP sites.

Elementary thermodynamic estimates show that the found excess energies of C atoms located on NO and DP sites permit up to 30 % of all C atoms disperse among NO and DP positions at 1500 K (which is close to cementite melting temperature), and up to 20 % at 1000 K (the equilibrium eutectoid temperature in steels).

Of course, these results need further study and refinement, but still they are an evidence that C atoms may change their interstitial positions over the Fe sublattice of cementite, Fe_3C , and the latter may be thus considered not only a chemical compound, but a specific sort of solid solution as well.

The work was supported by the Russian Foundation of Basic Research (grant no. 13-02-00048).

Список литературы

1. V.M.Schastilivtsev, I.L.Yakovleva, D.A.Mirzaev, K.Yu.Okishev. On the Possible Positions of Carbon Atoms in the Cementite Lattice. // The Physics of Metals and Metallography, 2003, v. 96, No. 3, pp. 313–320.

Номер проекта РФФИ: 13-02-00048

Формирование, структура и электрофизические свойства термомиграционных легированных галлием кремниевых каналов

Ломов А. А.¹, Середин Б. М.², Мартюшов С. Ю.³, Заиченко А. Н.², Шульпина И. Л.⁴

¹ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

²ЮРГПУ(НПИ)

³ТИСНУМ

⁴ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: andlomov@mail.ru

Формирование методом термомиграции (ThM) [1] вертикальных *p*-каналов в монокристаллических пластинах кремния имеет ряд неоспоримых преимуществ. К ним нужно отнести постоянную концентрацию легирующей примеси по глубине легирования, широкий диапазон концентраций примеси, малое время процесса ThM, резкость *p-n* перехода канал-матрица пластины. Существует возможность менять аспектное соотношение ширины канала к его длине в процессе его формирования [2]. Особенности процесса ThM позволяют его применить при производстве как силовых приборов, так и элементов микроэлектроники.

В методе ThM наиболее технологически удобной лигатурой кремния является алюминий, позволяющий достичь концентрации $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В [3] было показано, что диапазон концентрации акцепторов примеси в ThM *p*-слоях может быть расширен за счет

использования в качестве лигатуры атомов галлия. Однако физические свойства галлия создают ряд технических проблем, которые затрудняют его использование в методе ThM.

Целью данной работы стала разработка процесса формирования в монокристаллической пластине кремния легированных Ga массива p -каналов, а также исследование их структурных и электрических свойств. Нами предлагается (в отличие от технологии на основе Al) для формирования кремниевых каналов на основе лигатуры Ga использовать высокодисперсный порошок с размером частиц около 10 мкм. Результаты исследований приведены в сравнении со свойствами ThM каналов кремния, полученных на основе лигатуры Al.

Для получения каналов кремния с лигатурой галлия на поверхности кремниевой пластины предварительно формируется защитное оксидное покрытие, вскрываются окна необходимой топологии и последующим химическим травлением в кремнии создаются углубления. Подготовленные пластины протягиваются под тиглем с порошком галлия, который попадает в углубления на поверхности пластины. После переноса пластины с галлием в нагревательный узел порошок плавится и растекается по углублениям. Плавление предназначено для «закрепления» галлия в углублениях пластины кремния перед началом процесса термомиграции [4].

Обработка технологии формирования галлиевых зон проводилась на пластинах Si(111) n -типа с удельным сопротивлением 4.5 Ом см. Сформированные травлением на поверхности пластин углубления в виде параллельных полос имели ширину 100 мкм и глубиной ~50 мкм. Процессы заполнения углублений порошком галлия и его плавление проводился в вакууме при температуре ~350 К. При отработке методики формирования в углублениях пластины сплошных галлиевых зон были выявлены причины, приводящие к их дефектности: неполному заполнению углубления шихтой; налипанию порошка на маскирующее покрытие, а также неравномерному заполнению углубления. В работе показано, что наблюдаемые дефекты зон связаны с размером частиц, температурой подогрева тигля, скоростью движения пластин.

Анализ структурного совершенства ThM слоев для образцов со стабильно движущимися жидкими зонами был выполнен рентгеновскими методами двух- и трехкристалльных кривых дифракционного 333 отражения с использованием медного излучения; проекционной топографией по методу Ланга на серебряном излучении. Типичным видом структурных дефектов вблизи каналов являются дислокации. Определены величины деформаций (10^{-5} - 10^{-4}) в каналах и изгибов (10-15 угл.с) кристаллических плоскостей вблизи границ канал- матрица пластины.

Проведены экспериментальные исследования электрофизических свойств полученных вертикальных p -каналов Si(Ga) и Si(Al). Установлено, что их электропроводность (~0.02 Ом см) пропорциональна концентрации примеси в канале и аспектному отношению ширины канала к его длине. Оценена барьерная емкость примыкающих к ним p - n переходов, ее значения лежат в диапазоне 10-100 пФ.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 9-07-00306, Государственного задания ФТИАН имени К.А. Валиева РАН по теме № 0066-2019-0004. Работа Шульпиной И.Л. выполнена в рамках госзадания Отделения физики диэлектриков и полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Список литературы

1. Лозовский, В.Н. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.

2. Lozovskii, V.N., Lomov, A.A., Lunin, L.S., Seredin, B.M., Chesnokov, Y.M. Crystal defects in solar cells produced by the method of thermomigration (2017) *Semiconductors*, 51 (3), pp. 285-289
3. Seredin, B.M., Kuznetsov, V.V., Lomov, A.A., Zaichenko, A.N., Martyushov, S.Y. Precision silicon doping with acceptors by temperature gradient zone melting (2019) *Journal of Physics: Conference Series*, 1400 (4), № 044012
4. Оборудование для получения кремниевых структур методом термомиграции. В.Н. Лозовский, Б.М. Середин, А.С. Полухин, А.И. Солодовник. // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. 2015. №5 (239). С.65-76.

Номер проекта РФФИ: 19-07-00306

Прочность входных и выходных камер, коллекторов, теплообменных трубок аппаратов воздушного охлаждения газа и определения продление ресурса

Савельев В.Н.¹, Махмудов Х.Ф.¹

¹ФТИ

e-mail: 9213706717@mail.ru

Исследованы аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. Эти аппараты предназначены для охлаждения технологического газа. Анализ технической документации проводился с целью установления номенклатуры подлежащих контролю параметров технического состояния, выявления имевших место отказов и повреждений и участков элементов, дефектность которых может привести к отказу. Используемая методика акустической эмиссии (АЭ) показала наиболее полную и прямую информацию о развитии (степени опасности) дефектов в материале эксплуатируемых объектов. АЭ контроль может применяться в качестве определяющего для выработки критериев состояния различных сооружений и допуска к дальнейшей эксплуатации промышленных объектов (обеспечивая при этом необходимый уровень безопасности на время их работы), поскольку при АЭ контроле дефект может быть обнаружен на ранней стадии развития [1] При применении метода АЭ с целью разработки технологии контроля конкретных объектов решены сложные вопросы, связанные с явлением формирования упругих волн от развивающихся трещин и трансформации этих волн при распространении от трещин до датчиков [2]. Разрушение нагруженного тела является процессом сложным, чтобы исследовать этот процесс, его закономерности, характерные стадии, последовательность стадий, в развитии (степени опасности) дефектов и учитывая особенность материала и эксплуатации объекта АВО, применены различные методы [3]. Контроль производился приборами (толщиномер ультразвуковой БУЛАТ 1М, твердомер 54-359М, дефектоскоп ультразвуковой А1214 ЭКС-ПЕРТ, зав. №: 205125), но заключение о состоянии объекта было дано только после того, как применен метод АЭ. Минимально допустимые значения толщин элементов выбраны согласно методике определения остаточного ресурса АВО газа, эксплуатируемых на компрессорных станциях РАО «Газпром» и расчета по СНиП 2.05.06-85. В нижнем кольцевом сварном шве АВО газа в одном (ст.№201) обнаружен дефект, других дефектов в металле сварных соединений обследованных аппаратов АВО (ст. №№ 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208), препятствующих их дальнейшей эксплуатации, не выявлено. Заключение о

возможности дальнейшей эксплуатации аппарата, сделано по результатам обследования АВО газа методом АЭ.

Список литературы

1. Савельев В. Н., Махмудов Х. Ф. ЖТФ, 90, 143-148, 2020
2. Махмудов Х. Ф. Успехи современного естествознания, 10, 73-78, 2019
3. Makhmudov Kh. F., J. Phys.: Conf. Ser., v.1400, 7 ArtNo: #077057, 2019

Термоэдс горячих носителей тока в нелегированных и легированных кристаллах слоистого полупроводника n-InSe

Бабаева Р. Ф.¹, Абдинов А.Ш.²

¹UNEC, ² Бакинский Государственный Университет,

e-mail: babaeva-rena@yandex.ru

В сильных электрических полях в полупроводниках наблюдаются различные эффекты, в том числе возникновение термоэдс горячих носителей тока. К настоящему времени этот эффект исследован лишь в пространственно однородных кристаллических полупроводниках с большой подвижностью носителей тока, а в пространственно неоднородных кристаллических полупроводниках с хаотическими крупномасштабными дефектами не рассматривался. Анализ существующих работ показывает, что в широком диапазоне изменения внешних условий влияние хаотических крупномасштабных дефектов на электронные процессы в таких полупроводниках является доминирующим. Поэтому, не изменяя флуктуации электронного потенциала, обусловленные ими, путем изменения эффективной температуры носителей тока, т.е. разогревая их сильным электрическим полем, можно получить ценную информацию об электронных процессах и роли хаотических крупномасштабных дефектов в кристаллических полупроводниках. Ранние исследования показали, что одним из таких полупроводников могут быть нелегированные специально высокоомные ($\rho_{T0} \geq 5 \cdot 10^4$ Ом·см) и легированные редкоземельными элементами с содержанием $N \leq 10^{-2}$ ат.% монокристаллы слоистого полупроводника – селенида индия (n-InSe). В данной работе представлены результаты, полученные при исследовании термоэдс горячих носителей тока в нелегированных образцах с различным исходным (при 77К) темновым удельным сопротивлением ($2 \cdot 10^3 \leq \rho_{T0} \leq 5 \cdot 10^6$ Ом·см) и легированных эрбием (Er) с $10^{-5} \leq N \leq 10^{-1}$ ат.% образцах n-InSe. С целью исключения влияния эффектов, обусловленных инжекцией и вытягиванием носителей заряда через токовые контакты, джоулевым нагревом исследуемого образца, неоднородным распределением греющего носители тока электрического поля в образце на полученные результаты, разогрев носителей тока был осуществлен редко повторяющимися (с частотой 6÷7 Гц) импульсами электрического поля со сверхвысокой (10^{10} Гц) частотой (СВЧ). Измерения проводились при $T_0 = 77 \div 300$ К и $\hat{E} = 5 \cdot 10^1 \div 4 \cdot 10^3$ В/см.

Установлено, что в обеих группах исследуемых образцов независимо от ρ_{T0} и N , при \hat{E} больше некоторого критического ($\hat{E}_{кр}$) наблюдается термоэдс горячих носителей тока, абсолютная величина ($|U_T|$) которого зависит от ρ_{T0} , N , T_0 и \hat{E} . В нелегированных низкоомных ($\rho_{T0} \leq 10^4$ Ом·см) и легированных с $N > 10^{-2}$ ат.% кристаллах зависимость $|U_T|(\hat{E})$ подчиняется степенным законам $|U_T| \sim \hat{E}^2$ и $|U_T| \sim \hat{E}$ в слабо- и сильногреющих электрических полях, соответственно. В нелегированных высокоомных ($\rho_{T0} \geq 5 \cdot 10^4$ Ом·см) и легированных

с $10^{-5} \leq N \leq 10^{-1}$ ат. % образцах в области низких температур и относительно слабогреющих электрических полях зависимость $|U_T|(\hat{E})$ подчиняется более резкому степенному закону $|U_T| \sim \hat{E}^{\kappa}$ (где $2 < \kappa \leq 5$). При $T_0 \leq 250$ К с ростом N от 10^{-5} до 10^{-1} ат. % значение κ меняется немонокотонно и проходит свой максимум при $N = 5 \cdot 10^{-4}$ ат. %, а при более высоких T_0 для всех исследуемых образцов зависимость $|U_T|(\hat{E})$ состоит из начального квадратичного и последующего линейного участков.

Показано, что полученные при $T_0 > 250$ К во всех исследуемых, а также в области низких температур в нелегированных низкоомных и легированных с $N > 10^{-2}$ ат. % образцах зависимость $|U_T|(\hat{E})$ подчиняется теории термоэдс горячих носителей тока в пространственно однородных кристаллических полупроводниках. Для объяснения же результатов, полученных в нелегированных высокоомных и легированных с $10^{-5} \leq N \leq 10^{-1}$ ат. % образцах при $T_0 \leq 250$ К, необходимо учитывать также влияние крупномасштабных хаотических дефектов.

Предложена модель, качественно объясняющая совокупность полученных экспериментальных результатов.

Сегнетоэлектрик триглицинсульфат с примесью кроконовой кислоты

Свинарев Ф. Б.¹, Балашова Е.В.¹, Левин А.А.¹, Золотарев А.А.², Старухин А.Н.¹,
Кулаченков Н.К.³, Панкова Г.А.⁴, Кричевцов Б.Б.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГУ

³Университет ИТМО

⁴ИВС РАН

e-mail: svinarev@mail.ioffe.ru

Триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$, (TGS) является классическим сегнетоэлектриком с температурой сегнетоэлектрического перехода $T_c = 49$ °С и спонтанной поляризацией $P_s \sim 2\text{--}3$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ [1]. Благодаря сильному температурному изменению поляризации ниже фазового перехода, кристаллы TGS нашли применение в качестве элементов пироэлектрических датчиков. В этой связи активно исследуется влияние различных примесей (в том числе полярных молекул) на свойства TGS. Было показано, что примеси могут уменьшить деполяризующие поля и вызвать появление униполярности [2, 3]. В настоящей работе приводятся результаты первых исследований кристаллов TGS с примесью молекул кроконовой кислоты $\text{C}_5\text{H}_2\text{O}_5$ (СА). Выбор кроконовой кислоты обусловлен тем, что молекулы СА обладают большим дипольным моментом ~ 10 D и в монокристаллах кроконовой кислоты наблюдается сегнетоэлектричество при комнатной температуре с рекордной величиной спонтанной поляризации $P_s \sim 20$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.

Монокристаллы и пленки TGS:СА были выращены методом испарения из водного раствора смеси триглицинсульфата и кроконовой кислоты. Кристаллы TGS:СА имеют размеры порядка нескольких миллиметров, их цвет меняется от прозрачного к желто-коричневому по мере увеличения концентрации кроконовой кислоты. Пленки TGS:СА, толщиной несколько микрон, выращивались на диэлектрических подложках различного состава с встречно-штыревой системой электродов, что позволяло измерять диэлектрическую

проницаемость, удельную электропроводность и петли диэлектрического гистерезиса. Аналогично были выращены монокристаллы и пленки чистого TGS.

Присутствие молекул крононовой кислоты в образцах TGS:CA было подтверждено анализом спектров комбинационного рассеяния света, а также инфракрасных и оптических спектров поглощения. Большинство линий в КР- и ИК-спектрах образцов TGS:CA соответствуют внутримолекулярным колебаниям глицина, однако в них явно проявляются слабые линии, соответствующие колебаниям CA.

Рентгенодифрактометрические исследования монокристаллов TGS:CA и полученных из них порошков показали, что внедрение примеси крононовой кислоты приводит к незначительному уменьшению параметров решетки при неизменной кристаллической структуре триглицинсульфата.

Исследования люминесценции в образцах CA, TGS и TGS:CA показали, что под воздействием лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 405$ nm в TGS:CA наблюдается сильная полоса люминесценции с максимумом при $\lambda = 500$ nm, которая сдвигается в область $\lambda = 600$ nm при возбуждении светом $\lambda = 532$ nm. Такая люминесценция не наблюдается в кристаллах TGS и CA и обусловлена присутствием примеси крононовой кислоты в TGS:CA. Генерация второй оптической гармоники в TGS:CA при возбуждении световыми импульсами с $\lambda = 1050$ nm длительностью 150 fs и частотой следования 80 MHz в TGS:CA выражена сильнее, чем в TGS, но на три порядка слабее, чем в кристаллах CA.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости образцов TGS:CA демонстрирует максимум $\epsilon_{\max} \sim 300$ при сегнетоэлектрическом фазовом переходе. Этот максимум слабее и более размыт, чем в кристаллах чистого TGS. Константа Кюри-Вейса в образцах TGS:CA не превышает 700 K. Температура максимума диэлектрической проницаемости в TGS:CA ниже, чем в чистом TGS, варьируется от образца к образцу, может опускаться до T_c 41 °C. Ниже температуры сегнетоэлектрического фазового перехода наблюдаются асимметричные петли диэлектрического гистерезиса с переключаемой поляризацией $\sim 0,1$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Смещение петли объясняется наличием внутреннего поля ~ 400 V/cm. Приложение сильного переменного электрического поля при температуре выше фазового перехода приводит к симметризации петли в сегнетоэлектрической фазе и незначительному увеличению переключаемой поляризации. Отжиг кристалла также сопровождается приближением температуры фазового перехода к температуре перехода в TGS. Удельная электропроводность пленок TGS:CA составляет $\sim 10^{-4}$ S/m при комнатной температуре, что превышает электропроводность пленок TGS [6].

Список литературы

1. В.Т. Mattias, С.Е. Miller, J.P. Remeika // *Physical Review*, 104, 849 (1956);
2. Н.В. Alexandru // *Ann N Y Acad Sci*, 1161:387-96 (2009);
3. Chitharanjan Rai, В. Narayana Moolya, S.M. Dharmaparakash // *Physica B*, 406, 1-7 (2011);
4. S. Horiuchi et. al. // *Nature*, 463, 789 (2010);
5. R. Sawada et. al. // *Appl. Phys. Lett.*, 102, 162901 (2013);
6. Е.В. Балашова, Б.Б. Кричевцов, В.В. Леманов // *ФТТ*, 52, 1, 119-123 (2010).

Эволюция дефектной структуры в процессе релаксации системы Pd-Y-N

Акимова О.В.¹, Велигжанин А.А.², Светлогоров Р.Д.², Бурханов С. Г.³, Горбунов С.В.³, Рошан Н.Р.³

¹МГУ им. М. В. Ломоносова

²НИЦ Курчатовский институт

³ИМЕТ РАН

e-mail: akimova@physics.msu.ru

Обратимое легирование металлических сплавов водородом влияет на структурочувствительные характеристики этих материалов, однако прогнозирование последствий этого процесса до сих пор является нерешенной проблемой. Сложности обеспечиваются двумя аспектами: (а)-фазовыми превращениями и сопровождающими их сложными механизмами преобразования дислокационной структуры на межфазных границах [1], (б)-влиянием окклюдированного металлом-поглотителем водорода на перераспределение диффузионных процессов в структуре, взаимодействием с дефектами кристаллической решетки сплава и образование новых [2].

Данная работа посвящена сравнительному анализу эволюции дефектной структуры диффузионных фильтров-мембран системы Pd-Y-N в процессе длительной релаксации при комнатной температуре и давлении после гидрирования из газовой фазы. Легирование палладия иттрием улучшает прочностные характеристики мембран и показатель водородопроницаемости [3, 4], что обусловило актуальность исследований указанной системы и цель работы-повышение стабильности микроструктуры металлических сплавов при внедрении водорода.

По изменениям физического размытия дифракционных максимумов исследовано преобразование дислокационной структуры в процессе релаксации системы Pd-Y-N. Сравнительный анализ интегральных интенсивностей рентгеновских дифракционных максимумов для двух порядков отражения от семейства плоскостей (100) и (111) позволил обнаружить изменения превалирующего в исходном сплаве (до гидрирования) влияния дефектов первого класса. Показаны основные этапы перестройки дислокационной структуры на этапе $\beta \leftarrow \alpha$ превращений.

Обнаруженные общие черты и различия деформационных процессов в структуре мембран с приведенными в литературе [5] для литых образцов палладия, легированного самарием, ставят вопрос уточнения влияния водорода на развитие дефектов и влияния особенностей легирующих элементов. Атомы самария и иттрия имеют схожий размер, 1.81 Å и 1.78 Å, существенно отличающийся от атомов палладия, 1.37 Å, что подразумевает возможность близких по величине дилатационных искажений кристаллической решетки сплавов и подобные многостадийные схемы эволюции дефектов. Вопрос остается открытым и требует дальнейшего накопления и систематизации экспериментальных данных.

Список литературы

1. Э.В. Козлов, Л.И. Тришкина, Н.А. Попова, Н.А. Конева. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации. Физическая мезомеханика. 14. 3. (2011). С. 95-110.
2. А.К. Belyaev, V.A. Polyanskiy, Y.A. Yakovlev. Stresses in a pipeline affected by hydrogen. Acta Mech. 223. (2012). P. 1611–1619.
3. Г.С. Бурханов, Н.Б. Горина, Н.Б. Кольчугина, Н.Л. Кореновский, Н.Р. Рошан, Д.И. Словецкий, Е.М. Чистов / Сплавы палладия с редкоземельными металлами –

- перспективные материалы для водородной энергетики // Тяжелое машиностроение. (2007). 11. С. 17-20.
4. N.A. Al-Mufachi, N.V. Rees, R. Steinberger-Wilkens. Hydrogen selective membranes: A review of palladium-based dense metal membranes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 47. (2015). P. 540-551.
 5. Г.П. Ревкевич, М.А. Князева, М.К. Миткова. Дефектная структура и индуцируемый наводороживанием распад сплава Pd-5.8ат.% Sm. *Вестник Моск. Ун-та. Сер.3.* (1995). 36. 1. С. 40-45.

Влияние сульфидной пассивации на оптические и электронные свойства n-InP

Иванова Е.В.¹, Дементьев П.А., Львова Т.В., Лебедев М.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: ivanova@mail.ioffe.ru

Полупроводники III-V, такие как InP и GaAs, исследуются более 50 лет и находят применение во многих электронных устройствах. Например, InP продемонстрировал большой потенциал для создания гетероструктурных биполярных транзисторов и транзисторов с высокой подвижностью электронов, главным образом за счет большой внутренней подвижности носителей заряда. Рост слоев InP на неподготовленной подложке InP методом молекулярно-пучковой эпитаксии для создания приборов затруднен, так как поверхность кристалла покрыта трудноудаляемыми нестехиометрическими оксидами, оказывающими существенное влияние на механизм зародышеобразования и кристаллизации. Поэтому процесс предэпитаксиальной подготовки поверхности подложки и её очистки от оксидов становится ключевой задачей. Кроме того, оксиды на поверхности InP создают дефекты на границе с полупроводником, которые могут являться ловушками носителей заряда. Ловушечные уровни оказывают сильное влияние на характеристики и надежность устройств. Перспективным методом удаления оксидов с поверхности полупроводников A^3B^5 является химическая пассивация, в результате которой происходит удаление оксидов, а на поверхности формируется слой химически инертного материала. Одним из таких методов является сульфидная пассивация, включающая в себя обработку поверхности полупроводника сульфидными растворами [1]. В данной работе подложки InP с различным уровнем легирования были подвергнуты пассивации в водном растворе Na_2S при комнатной температуре в течение 10 минут. Образцы до и после пассивации были исследованы методом атомно-силовой микроскопии и Кельвин-зонд микроскопии. Было показано, что при таких условиях пассивации во всех образцах происходит уменьшение шероховатости поверхности более чем в 2 раза, и значительно увеличивается однородность потенциала на поверхности. Образцы были исследованы методом катодолуминесценции и получены динамики интенсивности катодолуминесценции и поглощенного тока. Такой подход позволяет определять наличие ловушек в исследуемых образцах и их влияние на люминесцентные свойства [2]. Также такой подход позволяет определять тип ловушек, их относительное содержание и вероятность локализации заряда. Было показано, что пассивация приводит к существенному увеличению однородности катодолуминесценции. Обнаружено, что в зависимостях поглощенного тока наблюдается только затухание, что говорит

о том, что в данном образце при температуре 77К наблюдается локализация положительного заряда. Время затухания этого процесса не зависит от пассивации, что говорит о том, что локализация заряда происходит в InP. Однако на исходных образцах в некоторых областях наблюдался вклад второй экспоненты, которая может быть связана с другим типом ловушек. Природа этих ловушек подлежит дальнейшему исследованию. В динамике интенсивности катодолюминесценции во всех случаях наблюдаются два конкурирующих процесса. Разгорание со временем аналогичным времени затухания поглощенного тока и затухание с гораздо более длительным временем. Скорее всего, разгорание связано с локализацией заряда, а затухание люминесценции с нарастанием контаминационной пленки. Следует отметить, что разгорание наблюдается как для краевой, так и для дефектной люминесценции, что говорит о том, что захват ловушками дырок приводит к уменьшению вероятности безызлучательной рекомбинации. Так как процесс разгорания наблюдается только при температуре 77К и не наблюдается при комнатной температуре, можно предположить, что энергия активации этих ловушек мала. Часть результатов, приведенных в докладе, получена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-03-00523)

Список литературы

1. М.В. Лебедев, Т.В. Львова, А.Л. Шахмин, О.В. Рахимова, П.А. Дементьев, И.В. Седова // ФТП, т.53, 7 стр.908-916 (2019).
2. П.А. Дементьев, Е.В. Иванова, М.В. Заморянская // ФТТ, т.61, 8 стр. 1448-1454 (2019).

Номер проекта РФФИ: 20-03-00523

Эмиссионные свойства текстурированного нитрида галлия с высокой плотностью дефектов упаковки

Мынбаева М. Г.¹, Ситникова А.А.¹, Кириленко Д.А.¹, Мынбаев К.Д.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе ²Университет ИТМО

e-mail: mgm@mail.ioffe.ru

Современный уровень технологий выращивания объемных монокристаллов GaN позволяет получать подложки с размером, актуальным для промышленного использования. В настоящее время для решения этой задачи широко используется метод хлорид-гидридной эпитаксии (ХГЭ), позволяющий выращивать эпитаксиальные слои миллиметровой толщины. В качестве подложек используются пластины из неродственных полупроводниковых материалов. Так называемый «квазиобъемный GaN» получают с использованием лазерного отделения от подложек, или метода отделения, реализуемого при формировании «ослабленной» границы GaN/подложка. Ранее нами было показано, что пластины GaN большой площади могут быть получены методом ХГЭ на керамической подложке. Процесс нуклеации материала на такой подложке имел существенные отличия от процесса нуклеации на традиционных подложках и происходил с участием жидкой фазы, в результате чего выращенный материал свободно отделялся от керамической поверхности. Материал пластин являлся полупроводником с электронным типом проводимости; теплофизические и механические свойства материала были близки к свойствам монокристаллического GaN, получаемого объемными методами роста [1]. В настоящей

работе представлены результаты детального исследования структурных свойств полученного квазиобъемного нитрида галлия и их влияния на эмиссионные свойства. Методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были проведены исследования структуры образцов, полученных в различающихся условиях роста. Показано, что в результате выбора оптимальных условий может быть получен материал, кристаллическая структура которого представляет собой высоко ориентированную текстуру гексагонального GaN. ПЭМ исследования, проведенные на поперечных срезах образцов толщиной 1.5 мкм, показали, что блоки текстуры имеют или когерентные границы, или незначительный (в единицы градусов) взаимный разворот относительно направления *c* в гексагональной решетке. Выравнивание ориентации блоков происходит по мере увеличения толщины материала. В области текстуры с когерентными границами структура блоков не содержала дефектов с концентрацией выше предела обнаружения ПЭМ. Преимущественным типом дефектов в разориентированных блоках являлись множественные дефекты упаковки (ДУ). Было установлено, что ДУ представляют собой границы между совершенными областями гексагональной решетки, смещенными на $1/3[1-100]$. Формирование ДУ, очевидно, является проявлением специфического механизма релаксации внутренних напряжений, вызванных разориентацией блоков текстуры. В спектрах низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ), полученных от области текстуры с когерентными границами, доминировала полоса с максимумом 3.47 эВ и полушириной 11 мэВ. В ходе проведения температурных измерений наблюдалось смещение доминирующего пика от 3.47 эВ до 3.44 эВ, отражающее температурное изменение ширины запрещенной зоны GaN. Это позволяет приписать наблюдаемую люминесценцию экситону, связанному на нейтральном доноре (DBE). В спектрах ФЛ полученных от области текстуры, содержащей разориентированные блоки, доминировал узкий (21 мэВ) пик с энергией 3.42 эВ, связанный с дефектами упаковки в GaN. При этом наблюдалась прямая зависимость интенсивности доминирующего пика от плотности ДУ. В образцах с плотностью ДУ 10^6 см^{-1} соотношение интенсивностей полос DBE и полосы люминесценции ДУ составляло 1/10. Согласно ранее предложенной модели [2] и имеющимся подтверждающим ее экспериментальным данным, ДУ в гексагональной решетке GaN представляют собой слои кубической фазы с меньшей шириной запрещенной зоны и формируют двумерные структуры, подобные квантовым ямам. Таким образом, на основе комплексных исследований, проведенных в данной работе, было сделано заключение, что ДУ в текстурированном GaN представляют собой низкоразмерные гетерополитипные структуры, наличие которых определяет наблюдаемую высокоэффективную люминесценцию локализованных в ней экситонов.

Список литературы

1. Мынбаева М.Г., Печников А.И., Ситникова А.А., Кириленко Д.А., Лаврентьев А.А., Иванова Е.В., Николаев В.И., Пластины кристаллического GaN большой площади, Письма ЖТФ, том. 41, вып. 5, 84-90, 2015
2. Rebane Y.T., Shreter Y.G., Albrecht M., Stacking faults as quantum wells for excitons in wurtzite GaN, Physica Status Solidi (a), vol. 164, 141-144, 1997

Аномально низкая энергия эмиссии электронов с энергетических уровней фосфора в электрическом поле кремниевых p-n переходов при температуре 10-20 К

Шепелев А. С., Еремин В.К., Вербицкая Е.М.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: artem.shepelev@cern.ch

На современных крупнейших ускорительных комплексах, таких как LHC (CERN), NICA (ОИЯИ) и FAIR (GSI), ведутся эксперименты в области физики высоких энергий. Для достижения параметров эксперимента используются сверхпроводящие магниты, формирующие траектории частиц. В связи с высокими требованиями к обеспечению безопасности исследований становится необходимым постоянное мониторинговое радиационного фона непосредственно внутри криогенной системы с целью своевременного предотвращения ситуаций локального перегрева обмоток магнитов. Использование компактных кремниевых детекторов излучений в таком случае представляется оптимальным и надежным способом обеспечения безопасности [1], что, с другой стороны, требует понимания физики работы приборов в нестандартных условиях: сверхнизкие температуры и постоянно увеличивающаяся доза облучения. Ключевым требованием к полупроводниковому детектору излучений является эффективное собирание заряда в его чувствительном объеме. В свою очередь это определяется распределением электрического поля в объеме детектора, которое однозначно связано с распределением концентрации заряженных примесей и дефектов. Даже при нулевой дозе облучения в материале присутствуют атомы легирующей примеси, которые формируют мелкие энергетические уровни и влияют на профиль электрического поля.

В данном исследовании детекторы представляют собой $p^+/n/n^+$ структуры, изготовленные из кремния, легированного фосфором. Эксперименты проводились с использованием метода переходного тока (ТСТ – Transient Current Technique) [2]. Его суть состоит в регистрации токовых откликов детектора на одностороннюю импульсную лазерную инжекцию неравновесных носителей заряда и их дальнейший монополярный дрейф в его объеме. Для реализации метода использовался лазер с длиной волны 660 нм и варьируемой частотой следования импульсов света. Эксперименты проводились в компактном гелиевом криостате, позволяющем охлаждать образец до температуры 10 К. При такой постановке эксперимента, анализ формы импульса тока позволяет получить информацию о распределении электрического поля и концентрации заряженных примесей в объеме. Изменение частоты лазерных импульсов позволяет изменять степень заполнения энергетических уровней атомов примеси, что, в свою очередь, позволяет исследовать энергию активации атомов фосфора и сечения взаимодействия носителей заряда с уровнями. Ранее было показано, что в области электрического поля эти мелкие уровни являются заряженными даже при температурах жидкого гелия, что противоречит оценкам, основанным на эффекте Пула-Френкеля [3].

В рамках данной работы проведены серии экспериментов в диапазоне температур $T=10-20$ К с различной частотой генерации неравновесного заряда. Анализ токовых откликов детектора позволил проследить эволюцию объемного заряда и связанного с ним распределения электрического поля с изменением температуры и частоты. На основании полученных результатов выполнен количественный анализ аномально сильного падения энергии ионизации атомов фосфора в области электрического поля при температурах 10-20 К.

Список литературы

1. Dehning B., arXiv preprint arXiv:1608.03079, 2016
2. Li Z. et. al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 388, 297-307, 1997
3. Eremin V. et. al., Journal of Applied Physics, 123, 204501, 2018

Дефектообразование при электронном и протонном облучении приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si

Давыдовская К.С.¹, Лебедев А.А.¹, Козловский В.В.²

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе

² СПбГУ

e-mail: davidovskaya.klava@mail.ioffe.ru

Поиски широкозонных полупроводников начались достаточно давно с целью замены классического кремния при создании, например, силовых приборов [1]. Причиной этого являлись повышенные требования и к температурной стойкости приборов и к их радиационной стойкости. В качестве главных кандидатов для замены кремния выступили карбид кремния и нитрид галлия.

Хотя GaN уступает SiC в теплопроводности и кристаллическом качестве эпитаксиальных слоев, рост GaN происходит при меньших температурах, с использованием более дешевых материалов и на различных подложках. Таким образом, диоды Шоттки (ДШ) на основе GaN могут конкурировать с аналогичными приборами на SiC при относительно невысоких температурах [2–3]. В то же время на повышенных температурах, незаменим именно SiC.

Целью данной работы было изучение результатов облучения электронами (0,9 МэВ) и протонами (15 МэВ) 4H-SiC ДШ, 4H-SiC JBS-диодов n-типа проводимости, 4H-SiC ДШ p-типа, изготовленными CREE (США), а также GaN ДШ n-типа.

Проводилось измерение зависимости концентрации нескомпенсированных носителей заряда от приложенного обратного смещения методом вольт-фарадных характеристик, и рассчитывалась скорость удаления носителей заряда. В дополнение проводилось исследование глубоких центров данных образцов с помощью DLTS спектроскопии.

В ходе экспериментов концентрация N_a-N_d линейно снижалась для всех приборов. Скорость удаления носителя V_d составила $\sim 0,084 \text{ см}^{-1}$ для 4H-SiC ДШ n-типа проводимости, $V_d \approx 0,15 \text{ см}^{-1}$ для диодов JBS n-типа; $V_d \approx 1.47 \text{ см}^{-1}$ 4H-SiC ДШ p-типа и $V_d \approx 22,1 \text{ см}^{-1}$ в случае GaN ДШ n-типа. То есть для компенсации SiC ДШ требуется примерно 200-кратная доза, по сравнению с Si диодом с таким же $U_{\text{пробоя}}$. Аналогично, для 4H-SiC JBS потребуется в 100 раз большая доза, а вот для p-типа – лишь в 10 раз.

Также был рассмотрен одновременный эффект воздействия температуры и излучения, имитируя экстремальные условия работы 4H-SiC JBS-диодов. Облучение проводили протонами с энергией 15 МэВ при дозах до $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. В итоге выяснилось, что облучение образцов при температуре до 700°C практически не привело к изменению V_d . Таким образом, можно сделать вывод, что одновременное воздействие температуры ($\leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$) и протонного облучения не приводит к ускорению деградации SiC приборов.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке силовых приборов для экстремальных условий эксплуатации.

Список литературы

1. A.A. Lebedev. *J. Wide Bandgap Mater.*, 8, 129 (2000).
2. T. Boles, C. Varmazis, D. Carlson, L. Xia, D. Jin, T. Palacios, G.W. Turner, R.J. Molnar. *Proc CS MANTECH Conf.* (New Orleans, Louisiana, 2013) p. 297.
3. P. Roussel. *Semiconductor Today*, 2, 52 (2007).

Номер проекта РФФИ: 20-32-90019

Электрические свойства кристаллов $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и их контактов со сплавом Bi-Sn

Алиева Т.Д., Багиева Г.З., Абдинова Г.Д., Мустафаев Н.Б., Абдинов Д.Ш.

Институт Физики НАН Азербайджана

e-mail: tunzalaaliyeva@mail.ru

Перспективными термо- и фотоэлектрическими материалами являются твердые растворы на основе SnTe, в частности, и твердые растворы $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, имеющих значительно (до ~1,9 раз) меньшую общую и решеточную теплопроводности, чем SnTe. Однако электрические свойства данного твердого раствора $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ почти не исследованы. Эти материалы имеют сложную валентную зону и кристаллизуются с отклонением от стехиометрии. Концентрация носителей тока в специально нелегированных образцах определяется, в первую очередь, концентрацией электрически активных вакансий в подрешетках металла и халькогена, а также структурными дефектами, возникающими при выращивание кристаллов и изготовление из них образцов. Подобные структурные дефекты, возникающие в объеме и на поверхности образцов, чувствительны к различным обработкам и режимам отжига.

С целью выяснения механизма переноса электрического заряда в кристаллах $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и выяснения роли структурных дефектов в электрических свойствах, получены методом Бриджмена монокристаллы данного твердого раствора с составами $x=0; 0,0025; 0,005; 0,01; 0,02; 0,04$, исследованы их электропроводность s и коэффициент термоэдс a в интервале температур 77-300 К. Были исследованы электрические свойства образцов, не прошедших отжиг и образцов, прошедших отжиг при 473, 573, 773 К в течение 120 ч в атмосфере спектрально чистого аргона.

Выяснено, что электропроводности неотожженных образцов и образцов, прошедших отжиг при 773К с ростом температуры, уменьшаются. Аналогичными температурными зависимостями электропроводности имеют и образцы, отожженные при 473 и 573К. При этом, с ростом температуры отжига электропроводность образца SnTe и образца с $x=0,0025$ несколько растет, а для остальных образцов уменьшается. Во всех случаях с ростом концентрации марганца электропроводность при данной температуре падает. Температурные зависимости коэффициента термоэдс для неотожженных и отожженных образцов SnTe имеют минимум в области ~190-220 К. Тенденция к аналогичному минимуму наблюдается и в неотожженных образцах с $x=0,0025$ и 0,005 и отожженного при 773 К образца с $x=0,04$. В остальных образцах с ростом температуры a растет. Во всех случаях с ростом температуры отжига значения a образцов при данной температуре уменьшаются.

С ростом концентрации Mn в неотожженных и отожженных при различных температурах образцах значения α вначале быстро растут, а затем уменьшаются. Однако при $x=0,04$ значения α больше, чем для образца с $x=0,02$.

Принимается, что атомы Mn, располагаясь в вакансиях в подрешетке олова, приводят к уменьшению концентрации вакансий, и соответственно концентрации дырок и электропроводности. Уменьшение концентрации дырок с ростом концентрации Mn сопровождается и уменьшением коэффициента термоэдс. Такая "аномальная" зависимость α от концентрации дырок хорошо согласуется с литературными данными, где эта аномалия объясняется моделью двух валентных зон при наличии межзонного рассеяния.

Показано, что влияние концентрации Mn и отжига на электропроводность и коэффициент термоэдс, а также температурные зависимости этих параметров в кристаллах этих составов удовлетворительно объясняются наличием в кристаллах в подрешетке олова электроактивных вакансий с концентрацией $\sim 10^{21}\text{см}^{-3}$ и моделью двух валентных зон, разделенных энергетическим зазором.

Также созданы структуры (Bi-Sn) – $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и исследованы электрические свойства в интервале 77-300 К. Показано, что протекание тока в контактах указанных структур происходит по металлическим шунтам, закорачивающим слой объемного заряда. Контактное сопротивление определяется и промежуточными фазами типа Bi_2Te_3 , образовавшимися на границе раздела металл-полупроводник.

DLTS-спектры радиационных дефектов кремниевых детекторов в области пика Брэгга

Митина Д. Д., Еремин В.К., Вербицкая Е.М., Еремин И.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: daria.mitina@cern.ch

Кремниевые детекторы излучений широко применяются в исследованиях в области физики высоких энергий. В процессе работы детекторы, подвергаясь воздействию частиц различных масс и энергий, неизбежно деградируют, поэтому задача разработки сценария радиационной деградации становится важнейшей. Сценарий радиационной деградации включает в себя исследование изменения с ростом дозы как макроскопических параметров (генерационный ток, эффективная концентрация) так и микроскопических (параметры глубоких уровней в запрещенной зоне, ответственных за протекание генерационного тока и величину сигнала детектора). Параметры и структура этих уровней, возникших вследствие облучения частицами, которые теряют лишь часть энергии в образце, известны и исследованы, в том числе методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) [1]. Такие частицы (как легкие адроны, так и тяжелые ионы) формируют однородное распределение дефектов вдоль своего трека. Однако если налетающие частицы полностью потеряют свою энергию в объеме детектора, то в области полного торможения (длина пробега частицы) в распределении первичных дефектов образуется максимум – пик Брэгга.

В представленной работе исследованы низкоомные ($60\ \Omega\cdot\text{cm} - 7.08 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$) кремниевые планарные p^+-n-n^+ -детекторы, облученные ионами ^{40}Ar с энергией 53.4 MeV. При таких условиях пик Брэгга возникает в материале на глубине около 15 μm . Вольт-

емкостные зависимости с ростом дозы облучения демонстрируют существенные отклонения от классических представлений для резкого p - n -перехода в областях напряжений, соответствующих обеднению области с пиком Брэгга.

Измерения DLTS-спектров показали, что при обратном смещении в 20 В и в отсутствие дополнительной инжекции неосновных носителей заряда наблюдаются 3 пика радиационных дефектов, что практически соответствует спектрам, полученным для детекторов, облученных ионами ^{40}Ar высокой энергии [2]. В то же время уменьшение прикладываемого напряжения до 7 В приводит к разделению пика дефектов с максимальной энергией активации на 2 компонента. Обнаружено, что амплитуды максимумов этих отдельных пиков и соответствующие им температуры крайне чувствительны к величине прикладываемого смещения. Подобные аномалии в спектрах DLTS уже наблюдались ранее на кремниевых структурах, облученных ионами криптона низкой энергии [3]. В представленной работе исследована динамика изменения структуры пиков с ростом обратного смещения, которая связывается с распространением области пространственного заряда вдоль пика Брэгга. Показано, что максимальная амплитуда первого наблюдаемого компонента отвечает максимуму пика Брэгга, а полное обеднение области пика отображается в спектрах как падение амплитуды второго компонента до 0, что свидетельствует об отсутствии выброса носителей заряда с глубокого уровня.

Список литературы

1. D.V. Lang, Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, *J. Appl. Phys.*, 45(7):3023-3032, 1974
1. V. Eremin et al 2018 *JINST* 13 P01019
2. N. Poklonski et al, DLTS spectra of silicon diodes with p^+ - n -junction irradiated with high energy krypton ions. *Modern Electronic Materials*, 2(2): 48-50, 2016

Исследование радиационных дефектов, создаваемых тяжелыми ионами, в кремниевых детекторах ядерных излучений

Давыдов В.Ю.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев И.А.¹, Вербицкая Е.М.¹, Еремин И.В.¹, Митина Д.Д.¹,
Еремин В.К.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: valery.davydov@mail.ioffe.ru

Радиационная деградация кремниевых детекторов является важнейшим фактором, ограничивающим ресурс их работы на ускорительных комплексах с высокой светимостью пучка (программы Super-LHC (CERN) и FAIR (GSI)). Попытки замены кремния на толстые (>100 мкм) CVD пленки монокристаллического алмаза оказались бесперспективными в силу их ограниченной площади (<1 см²) и крайне высокой стоимости, что не позволяет создавать широко востребованные детектирующие устройства площадью от десятков см² до нескольких м². В случае воздействия на детектор тяжелых ионов высоких энергий (в том числе и ^{238}U), в кремнии возникают две качественно разные области: область с близким к однородному распределением плотности дефектов и область, локализованная в конце пробега с плотностью дефектов до 2-х порядков превышающей среднее значение (эффект Брегга). Если процесс отжига радиационных дефектов, вызванных воздействием легких частиц (адронов), детально исследован [1–3], то физика и технология

восстановления работоспособности детекторов, облученных тяжелыми ионами, изучены недостаточно полно.

Данная работа посвящена применению метода микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) для исследования профиля радиационных дефектов, создаваемых тяжелыми ионами высоких энергий в кремнии, в связи с разработкой технологии высокотемпературного восстановительного отжига детекторов. Исследования проводились на тестовых образцах кремниевых мини-детекторов размерами 6×6 мм², изготовленных на пластинах некомпенсированного высокочистого *n*-кремния с удельным сопротивлением 5-10 кОм·см и толщиной 300 мкм. Мини-детекторы со структурой $p^+ - n - n^+$ создавались методами планарной технологии. Их p^+ -сторона содержала чувствительную область размером 5×5 мм² и имела на ее периферии систему p^+ -колец, позволявшую подавать на образец напряжение до 300 В. При этом объемный ток структур не превышал 1 нА, что подтверждает совершенство и чистоту кремния в его объеме. Облучение мини-детекторов ионами Ag (энергия 54 МэВ, доза 10^{11} см⁻²) проводилось с p^+ -стороны, в результате чего в образце на глубине 15 мкм создавался слой с высокой концентрацией дефектов. Параллельно облучались несколько образцов, что позволяло контролировать их электрические характеристики и проводить оптические исследования. Образцы для оптических исследований были получены раскалыванием мини-детекторов по линии скрайбирования, наносившейся на n^+ -сторону образца, и имели размеры $3000 \times 1000 \times 300$ мкм. В процессе исследований использовался только исходный скол, так как было установлено, что любые дополнительные обработки скола образца влияют на результат микро-ФЛ. Особенностью измерений спектров микро-ФЛ, выполненных при $T=10$ К, являлось то, что возбуждающее излучение фокусировалось в пятно диаметром ~ 2 мкм на поперечном сколе мини-детектора, что при последующем сканировании позволяло получать информацию из любой области внутри детектора по его толщине. В спектрах ФЛ необлученных детекторов наблюдались только линии свободного экситона кремния и полностью отсутствовали особенности, связанные с наличием каких-либо примесей, что согласуется с данными электрофизических измерений структур. В свою очередь, поведение линии свободного экситона в области детектора, подвергнутой облучению ионами Ag, позволило восстановить профиль структурных нарушений на длине пробега иона, показавший максимум дефектности в диапазоне 15–20 мкм от p^+ -контакта, что согласуется с распределением концентрации вакансий, рассчитанной с помощью программы SRIM. Хвост в распределении дефектов в область больших глубин, полученный при обработке данных, требует дополнительных исследований, включая и методическое обеспечение эксперимента. В спектре ФЛ детектора, подвергнутой облучению ионами Ag, в области ниже 1.097 эВ были также обнаружены триплетная полоса в области 1.0 эВ и узкие интенсивные особенности при 1.02 и 0.97 эВ, которые предварительно были интерпретированы как полосы ФЛ, связанные с дислокациями, возникшими вследствие структурных нарушений радиационной природы [4].

Список литературы

1. FAIR-GSI, Detailed Specification of the Time-of-Flight detectors for the Super-FRS, Document Number: F-DS-BD-82e, 12, 27.11.2016
2. Schirru F., Nociforo C., Kiš M., Ciobanu M., Frühauf F., Kratz A., Kurz N., Szczepanczyk B., Träger M., Visinka R., Development of large area diamond detectors for time-of-flight measurements of relativistic heavy ions for the super-FRS, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 49, 215105, 2016
3. Quemener V., Raciess B., Herklotz F., Murin L.I., Monakhov E.V., Svensson B.G., Kinetics study of the evolution of oxygen-related defects in mono-crystalline silicon subjected to electron-irradiation and thermal treatment, J. Appl. Phys., vol. 118, 135703, 2015

4. Sauer R., Weber J., Stolz J., Weber E.R., Kusters K.-H., Alexander H., Dislocation-related photoluminescence in silicon, Appl. Phys. A, vol. 36, 1, 1985

Исследование дефектов в массиве вертикально-ориентированных кремниевых нановолокон, полученных методом криогенного плазмохимического травления

Баранов А. И.^{1,2}, Морозов И.А.¹, Кудряшов Д.А.¹, Уваров А.В.¹, Шугуров К.Ю.¹, Гудоских А.С.^{1,2}

¹СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: itiomchik@yandex.ru

На сегодняшний день, современные типы полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) такие как однопереходные на основе кремния и многопереходные на основе A^3B^5 полупроводников практически достигли своего теоретического предела эффективности, а их дальнейшее улучшение приводит к значительному усложнению технологии производства и удорожанию. Поэтому перспективным видится создание СЭ на основе низкоразмерных структур, например, массива вертикально-ориентированных кремниевых нановолокон (silicon nanowires, SiNWs). Использование таких массивов позволит увеличить поглощение солнечного спектра, уменьшив потери на отражение, а также разработать перспективные двухпереходные солнечные элементы полностью на основе кремния с верхним переходом на основе микрокристаллического кремния [1, 2]. С другой стороны, широко используемые методы создания массивов SiNWs как металл-индуцированное жидкостное травление подложки кремния и эпитаксиальный рост по методу пар-жидкость-кристалл кремниевых нановискеров приводят к формированию золотосодержащих дефектов из-за использования золота для создания SiNWs. В рамках предложенной работы массив SiNWs был создан с помощью сухого травления с использованием ICP (inductive-coupled plasma) режима при низких температурах порядка -140°C в смеси газов SF_6/O_2 [3], что позволяет подавить дефектообразование в процессе воздействия плазмы. Требование к низкой концентрации дефектов является критически важным для создания высокоэффективных СЭ, поэтому в работе было исследовано влияние режимов такого метода травления кремниевой подложки для получения массивов SiNWs.

В рамках работы, при разных параметрах методом криотравления подложки n-Si были получены массивы SiNWs с высотой 3-10 мкм и аспектным соотношением 5 с гладкой боковой поверхностью нановолокон и гладкой поверхностью кремния на дне между ними при разных режимах и параметрах. Далее, для проведения емкостных измерений были сформированы структуры с барьером Шоттки путем напыления золота на лицевую поверхность подложки и создания омического контакта к ее тыльной стороне. Образцы были изучены методами спектроскопии полной проводимости и нестационарной спектроскопии глубоких уровней, которые показали формирование глубоких дефектных уровней с энергией активации 0,68-0,74 эВ и площадью сечения захвата $1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ в кремниевых нановолокнах при использовании метода криотравления, причем их параметры и концентрация зависят от условий травления. Кроме того, в работе изучено влияние дополнительной обработки подложки после травления на концентрацию дефектов в массиве

нановолокон, в частности, показано их значительное уменьшение после жидкостного травления в растворе КОН.

Работа поддержана грантом в виде стипендии Президента РФ № СП-1207.2019.1.

Исследование радиационного воздействия на эпитаксиальные структуры на основе GaN

Лебедев А.А.¹, Давыдов В.Ю.¹, Смирнов А.Н.¹, Елисеев И.А.¹, Давыдовская К.С.¹, Заварин Е.Е.¹, Закгейм Д.А.¹, Лундин В.В.¹, Николаев А.Е.¹, Сахаров А.В.¹, Цацульников А.Ф.², Козловский В.В.³

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ Микроэлектроники РАН

³СПбПУ

e-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

Поиск широкозонных радиационно-стойких полупроводниковых соединений, которые могли бы заменить карбид кремния для создания различных типовых силовых приборов, проводится достаточно давно. Достигнутый в последние годы успех в технологии GaN и твердых растворов на его основе, позволяет по-новому взглянуть на эту проблему. Несмотря на то, что GaN уступает SiC в теплопроводности и структурном совершенстве эпитаксиальных слоев, рост GaN происходит при меньших температурах, с использованием более дешёвых материалов и на различных подложках. Таким образом, приборные структуры на основе GaN могут конкурировать с аналогичными приборами на основе SiC в диапазоне напряжений до 1000 В. Поэтому представляется актуальным провести исследования радиационной стойкости эпитаксиальных слоев GaN, и структур на его основе, как при комнатной температуре, так и при высоких температурах.

Исследовалась стойкость к облучению протонами различных типов структур, являющихся элементами электронных приборов на основе GaN (диодов Шоттки и полевых транзисторов). Три типа структур были выращены методом газовой фазной эпитаксии (MOCVD) на сапфировых подложках: 1) слой GaN:Si ($1-3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$) для диодов Шоттки толщиной 2 мкм, выращенные на изолирующих буферных слоях GaN; 2) слой GaN:(Fe,C) толщиной 3 мкм, выращенные на проводящих буферных слоях GaN для использования в полевых транзисторах [1]; 3) стандартная гетероструктура с двумерным электронным газом GaN/AlN/AlGaN для HEMT-транзисторов. Приборы облучались протонами на малогабаритном циклотроне MGTs-20 в импульсном режиме [2]. Энергия протонов составляла 15 МэВ. Диаметр пучка составлял 30 мм, плотность тока в протонном пучке лежала в диапазоне 10–100 нА/см². Длительность импульсов составляла 2.5 мс, частота повторения – 100 Гц. Дозы облучения были в диапазоне от $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Облучение проводилось в вакууме; температура образцов в процессе облучения могла изменяться от комнатной до 800°C. Длина пробега протонов, рассчитанная с помощью программы SRIM [3], составляла 1 мм. Таким образом, дефекты вводились в материал структуры однородно.

Структуры до и после облучения исследовались методами вольт-емкостной спектроскопии, измерениями эффекта Холла, фотолюминесценции (ФЛ) и комбинационного рассеяния света (КРС). Измерения эффекта Холла выявили появление радиационно-стимулированных дефектов в слоях GaN:Si, которое выражалось в падении концентрации носителей и уменьшении подвижности. Так, например, при дозе протонов $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ концентрация и подвижность носителей в GaN:Si упала с 1.6×10^{17} до $\sim 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, и с 250 до

130 см²/Вс соответственно. Эти данные хорошо согласуются с оценками величин концентрации и подвижности носителей, полученных из анализа связанных фонон-плазмонных мод в спектрах КРС. В спектрах ФЛ таких образцов, измеренных при низкой температуре, наблюдалось перераспределение интенсивности полос излучения, связанных с примесными состояниями. При вольт-емкостных измерениях слоев GaN:Si облученных протонами, был обнаружен линейный характер зависимости $N = F(D)$ (здесь N – концентрация носителей и D – доза облучения). Это показывает, что компенсация материала связана с переходом электронов с мелких доноров на глубокие уровни, созданные первичными радиационными дефектами. После облучения наблюдалось появление глубокого центра с энергией ионизации $E_c - 0.19$ эВ и сечением захвата $\sim 5 \times 10^{-16}$ см², природа которого находится в стадии изучения. Также было исследовано влияние облучения протонами на величины напряжений пробоя в вертикальном направлении в слоях GaN:(Fe,C), и на параметры структуры с двумерным электронным газом.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (проект №16-12-10106).

Тепловые процессы в гетероструктурах $\text{SmS}/\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$ при термовольтаическом эффекте

Соловьёв С. М.¹, Шаренкова Н.В., Казанин М.М.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: serge.soloviev@mail.ioffe.ru

Термовольтаический эффект (ТЭ) представляет собой один из новых принципов преобразования тепловой энергии в электрическую. ТЭ был первоначально обнаружен на сульфиде самария (SmS) [1]. При исследовании ТЭ было обнаружено существенное по величине (125К) понижение температуры образца [2]. Кратковременный период охлаждения носит нестабильный характер, что обуславливает невозможность применения данного эффекта охлаждения на практике. С целью достижения стабильного и непрерывного процесса охлаждения нами были изготовлены структуры на основе SmS и твёрдого раствора SmS с GdS ($\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$, где $x=0.1$ и 0.3). На этих структурах наблюдалась разница в величине температуры одного из контактов от величины температуры среды в процессе нагрева, которая достигала 33К при температуре среды 442К (для $x=0.1$) и 77К при температуре среды 450К (для $x=0.3$). В твёрдом растворе $\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$ концентрация электронов проводимости существенно больше, чем в SmS . Это приводит к интенсификации процесса ионизации ионов Sm^{2+} и перехода их в трёхвалентное состояние ($\text{Sm}^{2+} \rightarrow \text{Sm}^{3+} + e$). Этот процесс приводит с одной стороны к изменению характера термовольтаического эффекта, а с другой – к слиянию отдельных временных интервалов понижения температуры в единый процесс охлаждения, который мы и наблюдаем. Механизм этой ситуации таков: при коллективном забросе у одного из контактов в этой области с одной стороны получается локальное повышение концентрации электронов проводимости, а с другой – понижение температуры из-за поглощения тепла электронами при их забросе. Эти два механизма приводят к возникновению потоков электронов, направленных в противоположные стороны. Таким образом, мы видим, что сигнал состоит из двух составляющих: одна происходит чисто из-за термовольтаического эффекта, а вторая – из-за образовавшейся разницы температур по механизму, аналогичному эффекту Зеебека. Также проведены аналогичные эксперименты для образца состава $\text{SmS}/\text{Sm}_{0.93}\text{Gd}_{0.07}\text{S}$. Здесь мы не видим скачков на температурных кривых, что, по-видимому, объясняется меньшим количеством гадолиния. Обобщая все полученные данные, можно сделать вывод, что добавка европия в SmS увеличивает напряжение генерируемого сигнала [3]. Добавка гадолиния приводит к понижению температуры и эффекту охлаждения.

Список литературы

1. В.В. Каминский, С.М. Соловьёв. ФТТ, 2001, т.43, в.3, с.423-426
2. В.В. Каминский, С.М. Соловьёв. ПЖТФ, 2005, т.31, в.14, с.41-49
3. V.V. Kaminskii, S.M. Soloviev, N.M. Sudak, M.I. Zaldastanishvili, N.V. Sharenkova and M.M. Kazanin. J. Phys.: Conf. Ser. 2019, 1400 066056

Кинетические закономерности термовольтаического эффекта в полупроводниковых структурах на основе сульфида самария SmS

Гревцев М.А.¹, Казаков С.А.¹, Хавров Г.Д.¹, Казанин М.М.¹, Шаренкова Н.В.¹, Соловьев С.М.¹, Шульман С.Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: gma114@mail.ioffe.ru

В настоящей работе в рамках кинетической модели рассмотрены экспериментальные данные по термовольтаическому эффекту в объемных образцах сульфида самария SmS. В работе [1] высказано предположение, что причиной эффекта является термический заброс электронов в зону проводимости. В коллективном электронном переходе участвуют ионы самария, находящиеся в междуузлиях кристаллической решетки [2], их концентрация нарабатывается при отжиге поликристалла. Элементарный процесс описывается кинетическим уравнением ионизации ионов самария: $(Sm^{2+})_v = (Sm^{3+})_v + e^-$. В рамках закона действующих масс, когда плотность состояний электронов в примесной области широкозонного полупроводника намного меньше плотности состояний электронов в зоне проводимости [3], можно записать скорость убыли электронов проводимости такой поликристаллической структуры сульфида самария:

$$d[e^-]/dt = k_2[(Sm^{2+})_v] - k_1[(Sm^{3+})_v][e^-], \quad (1)$$

где k_1 и k_2 – константы скорости прямой и обратной реакций соответственно.

При этом сделаны следующие допущения:

$$a) [e^-] = [(Sm^{3+})_v]$$

так как молярные концентрации в уравнении реакции ионизации самария равны;

$$b) [(Sm^{2+})_v] = N_d - [e^-],$$

где $[e^-]$ и N_d – текущая концентрация электронов в зоне проводимости SmS и концентрация междуузельных ионов самария соответственно, $[(Sm^{3+})_v]$ – концентрация междуузельных трижды ионизованных атомов самария, $[(Sm^{2+})_v]$ – концентрация исходных дважды ионизованных атомов самария. При заданной постоянной температуре образца сульфида самария для скорости изменения безразмерной величины электропроводности образца будем иметь:

$$dx/dt = k_2 - k_2x - k_1 \sigma_0 x^2/q^2 u, \quad (2)$$

где $x = \sigma / \sigma_0$ – безразмерная электропроводность сульфида самария SmS, q^2 и u – соответственно заряд и подвижность носителей заряда (электронов) в сульфиде самария.

После интегрирования соотношения (2) получено выражение для статики процесса:

$$x_\infty = 2/(1 + (1 + 4k_1 \sigma_0/q^2 u k_2)^{1/2}) \quad (3),$$

аналогичное представлением Бьюба [4] по фотопроводимости в полупроводниках.

Рассмотрение в рамках кинетической модели наблюдаемых экспериментальных данных по термовольтаическому эффекту в объемных образцах сульфида самария, а именно: в динамике (уравнение (2)) и в статике (уравнение (3)) позволило описать вольт-амперные характеристики образцов. Для термоэлектрического генератора на основе эффекта получены уравнения: тока короткого замыкания и режима холостого хода. Расчетным путем определено внутреннее сопротивление, а также максимальная рассеиваемая мощность при найденном нагрузочном сопротивлении. Из предложенной кинетической модели можно получить известное выражение [5] для генерируемого напряжения в случае возникновения термовольтаического эффекта при постоянной температуре.

Авторы благодарят Российский Фонд Фундаментальных Исследований за частичную поддержку и финансирование работы.

Список литературы

1. Голубков А В, Гончарова Е В, Капустин В А, Романова М В, Смирнов И А, Уточнение модели электропереноса в полупроводниковой фазе SmS. ФТТ, т. 22, в.12, с.3561-3567, 1980.
2. Каминский В.В, Голубков А В, Васильев Л Н, Дефектные ионы самария и эффект генерации электродвижущей силы в SmS. ФТТ, т.44, в.8, с.1501-1505, 2002.
3. И. А. Мясников, В. Я. Сухарев, Л. Ю. Куприянов, С. А. Завьялов. Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях, М.: Наука, 1991, 326 с.
4. Р. Бьюб. Фотопроводимость твердых тел, М.: Иностранная литература, 1962, 558 с.
5. Каминский В В, Степанов Н Н, Соловьёв С М, Термовольтаический эффект в гетероструктуре на основе SmS под давлением. Физика и техника высоких давлений (ФТВД), т.25, №3-4, с.74-81, 2015.

Номер проекта РФФИ: 19-08-00576 А

Прочностные характеристики тонких кремниевых пластин, применяемых в солнечных фотоэлектрических преобразователях

Шпейзман В. В.¹, С.Е. Никитин, А.О. Поздняков, В.И. Николаев, А.В. Бобьль

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: shpeizm.v@mail.ioffe.ru

Теоретическое значение КПД солнечных фотопреобразователей (ФЭП) на основе монокристаллического кремния приближается к 30%. К настоящему времени КПД HJT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer solar cell) фотопреобразователей достигает 26% [1]. Потолок КПД ФЭП на основе монокристаллического Si практически достигнут, и важнейшим фактором становится время безотказной эксплуатации. В HJT фотопреобразователях используются тонкие кремниевые пластины (< 0.2 мм), что ставит на первый план проблемы, связанные с прочностью [2]. Прочность кремния сильно зависит от дефектности поверхности. Хорошо известно, что прочность кремниевых пластин после химической полировки возрастает в сотни раз по сравнению с прочностью пластин после резки [3]. В то же время необходимым элементом HJT фотопреобразователей являются текстуры на поверхности кремния, обеспечивающие эффективное поглощение света. В работе исследована прочность кремниевых пластин с четырьмя поверхностными текстурами: 1- нарезка алмазной проволокой; 2- после удаления нарушенного слоя, с текстурой размером ~ 30 нм; 3- пирамидальная текстура с размерами 1-4 нм; 4- пластины с двумя текстурами размером ~ 30 нм и дополнительной текстурой размером 100- 400 нм, полученной помощью методики, предложенной авторами [4].

Рассмотрены аналитические и численные методы расчета напряжений в тонких пластинах, проведены эксперименты по их изгибу. Измерение прочности пластин производилось в испытаниях на осесимметричный изгиб по методу «кольцо-в-кольцо» при

комнатной температуре. Показано, что формулами линейной теории упругости можно пользоваться только в области крайне малых значений действующей силы и прогиба. Расчетные методы, в частности конечно-элементное (finite element method (FEM)) моделирование, позволяют по величине нагружающей силы рассчитать напряжения, прогиб и прочность пластины, однако расчеты должны быть проверены экспериментально. Предложен простой метод оценки правильности модели, положенной в основу расчета напряжений и прочности. Поскольку модель позволяет получить не только зависимость напряжений в заданной точке пластины от приложенной силы, но и зависимость прогиба от силы, то по экспериментальной проверке одной из этих зависимостей можно судить о правильности самой модели и вытекающих из нее следствий. Как показали ранее сделанные расчеты и эксперименты [5], максимальные радиальные напряжения в пластине, значением которых в момент разрушения является ее прочность, находятся под нагружающим кольцом. Прогиб пластины в точках этой окружности равен перемещению подвижного штока испытательной машины. Поэтому если экспериментальная и расчетная зависимости нагрузка–перемещение близки, то можно доверять и рассчитанным по той же модели напряжениям. Расчеты по FEM проводились в пакете Comsol Multiphysics. Исследования показали, что текстурированные образцы кремния типа 2–4 обладают прочностью, значительно более высокой, чем после алмазной резки или полировки, достигая 300 МПа и более. Из трех типов образцов с различными текстурами наименьшую прочность показали образцы типа 3, а наибольшую – типа 2.

Список литературы

1. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, A W.Y. Ho-Baillie. ProgPhotovolt Res Appl. 25, 668 (2017).
2. M. Köntges, S. Kurtz, U. Jahn, K. A. Berger, K. Kato, H. Liu, T. Friesen, M. Van Iseghem Review of Failures of Photovoltaic Modules. Report IEA-PVPS T13-01:2014.
3. Л.В.Жога, А.И.Козачук, В.А.Степанов, Ю.Ф.Титовец, В.В.Шпейзман. ФТТ 21, 11, 3310 (1979).
4. С.Е.Никитин, Е.Е. Терукова, А.В. Нащекин, А.В.Бобыль, И.Н. Трапезникова, В.Н. Вербицкий. ФТП 51, 1, 105, (2017).
5. В.В. Шпейзман, В.И. Николаев, А.О. Поздняков, А.В. Бобыль, Р.Б. Тимашов, А.И. Аверкин. ЖТФ 90, 1, 79, (2020).

Номер проекта РФФИ: Проект РФФИ 18-48-342005

Исследование характеристик *p-i-n GaAs/AlGaAs* соединительных туннельных диодов

Контрош Е.В.¹, Лебедев В.В.¹, Клишко Г.В.¹, Калиновский В.С.¹, Андреев В.М.¹

¹ФТИ

e-mail: kontrosh@mail.ioffe.ru

Многопереходные фотоэлектропреобразователи (МП ФЭП) на основе полупроводниковых материалов A^3B^5 имеют значительную перспективу в области высокоэффективного преобразования мощного оптического излучения с рекордным КПД >46% (AM1,5) [1]. Дальнейшее совершенствование параметров МП ФЭП связывают с повышением КПД за

счет увеличения количества фотоактивных p - n переходов и степени концентрации оптического излучения. Рост числа фотоактивных p - n переходов ведёт к росту числа соединительных туннельных диодов (ТД). В процессе технологического роста многопереходных гетероструктур ФЭП, характеристики уже выращенных соединительных туннельных диодов в процессе формирования последующих более широкозонных слоёв подвержены температурной деградации. Это связано, в первую очередь, с диффузией примеси, например, Si и Be в вырожденных слоях $GaAs/AlGaAs$ соединительных туннельных диодов, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2, 3]. Способами, позволяющими снизить деградацию характеристик туннельных диодов из-за взаимокомпенсации легирующих примесей, являются снижение температуры эпитаксиального роста и включение промежуточного нелегированного i -слоя между вырожденными p^{++} и n^{++} слоями [4].

Задачей данного исследования является оценка распределения толщины i – слоя по эпитаксиальным пластинам p - i - n соединительных туннельных диодов, выращенных методом МПЭ, а так же выявление взаимосвязи плотности пикового туннельного тока и ёмкости туннельного p - i - n перехода.

Выполнены исследования прямых темновых вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) для структур туннельных диодов $GaAs-n^{++}/i-GaAs/i-Al_{0,2}Ga_{0,8}As/Al_{0,2}Ga_{0,8}As-p^{++}$ с различной общей толщиной i слоя 7,5нм и 10нм и температурой эпитаксиального роста 450⁰С и 500⁰С. ВФХ исследуемых туннельных диодов, были получены путём измерений частотной зависимости параметра S_{11} в диапазоне частот 10-1000МГц при различных напряжениях смещения, с последующим определением параметров эквивалентной схемы диода на основе результатов проведённых измерений [5, 6].

С увеличением прямого смещения, в образцах расположенных в центре эпитаксиальных пластин, согласно полученным ВФХ ТД, наблюдается монотонный рост величины ёмкости, в то время как в образцах на периферии пластины, величина ёмкости практически не изменяется. При напряжении прямого смещения $U = 0,7В$ для структуры с технологической толщиной i – слоя 7,5нм усреднённая величина пикового тока составляла $J_{peak}=111А/см^2$, при значении емкости – 680пФ, а для структуры с i – слоем 10нм, $J_{peak}=131А/см^2$ – 615пФ. На периферии эпитаксиальной пластины ТД с i -слоем 7,5нм, имели двукратное снижение величины емкости и возрастание пикового тока до 200А/см².

Список литературы

1. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>;
2. D. L. Miller and P. M. Asbeck, J. Appl. Phys. 57, 1816,1985;
3. P. Enquist, G.W.Wicks, L. F. Eastman, and C. Hitzman, J. Appl. Phys. 58,4130,1985;
4. Калиновский В.С., Контрош Е.В., Клишко Г.В., Иванов С.В., Юферев В.С., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Андреев В.М., Разработка и исследование туннельных p - i - n -диодов $GaAs/AlGaAs$ для многопереходных преобразователей мощного лазерного излучения, Физика и техника полупроводников, Год 2020, выпуск 3, стр. 285
5. Niu Jin, Sung-Yong Chung, Ronghua Yu, Sandro J. Di Giacomo, Paul R. Berger, and Phillip E. Thompson, RF Performance and Modeling of Si/SiGe Resonant Interband Tunneling Diodes, IEEE Transactions on electron devices, vol. 52, no. 10, october 2005
6. M. W. Dashiell, James Kolodzey, P. Crozat, F. Aniel, and J.-M. Lourtioz, Microwave Properties of Silicon Junction Tunnel Diodes Grown by Molecular Beam Epitaxy, IEEE Electron device letters, vol. 23, no. 6, june 2002

Механизмы транспорта заряда в мультиструктурных фотоэлектродах для перовскитных солнечных элементов

Вильданова М. Ф.¹, Никольская А.Б.¹, Козлов С.С.¹, Шевалеевский О.И.¹

¹ИБХФ РАН

e-mail: mvildanova@sky.chph.ras.ru

Представлены разработка и исследование перовскитных солнечных элементов (ПСЭ) с фотоэлектродами на основе многослойных структур с применением материалов с очень большой шириной запрещенной зоны (>5 эВ). Сконструированы серии ПСЭ типа FTO/c-TiO₂/ZrO₂(HfO₂)/CH₃NH₃PbI₃/Spiro-MeO-TAD/Au, изучены их фотовольтаические характеристики. Предложен механизм, описывающий процессы транспорта носителей заряда на границе раздела перовскит/мультиструктурный фотоэлектрод.

Как правило, в структуре ПСЭ в качестве электропроводящего фотоэлектрода используются мезоскопические слои диоксида титана (TiO₂). Вопрос о применимости в таких системах оксидных материалов с большими значениями ширины запрещенной зоны (E_g) всегда был дискуссионным, так как транспортные характеристики материала ухудшаются по мере увеличения E_g . Значительный интерес представляет использование наноструктурированного диоксида циркония (ZrO₂) с $E_g = 5-5.7$ эВ. Существует ряд работ, описывающих применение ZrO₂ в качестве фотоэлектрода ПСЭ [1], создания на его основе мезопористого каркаса для нанесения перовскитного слоя [2], создание многослойных фотоэлектродов [3], в которых продемонстрировано существенное улучшение транспортных характеристик заряда и, соответственно, увеличение эффективности фотопреобразования по сравнению с классическими СЭ на основе TiO₂.

Отработана технология нанесения тонких мезопористых слоев <200 нм на основе нанопорошков широкозонных полупроводников ZrO₂ и сходного по структуре HfO₂, на стеклянные проводящие подложки с ~ 25 нм блокирующим слоем TiO₂ для применения в качестве фотоэлектродов ПСЭ. Изучены структурные, оптические и морфологические характеристики разработанных фотоэлектродов методами рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и оптической спектроскопии. Произведена оценка фазового состава материалов, качества поверхности, среднего размера частиц, оптической плотности. На основе разработанных фотоэлектродов изготовлены ПСЭ, исследованы их фотоэлектрические параметры: получены вольт-амперные характеристики в условиях стандартного излучения (AM1.5G), спектры квантовой эффективности, спектры электрохимического импеданса.

Максимальные КПД для СЭ на основе ZrO₂ и HfO₂ составили 12.6% и 8.5%. При сравнении фотовольтаических параметров, полученных для исследуемых СЭ по сравнению с образцами на основе TiO₂, существенное различие наблюдается в значениях напряжения холостого хода (V_{OC}). В случае ZrO₂ V_{OC} достигает 1.1 В, при этом для TiO₂ максимальное V_{OC} составляет лишь 0.95 В. Такая разница обусловлена различными механизмами переноса заряда через электропроводящий слой. Так край зоны проводимости ZrO₂ расположен на энергетической диаграмме значительно выше зоны проводимости перовскита. В результате перенос электронов в слой ZrO₂ невозможен по стандартному механизму, фотовозбужденные носители заряда не разделяются на границе раздела ZrO₂/CH₃NH₃PbI₃: происходит аккумуляция электронов в слое перовскита на границе с ZrO₂. Это накопление приводит к расщеплению квази-уровней Ферми, и таким образом, происходит увеличение V_{OC} . Морфологические исследования фотоэлектродов показали, что мезопористая структура ZrO₂/HfO₂ не образует равномерное покрытие, перовскитный слой имеет

прямой контакт с $c\text{-TiO}_2$ и, таким образом, путь транспорта электронов частично происходит через зону проводимости TiO_2 . Однако включение дополнительного тонкого слоя широкозонного материала снижает вероятность рекомбинации на границе раздела $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, а также блокирует паразитные движения электронов напрямую на FTO через сквозные отверстия, свойственные тонким слоям TiO_2 .

Таким образом, применение мультислойных структур, включающих в себя материалы с очень большой шириной запрещенной зоны, оказалось эффективным в перовскитных СЭ. За счет реализации альтернативного механизма транспорта заряда эффективность исследуемых СЭ на 10-15% превышает данные, получаемые для классических СЭ на основе TiO_2 .

Список литературы

1. Bi D., Moon S.J., Haggman L., Boschloo G., Yang L., Johansson E.M.J., Nazeeruddin M.K., Gratzel M., Hagfeldt A. // *RSC Adv.* 2013. V. 3. № 41. P. 18762-18766.
2. Priyadarshi A., Bashir A., Gunawan J.T., Haur L.J., Bruno A., Akhter Z., Mathews N., Mhaisalkar S.G. // *Energy Technology.* 2017. V. 5. № 10. P. 1866-1872.
3. Mejía Escobar M.A., Pathak S., Liu J., Snaith H.J., Jaramillo F. // *ACS applied materials & interfaces.* 2017. V. 9. № 3. P. 2342-2349.

Efficiency enhancement in planar perovskite solar cells under low-light illumination and ambient lighting

Kozlov S.S., Alexeeva O.V., Nikolskaia A.B., Vildanova M.F., Shevaleevskiy O.I.

Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russia

e-mail: sergeykozlov1@gmail.com

Perovskite solar cells (PSCs) based on hybrid organo-inorganic perovskite materials with the general formula ABX_3 , where A – CH_3NH_3^+ , $\text{HC}(\text{NH}_2)_2^+$, Cs^+ ; B – Pb^{2+} , Sn^{2+} ; X – I⁻, Br⁻, Cl⁻, have drawn intense research interest during the last decade due to their excellent optoelectronic properties and ease of fabrication [1]. The power conversion efficiency (PCE) of PSCs have been boosted to 25%, which is competitive to the PCE values for crystalline silicon solar cells [2]. High PCE values obtained for PSCs are associated with efficient light absorption and large diffusion length of charge carriers, which ensures good transport characteristics in the volume of the light-absorbing material of the perovskite solar cell.

A significant advantage of PSCs over conventional crystalline silicon solar cells is their ability to work under low light illumination and in scattered light without significant reduction in PCE [3]. Moreover, it was shown that perovskite solar cells could achieve PCE values of more than 20% under artificial ambient lighting [4]. However, the data describing performance of perovskite solar cells under low light conditions is still limited. In this work, we studied the photoelectric parameters of planar perovskite solar cells (planar PSCs) under low light illumination and under artificial lighting, and optimized the structure of perovskite solar cells to improve their performance in these conditions.

Planar perovskite solar cells with the structure FTO/ $c\text{-TiO}_2$ / $c\text{-SnO}_2$ / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /Spiro-MeOTAD/Au were developed and showed PCE values in the range of 16 – 17% under standard AM1.5 conditions (1000 W/m^2). Developed PSCs were studied under variable illumination in the range of 10 – 1000 W/m^2 and the values of their photoelectric parameters (I_{SC} , V_{OC} , FF, PCE)

were obtained. Significant enhancement in power conversion efficiency up to 18% was observed for planar PSCs under low light conditions as compared to the PCE values obtained under AM1.5 illumination.

Impedance spectroscopy (EIS) and open-circuit voltage decay (OCVD) methods were used to study the charge transfer processes in PSCs under low light illumination and the carrier lifetimes in the studied perovskite solar cells were determined. It was shown that the main factor leading to the observed enhancement in the efficiency of perovskite solar cells under low light illumination is a decrease in the recombination processes and an increase in the lifetime of charge carriers. This was attributed to the decreased charge accumulation at the ETL/perovskite interface and increased charge collection efficiency under low light illumination.

PSCs performance was additionally studied under artificial LED lighting (5500K, 1000 lux) and the PCE values exceeding 25% were obtained. High performance of planar PSCs under low-intensity LED lighting provides the possibility for their application as power sources for various low-power wireless devices (sensors, detectors, Internet of Things devices, etc.).

Список литературы

1. Gratzel M. // Acc. Chem. Res. 2017. V. 50. № 3. P. 487 – 491.
2. Green M. A., Dunlop E. D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Ho-Baillie A. W. Y. // Prog. Photovolt. Res. Appl. 2020. V. 28. № 1. P. 3 – 15.
3. Nikolskaia A.B., Kozlov S.S., Vildanova M.F., Shevaleevskiy O.I. // Semiconductors. 2019. V. 53. № 4. P. 550 – 554.
4. Chen C.-Y., Chang J.-H., Chiang K.-M., Lin H.-L., Hsiao S.-Y., Lin H.-W. // Adv. Funct. Mater. 2015. V. 25. № 45. P. 7064 – 7070.

Фотоэлектрические преобразователи с квантовыми объектами в условиях интенсивного узкополосного облучения подзонными фотонами

Паньчак А.Н., Минтаиров С.А., Минтаиров М.А., Салий Р.А., Каложный Н.А., Нахимович М.В., Шварц М. З.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a.panchak@mail.ioffe.ru

Одно из направлений физики и технологии полупроводниковых гетероструктур – встраивание квантовых (квантовых точек и тонких слоев) объектов в объемный материал или активные области р-п переходов. Такие структуры, способные как поглощать, так и излучать свет, находят свое применение в квантовой оптике, при фотодетектировании и в системах прямого фотоэлектрического преобразования световой энергии.

Включение квантоворазмерных объектов в активную область полупроводникового фотопреобразователя может быть нацелено на перераспределение светового потока внутри структуры (одномерные фотонные кристаллы – Брегговские отражатели [1, 2]) или расширение спектральной чувствительности прибора в длинноволновую область за счет поглощения подзонных фотонов [3]. При реализации второго подхода в активной области структуры формируют квантовые ямы I или II типа [4, 5], которые создают локализованные уровни разрешенной энергии в запрещенной зоне основного материала.

Фотогенерированные электроны используют их как ступеньку для перехода из валентной зоны в зону проводимости, давая вклад в фототок.

Квантовые объекты I типа образуются при включении в основной материал GaAs низкоразмерных объектов InAs. Фотопреобразователи на основе таких структур были изготовлены методом газовой эпитаксии. В образцах наблюдался прирост фототока на величину $0,07 \text{ mA/cm}^2$ в пересчете на один слой квантовых объектов при облучении солнечным излучением $\sim 136 \text{ mW/cm}^2$ [6].

Особый интерес технология встраивания InAs квантовых объектов в GaAs представляет для высокоэффективных многопереходных фотопреобразователей. Они включают в себя несколько субэлементов (p-n переходов с различной шириной запрещенной зоны) для работы в соответствующих спектральных диапазонах длин волн, что уменьшает потери на термализацию носителей заряда и неполное поглощение излучения. Одна из самых распространенных на сегодняшний момент конструкций – трехпереходный GaInP/GaAs/Ge фотопреобразователь. Его особенностью является большой фототок в нижнем узкозонном Ge субэлементе в сравнении с фототоками широкозонных GaInP и GaAs. Расширение спектрального диапазона чувствительности среднего GaAs субэлемента в область длинных волн будет способствовать увеличению его фототока при одновременном снижении этого показателя для узкозонного Ge субэлемента. В результате указанных изменений ожидается увеличение эффективности фотоэлектрического преобразования солнечного излучения.

Многопереходные высокоэффективные преобразователи активно используются в концентраторных солнечных модулях. В них оптическая мощность подводимого к фотоэлементу облучения может превышать 50 W/cm^2 (кратность концентрирования 500 и более). Поэтому исследования фотоэлектрических характеристик преобразователей со встроенными квантовыми объектами в режимах высоких и сверхвысоких облученностей представляют интерес с физической и прикладной точек зрения.

В настоящей работе представлены результаты исследований фотоэлектрических преобразователей GaAs с квантовыми объектами InAs в условиях высокоинтенсивного облучения. Для более точного определения факторов, влияющих на фотоэлектрические параметры исследуемой структуры, использовались лазеры с длиной волны излучения, настроенной на полосу поглощения основного материала GaAs или квантовых объектов. Непосредственное селективное световое воздействие на квантовые объекты позволило установить зависимость эффективности токогенерации встроенных квантовых объектов от мощности подводимого излучения, а также выявить термодинамическое влияние мощной монохроматической лазерной засветки на фотоэлектрические параметры исследуемых структур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70070

Список литературы

1. M.Z.Shvarts, O.I.Chosta, I.V.Kochnev, V.M.Lantratov, V.M.Andreev “Radiation resistant AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with internal Bragg reflector”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 68, (2001), 105-122, ISSN: 0927-0248.
2. S.A.Levina, V.M.Emelyanov, A.V.Malevskaya, E.D.Filimonov, M.Z.Shvarts “The external quantum efficiency of multijunction solar cells with built-in 1D photonic crystals”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1135 (2018) pp.012075, ISSN: 1742-6596.
3. A. Martí, L. Cuadra, A. Luque “Quantum dot intermediate band solar cell” in: Proc. 28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, IEEE, New York, 2000, pp. 940-943

4. C. Zhou, B. Liang, J. Liu, Y. Wang, Y. Guo, S. Wang, G. Fu, Y. I. Mazur, M. E. Ware, G. J. Salamo «Comparative study of photoluminescence for type-I InAs/GaAs_{0.89}Sb_{0.11} and type-II InAs/GaAs_{0.85}Sb_{0.15} quantum dots», *Optical Materials*, V. 98, December 2019, 109479
5. A. Luque, P. G. Linares, A. Mellor, V. Andreev, A. Marti “Some advantages of intermediate band solar cells based on type II quantum dots”, 2013, *Appl. Phys. Lett.*, v.103, 12 ArtNo: #123901, ISSN: 0003-6951
6. N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, R.A. Saliy, A.M. Nadtochiy, A.S. Payusov, P.N. Brunkov, V.N. Nevedomsky, M.Z. Shvarts, A. Marti, V.M. Andreev, A. Luque, Increasing the quantum efficiency of InAs/GaAs QD arrays for solar cells grown by MOVPE without using strain-balance technology, *Prog Photovoltaics*, 24, 1261-1271, 2016

Номер проекта РФФИ: 20-38-70070 Стабильность

Моделирование процессов разделения заряда в фотопреобразователях мощного модулированного высокой частотой лазерного излучения

Емельянов В.М.¹, Покровский П.В., Шварц М.З.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vm.emelyanov@mail.ioffe.ru

Использование модулированного высокой частотой мощного лазерного излучения для совместной передачи энергии и информационного сигнала представляет значительный интерес при построении как радиофотонных трактов, так и для обеспечения взаимодействия с гальванически изолированными малогабаритными сенсорами. Однако, достижение широкой полосы пропускания при высокой мощности лазерного излучения может быть затруднено по причине роста неравновесных носителей заряда в фотоактивных слоях и экранирования ими встроенного поля р-п перехода, что приводит к увеличению времени разделения электрон-дырочных пар [1-3]. Это может приводить к существенному искажению формы информационного сигнала [2] или кажущемуся росту емкости фотопреобразователя [3].

В настоящей работе с использованием динамической численной модели диффузии и дрейфа исследованы процессы разделения носителей заряда в р-и-п фотопреобразователях мощного модулированного лазерного излучения в зависимости от толщины нелегированного слоя, ширины запрещенной зоны основного полупроводникового материала и параметров излучения. Алгоритм решения основан на создании временной сетки и рассмотрении задачи как стационарной на каждом из временных интервалов. На каждом из интервалов решение ищется с применением метода последовательной верхней релаксации к уравнениям в стационарной форме. Интерполяция решения во времени между соседними точками выполняется по методу кусочной линеаризации. Решение на предыдущем интервале при этом является начальным условием для решения на следующем интервале, что позволило применить к задаче метод прямого прогона по временной оси.

Результаты расчетов показали, что в случае GaAs-фотопреобразователей для плотностей фототока до 100 мА/см² концентрации неравновесных носителей заряда в нелегированной области оказываются выше, чем соответствующие инжектированным носителям

заряда вплоть до напряжения 0,8 В (56 % от контактной разности потенциалов). Для плотностей тока более 100 А/см² уравнивание значений концентраций происходит уже при напряжении свыше 1 В (70 % от контактной разности потенциалов). Увеличение толщины нелегированного слоя приводит пропорциональному росту концентрации неравновесных носителей заряда. При этом даже концентрации $6 \cdot 10^{14}$ см⁻³ достаточно для того, чтобы в *i*-слое возник участок с полностью экранированным внешним полем. При концентрации 10^{16} см⁻³ разделение заряда встроенным полем будет происходить только вблизи р-*i* и *i*-*n* интерфейсов. Полученные результаты хорошо согласуются с измеренными емкостными характеристиками. В области малых напряжений измеренная емкость оказывается существенно больше диффузионной, так как она включает «фиктивную» емкость, образованную зарядом неразделившихся пар. В области напряжений более 1 В все измеренные вольт-емкостные зависимости для разных фототоков сливаются в одну, угол наклона которой соответствует диодному коэффициенту $A = 2$, означающему доминирование инжектированного заряда в нелегированном слое.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (Грант № 17-79-30035).

Список литературы

1. D. Tulchinsky, X. Li, N. Li, S. Demiguel, J. Campbell and K. Williams, High-saturation current wide-bandwidth photodetectors // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electronics 2004, v. 10, n. 4. pp. 702-708.
2. Chi-Kuang Sun, I-Hsing Tan, and John E. Bowers, Ultrafast Transport Dynamics of p-i-n Photodetectors Under High-Power Illumination // IEEE Phot. Technol. Lett., v. 10, n. 1, pp. 135-137 (1998).
3. V.M. Emelyanov, P.V. Pokrovskiy, N.A. Kalyuzhnyy, M. Nakhimovich, M.Z. Shvarts "Capacitive Characteristics of High-Speed Photovoltaic Converters at Combined Lighting", Semiconductors, 53(14), 1959-1963; doi: 10.1134/S1063782619140069.

Application of different gas mixtures types in p-doped layers of silicon heterojunction solar cells in the rear emitter configuration

Terukov E.I.¹, Abramov A.^{1,2}, Andronikov D.^{1,2}, Emtsev K.¹, Ivanov G.¹, Semenov A.¹, Shakhray I.³

¹R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, Russia

²Ioffe Institute, Russia

³Hevel LLC, Russia

e-mail: eug.terukov@mail.ioffe.ru

Two types of dopant gas mixtures were used for deposition of p-type amorphous layers for silicon heterojunction solar cells. Gas mixture A is commonly used to form silicon heterojunction solar cells with p-type window layer with increased band gap due to the presence of carbon in the gas mixture and helping to reduce optical losses. However, for high-performance n-type monocrystalline silicon substrates with high transverse conductivity of major charge carriers it is preferable to use the rear emitter configuration. In this case, the n/p heterojunction is located on the backside of the solar cells and the light enters the cell from the n-layer side. Therefore, the use of a wide-gap and more defective p-layer becomes inappropriate due to the increase in the series resistance and corresponding decrease in value of the cell fill factor.

In this work plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) is used to obtain amorphous silicon layers. Gas mixtures A and B are usually used as the doping gases to form the p-n junction. The gas mixture type used in the formation of the p-doped silicon layers determines the properties of both the individual silicon p-layer and the solar cell based on it. The composition of the doping gas mixtures is quite different, e.g., gas mixture contains atoms of carbon that can significantly change both optical and electrical properties of the film. The characteristic difference in the composition of the gas mixtures is the number of boron atoms per gas molecule. The number of boron atoms per hydrogen atom for a gas mixture A is several times greater than for a gas mixture B. The molecule of gas mixture A has hydrogen atoms directly bonded to the boron atom in contrast to the gas mixture B. Therefore, the degree of decomposition of the molecules and the growth conditions of the film can be very different when using one gas mixture or another. An important feature of using gas mixture B as doping is its thermal instability at temperatures ranging from 160–200 °C, that can lead to the accumulation of impurities in the gas shower of the growth chamber and complicate the process of controlling the doping level during the deposition process.

The purpose of this work is to study the peculiarities of the application of gas mixtures A and B in the formation of p-doped layer and solar cells based on it in the rear emitter configuration.

Исследование травления полистирольных сфер в кислородной плазме для формирования маски травления кремниевых вертикально упорядоченных структур

Морозов И.А.¹, Вячеславова Е.А.², Кудряшов Д.А.¹, Баранов А.И.¹, Уваров А.В.¹, Гудовских А.С.^{1,2}

¹СПБАУ РАН

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: morivan@mail.ru

Одной из набирающих популярность концепций формирования солнечных элементов на кремнии является структуры на основе вертикально-упорядоченных кремниевых наноструктур как на подложке кремния, так и на гибкой полимерной матрице. Технология получения таких структур основана на наносферной литографии и последующим криогенным плазмохимическим травлением. Поверхность кремния, покрывается монослоем полистирольными сферами с использованием технологии центрифугирования. Диаметр сфер определяет расстояние между кремниевыми волокнами. В то время как диаметр кремниевых волокон можно контролировать путем травления полистирольных сфер в кислородной плазме. В данной работе исследуется влияние процессов травления как в индуктивно связанной плазме, так и в плазме с ёмкостной связью. В работе показано влияние различных режимов травления сфер на их геометрию, влияние предварительной обработки на устойчивость сфер. Продемонстрирован эффект формирования кластеров из полистирольных сфер за счет электростатического притяжения в процессе травления в плазме. Разработан подход, препятствующий образованию кластеров. Показано, что использование индуктивно связанной плазмы и предварительного нагрева сфер позволяет получить устойчивую маску на поверхности как кремния, так и оксида кремния, с требуемой геометрией.

Управление люминесцентным рециклированием в многопереходных солнечных элементах с Брэгговскими отражателями

Левина С. А.¹, Филимонов Е.Д., Шварц М.З.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: levina@mail.ioffe.ru

Температура оказывает существенное влияние на характеристики многопереходных солнечных элементов (МП СЭ), их производительность и надежность. Так, например, нагрев или охлаждение СЭ приводит к изменению ширины запрещенной зоны р-п переходов, входящих в его структуру, что в результате меняет спектральный диапазон и количество фотонов, поглощаемых каждым из субэлементов, и соответственно значения генерируемых ими фототоков. Одновременно с нарушением установившегося токового баланса изменяется внутренний радиационный (люминесцентный) режим, задаваемый проникновением рекомбинационного люминесцентного излучения в соседние фотоактивные субэлементы и формирующей оптической связью между ними. За последние годы опубликовано значительное количество работ, в которых освещается люминесцентное взаимодействие между р-п переходами [1-4]. Очевидно, что встраивание в структуру (между субэлементами) селективно настраиваемых Брэгговских отражателей (БО) изменит характер люминесцентных взаимодействий, в том числе и регулируемых температурой СЭ. Однако исследований, рассматривающих влияние температуры на характеристики МП СЭ со встроенными брэгговскими отражателями (БО), крайне мало [5]. Будучи настроенным на возврат в структуру слабо поглощаемого длинноволнового излучения БО способен (при согласовании его фотонной запрещенной зоны и спектра люминесценции, излучающего субэлемента) обеспечить блокировку оптической связи, «запирая» люминесцентное излучение и усиливая его рециклирование в широкозонных полупроводниковых слоях, расположенных над БО [5]. При этом должно наблюдаться уменьшение фототока субэлемента, поглощающего люминесценцию, а также регистрироваться прирост напряжения холостого хода в субэlemente с рециклируемым излучением и для МП СЭ в целом.

Данная работа направлена на исследование указанных процессов, эффективность которых регулируется с помощью температуры. В эксперименте в режиме ограничения по фототоку Ge субэлемента регистрируются вольт-амперные характеристики GaInP-GaAs-Ge МП СЭ с и без встроенных БО в диапазоне от 80 до 400К. Зарегистрированные данные для Ge сравниваются с оценочными значениями, полученными при анализе его фоточувствительности и интенсивности электролюминесценции GaAs р-п перехода. Для МП СЭ с зеркалом наблюдаются значительные расхождения в определяемых токах германиевого субэлемента при температурах, соответствующих согласованию спектров отражения БО и люминесценции из GaAs, т.е. режиму «запирания» рекомбинационного излучения в слоях GaAs субэлемента. При аналогичном сравнении фототоков у образца без БО расхождения не выявлены. Дополнительно в режиме блокировки оптической связи регистрировалось увеличенное, по сравнению с образцом без зеркала, напряжение холостого хода, обусловленное усилением рециклирования в широкозонном GaAs субэlemente.

Список литературы

1. M.Z. Shvarts, M.A. Mintairov, V.M. Emelyanov, V. V. Evstropov, V.M. Lantratov, N.K. Timoshina, Method for direct measurements of luminescent coupling efficiency in concentrator MJ SCs, AIP Conf. Proc., 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4822219>.

2. O.D. Miller, E. Yablonovitch, S.R. Kurtz, Strong internal and external luminescence as solar cells approach the Shockley-Queisser limit, IEEE J. Photovoltaics. (2012). <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2198434>.
3. C. Baur, M. Hermle, F. Dimroth, A.W. Bett, Effects of optical coupling in III-V multilayer systems, Appl. Phys. Lett. (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2737927>.
4. M.A. Steiner, J.F. Geisz, Non-linear luminescent coupling in series-connected multijunction solar cells, Appl. Phys. Lett. (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4729827>
5. S.A. Levina, E.D. Filimonov, A.V. Malevskaya, M.Z. Shvarts, Bragg reflectors as a light trap in multijunction solar cells, 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1199 012033

Номер проекта РФФИ: 20-38-70070_Стабильность

Увеличения плотности энергии аккумуляторов для электропривода легких транспортных средств путем управления поляризованностью сегнетоэлектриков

Зубцов В.И., Тромбицкий Е. А.

¹ПГУ, Белоруссия

e-mail: subcv@rambler.ru

Развитие парникового эффекта с последующим изменением климата в значительной мере спровоцированы токсичными выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания. В связи с этим одним из решений существующих серьезных экологических проблем является производство электромобилей (или гибридных автомобилей), как транспортных средств. Электромобиль может на одной зарядке аккумуляторов проехать пока немного: в лучшем случае, 400 км в среднем (в зимнее время несколько меньше). Но его источник питания (аккумуляторы) весит, примерно, половину этого автомобиля и стоимость его также около половины. Причина в том, что энергия современных аккумуляторов слишком мала. Несмотря на то, что плотность энергии аккумуляторов в последнее время увеличилась в 2 раза, они все еще имеют большие вес и размеры. Известные простые способы увеличения плотности энергии аккумуляторов за счет усовершенствования их внутреннего устройства практически исчерпаны. Что бы аккумуляторы могли заменить традиционно используемые двигатели внутреннего сгорания, их плотность энергии нужно увеличить в 10 – 20 раз. Такое увеличение энергоемкости аккумуляторов на ближайшую перспективу маловероятно. Использование энергии солнца и ветра также пока малоэффективно. Кроме того, национальные интересы стран, добывающих углеводородное сырье, являются сдерживающим фактором в развитии электромобилей. Таким образом, задача увеличения энергоемкости аккумуляторов требует решения. В связи с вышеизложенным, предлагается экологически чистая установка альтернативной инновационной технологии с использованием электрохимического генератора (ЭХГ) на основе сегнетоэлектриков [1]. Такая энергоустановка повышает удельную энергию (плотность энергии) аккумулятора в 3.5 ... 5 раз, в зависимости от модификации керамики и электрической схемы включения. Установка (взаимодействующие электромеханический преобразователь, устройство получения механической энергии и ЭХГ) увеличивает плотность энергии аккумулятора в два этапа: на первом происходит увеличение поляризованности ЭХГ, на втором – увеличение электрической мощности на выходе установки. Для рационального использования

ЭХГ является важным определением диапазона его рабочих частот колебаний. Разработана математическая модель электромеханического преобразователя, во взаимодействии с ЭХГ. Конструкции электромеханического преобразователя и ЭХГ кроме сегнетоэлектрических элементов, которые можно представить как резонансный контур, имеют и другие второстепенные элементы. Поэтому в динамике эти пружинно-массовые конструкции имеют сложный спектр собственных частот и в электрической цепи ведут себя как последовательно – параллельный контур [2], который имеет две частотные постоянные: два резонанса – последовательный и параллельный (так называемый антирезонанс). Потребление от аккумулятора предлагаемой установкой 1 Дж энергии дает возможность с использованием механической энергии получить на выходе установки 3,5...5 Дж электрической энергии. То есть использование установки позволяет уменьшить потребление энергии аккумулятора в 3,5... 5 раза и тем самым увеличить пробег электротранспорта на одной зарядке аккумулятора также в 3,5... 5 раза. КПД предлагаемой энергетической установки для увеличения плотности энергии примерно 55...60 %.

Список литературы

1. Зубцов В.И., Зубцова Е.В. Увеличение удельной мощности и удельной энергии устройства на основе сегнетопьезоактивной керамики для электропривода //Матер.междун. конф. по физике и астрономии./ФТИ им. А.Ф. Иоффе.- С-Петербург, 2013 – с.243-244.
2. Zubtsov V.I. Control of the physical properties of materials using piezoelectrics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013 – 262 p.

Effect of the height of aligned carbon nanotubes on their piezoelectric response

O.I. Osotova¹, M.V. Il'ina¹, A.V. Guryanov¹, N.N. Rudyk¹, O.I. Il'in¹

¹Southern Federal University, Russia

e-mail: osotova@sfedu.ru

The rapid development of wearable electronics has led to the need for new sources of electrical energy. A promising energy source is a piezoelectric nanogenerator that generates an electric current in the presence of mechanical deformations [1]. This device allows to use various types of deformations, such as vibrations, wind and car noise [1]. To form a nanogenerator, it is necessary to use a material with increased mechanical and electrical characteristics. Such a material must not only generate electrical energy when mechanical deformation is applied to it, but also have increased resistance to repeated elastic deformations. One such material is carbon nanotubes (CNTs). The CNTs show high values of the piezoelectric response and Young's modulus, which makes them a promising material for the formation of nanopiezotronics devices [2, 3].

The aim of this work is studying the dependence of the piezoelectric response of aligned carbon nanotubes on their height.

The studied samples were arrays of vertically aligned carbon nanotubes grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition on Cr and TiN sublayers with a thickness of 100 nm. The parameters of the studied nanotubes were determined using the Nova Nanolab 600

scanning electron microscope (SEM). The average height of the grown on the Cr sublayer CNTs was 6.0, 7.5, and 12 μm . The average height of the grown on the TiN sublayer CNTs was 10, 11, and 14 μm . The average diameter for CNTs was 50 nm for the Cr sublayer and 60 nm for the TiN sublayer.

Experimental studies were carried out using a previously developed technique based on the atomic force microscope (AFM) based on force spectroscopy method [2]. Deformation of the aligned CNTs was carried out by controlled mechanical influence using the AFM probe. A cantilever of the HA_NC/Pt brand was used as an AFM probe. A built-in AFM oscilloscope was used to detect the value of the piezoelectric current during CNT deformation. The aligned CNTs were scanned in the semi-contact AFM mode before measurements.

Analysis of the obtained results showed that the dependence of the piezoelectric response for CNTs grown on the Cr sublayer on CNT height is linear (Figure 1). Thus, the value of the generated current decreased from 19 to 5 nA with an increase the CNT height from 6 to 12 μm . This dependence is due to the fact that an increase the height of the nanotube leads to a decrease the value of its relative deformation at a fixed force. As a result, the generated current value is decreased. Increasing the height of the CNTs grown on the TiN sublayer from 10 to 14 μm did not lead to a significant change in the piezoelectric response. The value of the generated current was 21 – 22.5 nA. This dependence may be due to the fact that individual CNTs were combined into bundles during the preliminary scanning in semi-contact mode. This fact led to the formation of the initial strain in the CNTs, which was the source of the detected current, the value of which is weakly dependent on external mechanical force.

Thus, the dependence of the piezoelectric response of CNTs on their height was studied. It was found that the generated current value decreases with increasing height of CNTs. It is associated with a decrease in their relative deformation value. It is also shown that the sublayer material have a significant effect on the amount of generated current. Thus, the value of the generated current in CNTs grown on the TiN sublayer is higher than in CNTs grown on the Cr sublayer. This is due to the influence of the CNT density in the array and of forming CNT bundles under the action of an external force. The obtained results can be used to develop and create promising elements of nanoelectronics based on aligned carbon nanotubes.

Список литературы

1. Hu Y. and Wang Z.L. 2014 *Nano Energy* 14, 3–14
2. Пина М.В, Пин О.И., Блин Ю.Ф., Коншин. А.А., Коноплев В.Г. and Ageev O.A. 2018 *Materials* 11, 638
3. Пина М.В, Коншин. А.А., Солонин Е.Г. 2018 *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1124, 071010

A comparative study of the performance features of heterojunction and diffusion SI modules in humid continental and subarctic climates

Titov A.^{1,2}, Emtsev K.^{1,2}, Andronikov D.¹, Abramov A.¹, Bulygin B.³, Dubrovskiy A.³, Orekhov D.¹, Terukov E.^{1,2}, Shakhray I.⁴

¹R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics, Russia

²Toffe Institute, Russia

³Hevel LLC, Russia

⁴Avelar Solar Technology, Russia

e-mail: titovoz@gmail.com

Silicon heterojunction (Si-HJ) technology enables record cell and modules efficiencies that are higher than the currently mainstream PERC technology. Further, due to lower temperature coefficients of the HJT modules an additional energy gain is expected for the HJT modules as compared to the PERC modules in hot weather conditions. In present work, we will directly compare outdoor performance of the HJT modules assembled in mono- and bifacial designs with respect to mono-PERC and mc-PERC modules in comparatively cold humid continental and subarctic climates. The monofacial HJT modules manufactured at the Hevel fab in Novocheboksarsk, Russia [1]. The performance of several HJT modules with different total monitoring period including high efficiency module with 320W output power and bifacial HJT module is monitored. The PERC modules are commercial modules produced by Top 5 solar manufacturers with mono- and bifacial designs. Overall description of the modules under study with their respective power and monitoring period is:

- Cell type – Production HJT, N of cells – 60 cells, module type – monofacial, power – 320W, 9 months of monitoring;
- Cell type – Production HJT, N of cells – 60 cells, module type – monofacial, power – 295-305W, 30 months of monitoring;
- Cell type – Production HJT, N of cells – 72 cells, module type – bifacial, power – 370W, 3 months of monitoring;
- Cell type – mono-PERC, N of cells – 60 cells, module type – monofacial, power – 305W, 12 months of monitoring;
- Cell type – mc-PERC, N of cells – 60 cells, module type – monofacial, power – 275W, 12 months of monitoring;
- Cell type – mono-PERC, N of cells – 72 cells, module type – bifacial, power – 370W, 7 months of monitoring;

The monitoring station is located in Novocheboksarsk, Russia (N56°07', E47°30'). The monitoring parameters such as I_{mpp} , V_{mpp} , P_{mpp} are evaluated in relation to solar irradiance, module and ambient temperatures. The aim of the monitoring activity is to allow a better understanding of module performance for each technology in the central Russia climatic conditions. By the time of the conference, the direct comparison of the HJT and PERC performance in winter and summer time will be presented. In addition, annual degradation rate for the HJT modules is estimated based on the regular indoor STC measurements. Furthermore, in order to test the stability of the HJT modules in extreme cold weather conditions met in Russia, several production HJT modules were installed and monitored in the strongly continental polar climate with winter temperatures down to -55°C.

Список литературы

1. D. Andronikov, A. Abramov, S. Abolmasov, K. Emtsev, G. Ivanov, A. Kukin, I. Nyapshaev, D. Orekhov, A. Semenov, G. Shelopin, E. Terukova, E. Terukov, N. Belkova, A. Dubrovskiy, P. Ishmuratov, A. Ivanov, D. Saykin, I. Shakhray, A. Smirnov, V. Tarasov, V. Timakov, A. Tomchinskiy, G. Kekelidze. "A Successful conversion of silicon thin-film solar module production to high efficiency heterojunction technology", 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, p.732 (2017).
2. K. Emtsev, D. Malevskiy, D. Andronikov, A. Abramov, S. Yakovlev, A. Titov, E. Terukov, D. Orekhov, B. Bulygin, A. Dubrovskiy. "Outdoor performance analysis of the si-heterojunction modules with different cell and module designs". 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, p.1628 (2017).

Малоугловые и дифракционные рентгеновские исследования порошков на примере LiFePO_4

Бойко А. М.¹, Шарков М.Д., Бойко М.Е., Касаткин И.А., Бобыль А.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: andray599@gmail.com

Проведено сравнение размеров зерен серии высокоэффективных образцов LiFePO_4 , используемых при изготовлении литий-ионных аккумуляторов, измеренных двумя рентгеновскими методами: малоугловое ($-3^\circ - +3^\circ$) рассеяние (МУРР) [1] и дифракционное рассеяние в области больших 2θ углов ($10^\circ - 150^\circ$) с использованием рентгеновского дифрактометра BRUKER DISCOVER D8 в режиме высоко разрешения.

Для анализа результатов дифракционных исследований использовалась программа MAUD (PolaLB, Delft), а для анализа малоуглового – была разработана модель учета вклада первичного пучка и программа обработки результатов измерений.

Согласно этой модели, кривые малоуглового рассеяния рентгеновских лучей формируются композицией эффектов исследуемого материала и падающего на образец пучка. Необходимо восстановить форму кривой пропускания образца на основании данных о падающем и рассеянном пучках, которая представляет собой свёртку падающего пучка с кривой рассеяния образца, путем обратного преобразование этой свёртки. В общем случае, это задача сводится к интегральному уравнению Фредгольма первого рода. Из свойств свёртки известно, что она обращается через отношение Фурье образов входной и выходной функций. Но такое решение имеет известную неустойчивость, связанную с тем, что зашумлённые сигналы могут давать нули в Фурье образе и приводить к "делению на 0" [2]. Для преодоления этой сложности используются аналитические методы регуляризации решений, которые хорошо работают для мощных сигналов. Для сигналов в области относительно высоких шумов регуляризация подавляет полезный сигнал вместе с шумами. В работе предлагается рассмотреть, как классический метод восстановления кривой рассеяния через преобразование обратной свёртки, так и метод прямого восстановления кривой рассеяния. Метод прямого восстановления состоит в поиске такой модельной кривой рассеяния, которая минимизирует ошибку (L2 норму) между измеренной кривой рассеяния и кривой, полученной при прямой свертке первичного пучка с модельной кривой

пропускания. Этот метод фактически является методом многопараметрической оптимизации, что эквивалентно "обучению" однослойной искусственной нейронной сети (ИНС) [3].

Полученные результаты показали, что прямое восстановление кривой пропускания за счет подавления шумов увеличивает диапазон корректно обрабатываемых углов МУРР в 1.5-3 раза, что повышает точность определения размеров зерен. Таким образом, в кривой малоуглового рассеяния помимо центрального пика, содержащего информацию о соотношении размера и плотности частиц, удалось выделить из шумов методом ИНС [4] структурные пики, которые коррелируют уже непосредственно с размерами частиц.

Получены значения областей когерентного рассеяния (ОКР) серии образцов LiFePO_4 дифракционными измерениями в диапазоне 150 – 800 нм, широкоугловые измерения дали несколько меньшие значения изотропного радиуса гирации, что, возможно, связано с однородностью заполнения зерен.

Разработанный подход является универсальным и применимым для исследования широкого круга твердотельных материалов.

Список литературы

1. Small-Angle X-Ray Scattering. / Ed. by O. Glatter and O. Kratky. London: Academic Press, 1982. 516 p.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.
3. Simon S.Haykin "Neural Networks and Learning Machines", New York, 2011
4. Yu Hen Hu, Jenq-Neng Hwang, "Handbook of Neural Network Signal Processing" 2002.

Температурная подстройка выходных фотоэлектрических параметров преобразователей лазерного излучения

Шварц М. З.¹, Емельянов В.М.¹, Минтаиров С.А.¹, Минтаиров М. А.¹, Нахимович М.В.¹, Калюжный Н. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

Фотоэлектрические приемники-преобразователи лазерного излучения (ЛИ) находят все более широкое применение при удаленном (с передачей энергии по оптоволокну или по открытым каналам) энергопитании систем и устройств. Доступная на сегодняшний день номенклатура мощных лазеров охватывает несколько основных спектральных диапазонов длин волн, отвечающих полосам прозрачности атмосферы (для открытых каналов передачи энергии) и оптоволокну (для соответствующих трактов). Здесь наибольший интерес представляют длины волн 808-860 нм и 1064 нм, на которых возможно эффективная передача энергии лазерного излучения. Очевидно, что для эффективного преобразования энергии фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) должен быть «настроен» на длину волны лазерного излучения и согласован по конструктивным и функциональным параметрам на работу в режиме повышенных освещенностей.

Спектральная настройка определяется шириной зоны полупроводникового материала, выбираемого по критерию снижения потерь мощности на термализацию сфотогенированных носителей заряда. Так в диапазоне длин волн ЛИ 808-860 нм наивысшая эффективность преобразования (~ 60%) достигнута в ФЭП на основе GaAs [1]. Преобразование ЛИ с длиной волны 1064 нм может быть осуществлено ФЭП, формируемых на основе

метаморфных структур InGaAs/GaAs, выращенных на GaAs или Ge подложках, структур четверных растворов InGaAsP, согласованных по параметру решетки с InP, а также на основе кристаллического кремния.

Наиболее перспективным и одновременно спектрально гибким подходом следует считать вариант метаморфных ФЭП, при котором по мере увеличения процентного содержания In в твердом растворе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ обеспечивается плавное изменение ширины запрещенной зоны. Так для настройки ФЭП по максимальной спектральной чувствительности на длину волны 970 нм или 1064 нм следует использовать $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ слои толщиной до 3 мкм при доле индия $x = 0,12$ или $x = 0,22$, соответственно. В случае предельно близкого спектрального согласования лазерной линии и края поглощения полупроводникового материала будет обеспечиваться и максимальное напряжение ФЭП. На сегодняшний день КПД таких ФЭП превысил рубежный показатель в 50 % при преобразовании лазерного излучения с длиной волны 1064 нм [2].

Дальнейшее повышение эффективности ФЭП требует тщательной оптимизации электрических и оптических параметров гетероструктур с учетом температурных режимов функционирования приборов. Применение Брэгговских отражателей (БО) является известным подходом по управлению процессами поглощения излучения и улучшению эффективности собирания фотогенерированных носителей (что особенно актуально при диффузионных длинах, характерных для метаморфных структур) за счет двукратного его прохождения через структуру ФЭП [3, 4]. Очевидно, что при надлежащем структурном и оптическом «менеджменте», охватывающем процессы выбора состава и толщин $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ слоев и параметров БО можно обеспечить выход ФЭП на максимум эффективности преобразования ЛИ при заданной подводимой световой мощности и температуре, определяемой радиационным нагревом прибора.

В работе представлены варианты структурной оптимизации метаморфных InGaAs ФЭП с БО, ориентированных на преобразование мощного ЛИ с длиной волны 1064 нм, при рабочих температурах приборов в диапазоне до 150 С.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-70070 Стабильность.

Список литературы

1. V. P. Khvostikov, S. V. Sorokina, N. S. Potapovich, O. A. Khvostikova, N. Kh. Timoshina, and M. Z. Shvarts «Modification of Photovoltaic Laser-Power ($\lambda = 808$ nm) Converters Grown by LPE», *Semiconductors*, v.52, Issue 3, pp.366-370, 2018, ISSN: 1063-7826
2. N.A. Kalyuzhnyy, V. M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, and M.Z. Shvarts, “Thermal and resistive losses in InGaAs metamorphic laser ($\lambda = 1064$ nm) power converters with over 50% efficiency”, *AIP Conference Proceedings* 2149, 050006 (2019).
3. M.Z.Shvarts, O.I.Chosta, I.V.Kochnev, V.M.Lantratov, V.M.Andreev “Radiation resistant AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with internal Bragg reflector”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 68, (2001), 105-122.
4. X. Duan, Y. Huang, Y. Shang, J. Wang, and X. Ren, «High-efficiency dual-absorption InGaAs/InP photodetector incorporating GaAs/AlGaAs Bragg reflectors,» *Opt. Lett.* 39, 2447-2450 (2014)

Исследование особенностей формирования твердой маски SiO₂ с использованием плазмохимического травления и наносферной литографии

Вячеславова Е.А.¹, Морозов И.А.², Кудряшов Д.А.², Гудовских А.С.^{1,2}

¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

²СПбАУ РАН

e-mail: cate.viacheslavova@yandex.ru

В связи с истощением запасов традиционных источников энергии, а также с загрязнением атмосферы отходами производства все больше внимания уделяется возобновляемым источникам энергии, в том числе энергии солнца.

Для преобразования солнечной энергии в электричество используются солнечные элементы (СЭ), которые изготавливаются преимущественно из кремния. Их широкое применение обусловлено развитой кремниевой технологией, и возможностью получения на основе кремния СЭ с оптимальным отношением эффективность/стоимость. Однако, на данный момент эффективность таких СЭ уже близка к теоретическому пределу [1], поэтому требуются новые подходы. Один из таких подходов подразумевает использование вертикально-ориентированных кремниевых наноструктур, которые позволяют увеличить оптическое поглощение в материале при сохранении его толщины за счет радиального *p-n* перехода.

В технологии формирования вертикально-ориентированных кремниевых структур можно выделить несколько этапов, одним из которых является создание маски для последующего травления подложки, в качестве которой могут использоваться латексные наносферы. Как представлено в статье [2] латексные наносферы наносились сразу на подложку. Получаемые после процесса травления структуры имели ограничение по глубине травления, связанное с травлением сфер в процессе криогенного травления из-за присутствия кислорода в плазме. Для решения этой проблемы в качестве маски для травления кремния необходимо использовать материал устойчивый, особенно к кислороду, например, оксид кремния. Для формирования нужной геометрии маски используется плазмохимическое травление (ПХТ), поскольку оно является анизотропным.

Таким образом, в данной работе поставлена задача формирования твердой маски SiO₂ с использованием плазмохимического травления и наносферной литографии.

В ходе работы была проведена серия экспериментов с различными вариациями параметров ПХТ такими, как ICP мощность, RF мощность, давление и температура подложки. Были подобраны оптимальные параметры для получения высокой селективности и скорости травления.

Список литературы

1. Kato, S., Kurokawa, Y., Gotoh, K. et al. Silicon Nanowire Heterojunction Solar Cells with an Al₂O₃ Passivation Film Fabricated by Atomic Layer Deposition, *Nanoscale Res. Lett.* 14, 99 (2019).
2. Morozov, I., Gudovskikh, A., Uvarov, et al. The Study of Latex Sphere Lithography for High Aspect Ratio Dry Silicon Etching, *Phys. Stat. Sol.A*, 1900535 (2019).

Исследование температурных зависимостей ВАХ селективных контактов p-Si/MoO_x и n-Si/LiF/Ta

Макимова А. А.¹, Баранов А.И.², Кудряшов Д.А.², Гудовских А.С.^{1,2}

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²СПбАУ РАН

e-mail: deer.blackgreen@yandex.ru

В настоящее время растет интерес к использованию возобновляемых источников энергии, в том числе, к солнечной энергетике, основными направлениями развития которой является разработка новых конфигураций солнечных элементов (СЭ) с целью повышения эффективности, снижение стоимости, а также массы – для доставки на околоземную орбиту. На стоимость изготовления СЭ сильное влияние оказывают в первую очередь стоимость подложки и энергозатраты на технологические процессы. Например, при создании тыльного контакта к наиболее распространенным кремниевым СЭ используют высокотемпературное вжигание алюминия ($T > 600$ °С).

В последнее время растет интерес к системам материалов, обладающих селективными свойствами по отношению к транспорту носителей заряда определенного знака, в частности, к селективным контактам [1, 2]. Так, например, в [3] было показано, что селективные контакты на основе оксида молибдена могут успешно использоваться при изготовлении СЭ, при этом эффективность достигает 18%. Известно, что измерения КПД СЭ поводят при 25 °С, однако их эксплуатация может проводиться и при отрицательных температурах, при этом меняются параметры зонной структуры системы кремний/селективный контакт. Целью данной работы является исследование транспорта носителей через селективные контакты на основе оксида молибдена и фторида лития при использовании кремниевых подложек различного уровня и типа проводимости в широком температурном диапазоне.

В ходе работы были изготовлены модельные структуры p-Si/MoO_x и n-Si/LiF/Ta, где нижний контакт являлся сплошным, а верхний осаждался с использованием металлической маски с отверстиями 4×4 см². Таким образом, получали симметричную структуру. Пленки оксида молибдена и фторида лития осаждались методом термического испарения. Тантал формировался методом магнетронного распыления.

Сравнительные измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) показали, что при снижении температуры изменяется вид ВАХ в сторону снижения рабочих токов. В случае с n-Si/LiF/Ta уже при 0 °С величины токов снижались на порядок, в то время как для системы p-Si/MoO_x температурная зависимость ВАХ показала нелинейный характер, проходящий через максимум.

В работе приводятся результаты компьютерного моделирования работы данных систем в сравнении с полученными экспериментальными данными.

Список литературы

1. James Bullock et al. // Applied Physics Letters 105, 232109 (2014)
1. James Bullock et. al. // Adv. Energy Mater. 2016, 1600241
2. C. Battaglia et. al. // Applied Physics Letters 104 (11), 113902 (2014).

Поле необратимости и анизотропный пиннинг
в сверхпроводящих Nb-Ti лентахГурьев В. В.¹, Шавкин С.В.¹, Круглов В.С.¹¹НИИЦ «Курчатовский институт»

e-mail: GuryevVV@mail.ru

Как известно, верхним пределом магнитного поля, фактически определяющим границы прикладного использования сверхпроводящего материала II-го рода, является так называемое «поле необратимости» $H^*(T)$, при достижении которого исчезает гистерезис намагниченности, а токнесущая способность снижается на несколько порядков [1]. Величина H^* всегда меньше верхнего критического поля H_{c2} , при котором сверхпроводящее состояние полностью подавляется магнитным полем. Для некоторых сверхпроводящих материалов, имеющих неплохие перспективы практического применения, например, для керамических ВСТП или MgB_2 , различие в величинах H^* и H_{c2} оказывается обескураживающе большим [1].

Обычно предполагается, что существование поля необратимости – это следствие качественного изменения фазового состояния вихревой материи (ансамбля вихрей Абрикосова). При этом считается, что поле необратимости – это точка фазового перехода из состояния вихревого стекла в состояние вихревой жидкости [2]. Явление исчезновения гистерезиса намагниченности и фактически нулевой критической ток объясняются тем, что вихревая жидкость не может пинниговаться на структурных дефектах материала.

Ранее мы показали, что в низкотемпературных сверхпроводниках, по крайней мере, в холоднокатаных Nb-Ti лентах, в диапазоне полей $H^* < H < H_{c2}$ устанавливается безвихревое сверхпроводящее состояние, обусловленное микронеоднородностью материала: различием сверхпроводящих свойств массива зерна и его границ [3, 4]. Таким образом, в этом сверхпроводящем материале H^* является естественной границей применимости моделей электродинамики, использующих представление о вихревой структуре, в т.ч. моделей анизотропии пиннинга [5]. Микроструктура Nb-Ti лент была детально исследована методами электронной микроскопии [6] и рентгеновской дифракции [7], что дало надежные количественные оценки о характеристиках микронеоднородности материала.

В настоящей работе мы представляем результаты расчета силы пиннинга в холоднокатаном ниобий-титановом сплаве в поле вплоть до H^* , используя данные о микроструктуре материала и связях с предложенной моделью поля необратимости. Полученные оценки демонстрируют разумное согласие с классической теорией пиннинга Ларкина-Овчинникова [8], развитой для холоднодеформированных металлических сверхпроводящих сплавов. Обсуждаются возможности введения корреляционной длины пиннинга в качестве масштабирующего фактора анизотропной потенциальной ямы в модели анизотропного пиннинга [5].

Список литературы

1. Larbalestier D., Gurevich A., Feldman D.M., Polyanskii A. «High-Tc superconducting materials for electric power applications» Nature (2001) 414, 15.

2. Nattermann T., Scheidl S. «Vortex-glass phases in type-II superconductors» *Advances in Physics* (2010) 49:5, 607-704.
3. Клименко Е.Ю., Шавкин С.В., Волков П.В. «Проявление макронеоднородности сверхпроводников с сильным пиннингом в зависимостях поперечных ВАХ от магнитного поля вблизи H_{c2} » *Физика металлов и металловедение* (2001) 92, 3
4. Guryev V., Shavkin S., Kruglov V. «Inhomogeneity and irreversibility field of superconducting Nb-Ti tapes» *EPJ Web of Conferences* (2018) 185, 08004
5. Клименко Е.Ю., Шавкин С.В., Волков П.В. «Анизотропный пиннинг в макроскопической электродинамике сверхпроводников» *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики* (1997) 112, 3(9).
6. Овчаров А.В., Каратеев И.А. Каратеева К.Г. и др. «Исследование микроструктуры лент Nb-Ti методами электронной микроскопии» *Кристаллография* (2019) 64, №6, 852-866
7. Гурьев В.В., Шавкин С.В., Иродова А.В., Круглов В.С. «Особенности фазового расслоения сильно текстурированной ленты из сплава Ti-33at.%Nb в результате искусственного старения» *Вопросы материаловедения* (2017) № 4(92)
8. Larkin A.I., Ovchinnikov Yu.N. «Pinning in type II superconductors» *Journal of Low Temperature Physics* (1979) 34, 3/4, 409.

Квазирезонансное возбуждение экситонных комплексов в одиночных квантовых точках InAs/AlGaAs

Галимов А. И.¹, Рахлин М.В.¹, Серов Ю.М.¹, Клишко Г.В.¹, Торопов А.А.¹

¹ФТИ

e-mail: aidar-34-dom94@yandex.ru

Полупроводниковые квантовые точки (КТ), выращенные эпитаксиальными методами, рассматриваются как основа для создания устройств квантовой фотоники, таких как однофотонные источники с высокой степенью неразличимости для приложений в области квантовой обработки и передачи информации. Перспективным является система (In, Al, Ga) As, которая позволяет создавать однофотонные источники в широком инфракрасном спектральном диапазоне от 1,3 мкм (InAs / InGaAs) до 890 нм (InGaAs / GaAs). В работе [1] авторы расширили рабочий спектральный диапазон до красного видимого света (вплоть до 700 нм) с помощью КТ InAs / AlGaAs. Этот диапазон соответствует наибольшей чувствительности современных однофотонных кремниевых лавинных фотодиодов, работающих при комнатной температуре. На сегодняшний день, наивысшая степень неразличимости одиночных фотонов, полученная в структурах с КТ InAs/AlGaAs с резонансной надбарьерной оптической накачкой, составила всего около 30% [2]. Неразличимость одиночных фотонов может быть улучшена за счет реализации либо резонансной накачки основного состояния, либо квазирезонансной накачки возбужденных состояний экситонных комплексов, что приводит к значительному уменьшению спектральной диффузии излучения одиночных КТ и, следовательно, к увеличению степени неразличимости [3]. По сравнению с чисто резонансной накачкой реализация квазирезонансной с технической точки зрения значительно проще, обеспечивая при этом достаточно высокую степень неразличимости.

В настоящей работе экспериментально исследована возможность квазирезонансного возбуждения экситонных комплексов в одиночных КТ InAs/AlGaAs. Оптические свойства отдельных квантовых точек исследованы с помощью микрофотолюминесцентной (μ -PL) спектроскопии, которая подтверждает однофотонную природу излучения квантовых точек. Образцы выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs [001]. Самоорганизованные КТ InAs формировались в матрице AlGaAs методом Странского-Крастанова.

Возбужденные экситонные состояния в выращенных КТ были обнаружены с помощью μ -PL спектроскопии при различных мощностях возбуждения. При малых мощностях возбуждения в спектре отчетливо наблюдается серия линий, соответствующих рекомбинации экситонных комплексов с основного состояния. При увеличении мощности в области более коротких длин волн появляется серия линий, соответствующих рекомбинации экситонных комплексов с возбужденных состояний. Для изучения возможности квазирезонансной накачки через возбужденные состояния использовалась спектроскопия микрофотолюминесцентного возбуждения одиночной КТ (μ -PLE). В результате удалось сопоставить спектральное положение возбужденных состояний экситонных комплексов с положениями пиков, соответствующих квазирезонансному возбуждению, что позволило выяснить основные условия реализации квазирезонансного возбуждения и механизмы релаксации экситонов в отдельных квантовых точках.

Мы выражаем благодарность Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за оказанную финансовую помощь (проект #18-02-01212).

Список литературы

1. *M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, G.V. Klimko, et al.* InAs/AlGaAs quantum dots for single-photon emission in a red spectral range. *Sci. Rep* 8, 5299 (2018).
2. *M.V. Rakhlin, K.G. Belyaev, G.V. Klimko, et al.* Highly Efficient Semiconductor Emitter of Single Photons in the Red Spectral Range. *JETP Lett.* 109, 145–149 (2019).
3. *C. Santori, D. Fattal, D., J. Vučković, et al.* Indistinguishable photons from a single-photon device. *Nature* 419, 594–597 (2002).

Номер проекта РФФИ: проект #18-02-01212

Магнитная циркулярная поляризация фотолюминесценции неоднородного ансамбля коллоидных нанокристаллов

Смирнова О.О.^{1,2}, Головатенко А.А.², Родина А.В.²

¹Университет ИТМО

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: smirnova.olga248@gmail.com

Спиновые свойства квантовых точек, в том числе и коллоидных, привлекают внимание исследователей уже на протяжении нескольких десятилетий. Одним из важных изучаемых параметров при этом является время спиновой релаксации носителей заряда и экситонных комплексов. Типичным методом определения времени спиновой релаксации экситонных комплексов является анализ циркулярно поляризованной во внешнем магнитном поле фотолюминесценции (МЦПЛ) с временным разрешением. При этом в зависимости от типа квантовых точек наблюдаемые времена нарастания и установления

равновесной поляризации варьируются от десятых долей до десятков наносекунд [1-4]. Ранее данные времена интерпретировались в качестве времен спиновой релаксации экситонов. При этом не учитывалась неоднородность времен жизни и степени поляризации экситонных комплексов в ансамбле, которые также могут влиять на временную зависимость степени циркулярной поляризации фотолюминесценции. Возможность такого сценария затрудняет анализ спиновой динамики экситонов и непосредственное определение времени спиновой релаксации в системе из временной зависимости МЦПЛ.

В данной работе мы теоретически анализируем рекомбинационную и спиновую динамику в неоднородном ансамбле нанокристаллов, который состоит из подансамблей, отличающихся собственными временами жизни и степенями циркулярной поляризации фотолюминесценции экситонов. Каждый такой подансамбль описывается нами с помощью трехуровневой модели взаимодействующих экситонных состояний, включающей два возбужденных уровня и общее невозбужденное состояние. Рассмотрены различные соотношения параметров, приводящие к нетривиальной зависимости МЦПЛ от времени и к различию интегральных и равновесных характеристик МЦПЛ. Показано, что даже в случае отсутствия взаимодействия между подансамблями возможно возникновение немонотонной зависимости и смены знака МЦПЛ как функции времени или величины магнитного поля.

Теоретическая модель была применена для описания временных зависимостей нарастания МЦПЛ в ансамбле коллоидных наноплателетов CdSe, синтезированных в атмосфере воздуха и аргона [5]. В образцах, выращенных в воздушной атмосфере, наблюдалась смена знака МЦПЛ с положительной на отрицательную с увеличением магнитного поля и, в промежуточных полях, смена знака МЦПЛ от времени. Для образцов, выращенных в аргоне, наблюдалась отрицательная МЦПЛ и медленное нарастание ее абсолютного значения во времени. В результате моделирования было показано, что временная динамика МЦПЛ на масштабах десятков наносекунд в обоих исследованных ансамблях определяется наличием двух подансамблей, имеющих разные времена жизни экситонной фотолюминесценции и разные собственные значения ее поляризации. При этом в синтезированных на воздухе наноплателетах положительная МЦПЛ обусловлена спин-зависимой рекомбинацией экситонов.

Таким образом, данный подход позволяет интерпретировать имеющиеся актуальные экспериментальные данные и предсказывать возможность экспериментального наблюдения нетипичных зависимостей характеристик фотолюминесценции от времени и магнитного поля. Анализ модели, состоящей из двух подансамблей показал, что как нетривиальное поведение МЦПЛ, так и ее медленное нарастание во времени может быть связано с неоднородностью, а не с релаксационными процессами в системе, что важно принимать во внимание при изучении ансамблей коллоидных нанокристаллов.

Авторы благодарят Российский Фонд Фундаментальных Исследований. Номер проекта 19-52-12064.

Список литературы

1. E. Johnston-Halperin et al., Phys. Rev. B, 63, 205309, 2001
2. Feng Liu et al., Phys. Rev. B, 89, 115306, 2014
3. Feng Liu et al., Phys. Rev. B, 88, 035302, 2013
4. B. Siebers et al., Phys. Rev. B, 91, 155304, 2015
5. E. Shornikova et al., Nature Nanotech., 2020.

Тонкая структура спектра и долинная динамика экситонов

Праздничных А. И.¹, Глазов М. М.²

¹СПБАУ РАН

²ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: antoshaigorevic@gmail.com

Ван-дер-ваальсовы гетероструктуры с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) привлекают значительный интерес исследователей своими необычными оптическими свойствами [1, 2]. Недавно было теоретически и экспериментально показано, что изменение толщины слоя диэлектрика, окружающего монослой MoSe_2 приводит к значительным – на порядок величины – вариациям радиационного времени жизни экситона в монослое [3].

В монослоях ДПМ свет, поляризованный по правому и левому кругу, возбуждает экситоны в долинах K и K' в вершинах зоны Бриллюэна. Дальнейшее обменное взаимодействие между электроном и дыркой смешивает эти состояния и приводит к долинной деполаризации экситонов [4]. Цель данной работы – теоретическое описание этого эффекта.

Расчет тонкой структуры оптически-активных экситонов в ван-дер-ваальсовой гетероструктуре выполнен в рамках электродинамического подхода. Экситон описывается как осциллирующий на частоте оптического перехода ток, распространяющийся в монослое ДПМ. При этом различают “светлые” экситоны, излучающие распространяющиеся волны (волновой вектор экситона лежит в пределах светового конуса), и “тёмные”, излучающие затухающие волны (волновой вектор за пределами светового конуса). В широком диапазоне температур плотность состояний “тёмных” экситонов много больше плотности состояний “светлых”. За счёт взаимодействия с порождаемым электромагнитным полем дисперсия продольного (плотность тока параллельна волновому вектору экситона в плоскости ДПМ) и поперечного (плотность тока перпендикулярна волновому вектору) экситона различна. Продольно-поперечное расщепление рассчитано путём решения системы уравнений Максвелла с граничными условиями, соответствующими ван-дер-ваальсовой гетероструктуре: вакуум \rightarrow монослой ДПМ \rightarrow нитрид бора (hBN) \rightarrow SiO_2 . Полученное точное аналитическое решение для продольно-поперечного расщепления показывает, что при достаточно больших волновых векторах продольно-поперечное расщепление прямо пропорционально волновому вектору K , а коэффициент пропорциональности определяется толщинами слоев. В предельных случаях, когда характерная длина волны экситона много больше или много меньше толщины слоя нитрида бора зависимость имеет вид:

$$\Delta E_{LT} = \frac{\hbar\Gamma_0 K}{\varepsilon_{\text{eff}} q}, \text{ где } \varepsilon_{\text{eff}} = \begin{cases} \frac{1 + \varepsilon_{\text{SiO}_2}}{2}, & k_T L_{\text{hBN}} \ll 1 \\ \frac{1 + \varepsilon_{\text{hBN}}}{2}, & k_T L_{\text{hBN}} \gg 1 \end{cases}$$

k_T – тепловой волновой вектор экситона, L_{hBN} – толщина слоя нитрида бора, Γ_0 – параметр радиационного затухания экситона, q – волновой вектор света на частоте экситона.

В рамках метода матрицы плотности выведено кинетическое уравнение для долинной поляризации экситонов. Получено аналитическое выражение для динамики поляризации спина экситона:

$$S_z(t) = S_0 e^{-\frac{t}{2\tau} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\varepsilon}{k_B T}} \left(\frac{\sinh \frac{Q(\varepsilon)t}{2\tau}}{Q(\varepsilon)} + \cosh \frac{Q(\varepsilon)t}{2\tau} \right) d\varepsilon}$$

где $Q(\varepsilon) = \sqrt{1 - \frac{4\Delta E_{LT}^2(\varepsilon)\tau^2}{\hbar^2}}$, ε – энергия экситона, τ – время релаксации экситона.

Полученный интеграл рассчитан численными методами при различных значениях параметров системы (температуры, времени рассеяния экситонов и толщины слоя нитрида бора). Получены аналитические оценки для времени долинной релаксации экситонов. Наш анализ показывает, что темп затухания долинной поляризации экситонов уменьшается с увеличением толщины слоя нитрида бора и с уменьшением температуры системы.

Авторы благодарны М.А. Семиной и Кс. Мари за ценные обсуждения. Работа частично поддержана грантом РФФИ 19-12-00051.

Список литературы

1. М.В. Дурнев, М.М. Глазов, УФН 188, 913–934 (2018)
2. Gang Wang, Alexey Chernikov, Mikhail M. Glazov, Tony F. Heinz, Xavier Marie, Thierry Amand, and Bernhard Urbaszek, Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018)
3. H.H. Fang, B. Han, C. Robert, M.A. Semina, D. Lagarde, E. Courtade, T. Taniguchi, K. Watanabe, T. Amand, B. Urbaszek, M.M. Glazov, and X. Marie, Phys. Rev. Lett. 123, 067401 (2019)
4. M. M. Glazov, E. L. Ivchenko, G. Wang, T. Amand, X. Marie, B. Urbaszek, and B. L. Liu, Phys. Status Solidi B 252, 2349 (2015)

Критический режим фотонного эха от экситонов в квантовой яме InGaAs/GaAs в слабом магнитном поле

Янибеков И.И.¹, Соловьев И.А., Югова И.А., Ефимов Ю.П., Елисеев С.А., Ловцюс В.А., Капитонов Ю.В.

¹СПбГУ

e-mail: iskander1331@mail.ru

Фотонное эхо является оптическим аналогом спинового эха и представляет собой когерентный отклик системы на последовательное действие двух импульсов, задержанный во времени на двойное время между ними. Перспективность исследования данного эффекта главным образом обусловлена широким потенциалом применения в области оптической обработки информации [1].

В данной работе исследуется фотонное эхо от экситонов в квантовой яме InGaAs/GaAs в магнитном поле. Исследуемый образец P551 содержит 3 нанометровую In_{0,04}GaAs/GaAs квантовую яму. Он выращен методом молекулярно-пучковой эпитаксии с вращением для равномерного роста. Для сокращения влияния рассеяния экситонов на фонах, измерения проводились при температуре жидкого гелия 1.4 К. Оптическое возбуждение осуществлялось посредством последовательного действия на образец пикосекундными импульсами.

Наблюдаемое поведение фотонного эха в магнитном поле описывается в рамках 5-уровневой модели: основное невозбужденное состояние, и 4 уровня светлых и темных экситонов с проекциями спинов ± 1 и ± 2 соответственно.

Данная модель предсказывает, что под действием магнитного поля при больших частотах прецессии поляризации между темными и светлыми экситонами наблюдаются осцилляции затухания сигнала амплитуды фотонного эха. Однако, при достаточно малых частотах прецессии достигается критический режим, при котором амплитуда фотонного эха единожды обращается в ноль, после чего затухает со временем, близким ко времени необратимой фазовой релаксации T_2 темных экситонов. Поскольку темные экситоны не являются оптически активными, их время T_2 заметно больше по сравнению с тем же временем для светлых экситонов, что наблюдается экспериментально.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра «Нанопотоника» при поддержке гранта СПбГУ 51125686, а также РФФИ 19-52-12046 ННИО_а и РФФИ 20-32-70163 Стабильность.

Список литературы

1. L. Langer *et al.*, “Access to long-term optical memories using photon echoes retrieved from semiconductor spins,” *Nat. Photonics*, 2014.

Номер проекта РФФИ: 19-52-12046; 20-32-70163

The spin-filtering properties in two coupled Rashba quantum rings

Smolkina M. O.¹, Popov I. Yu.¹, Blinova I. V.²,

¹ITMO University

e-mail: vega14@mail.ru

Introduction

In recent years improvement in technology has led to a growing interest in spin-dependent transport in mesoscopic systems [1]. Manipulating spin degrees of freedom is an important fundamental subject. The most useful instrument to control the electron spin is the Rashba spin-orbit interaction (RSOI) [2]. The strength of RSOI can be easily controlled by an external electric field or a gate voltage. Low-dimensional quantum nanostructures such as quantum rings also have attracted an interest in nowadays and play an important role in microelectronic [3]. Some of the theoretical researchers posed quantum rings as a multipurpose and flexible spintronic device. Naeimi et al. explored spinfiltering properties of transmitted electrons through a quantum ring [4], double quantum ring [5] and triangular network [6] in the presence of RSOI and magnetic flux.

In this paper we have studied the spin-dependent electron transport, particularly spin-filtering and spin-polarization, in two coupled quantum nanorings connected to two external leads in the presence of RSOI and magnetic flux using quantum waveguide theory.

Theoretical model

We consider two one-dimensional coupled quantum rings. The leads are considered as the incoming and outgoing leads, respectively. The strength of Rashba SOI in the left (right) ring is denoted by α_L (α_R). There are tunable magnetic fluxes through the center of each ring such that there is no magnetic field on them. The thickness of the ring is small enough, so we can consider only the lowest level of electron subband with a good approximation.

The relevant dimensionless Hamiltonian can be written as:

$$\hat{H} = \hbar\Omega \left[\left(-i \frac{\partial}{\partial \varphi} + \frac{\alpha}{2} \sigma_r - \frac{\Phi}{\Phi_0} \right)^2 - \frac{\alpha^2}{4} \right],$$

where φ is the azimuthal angle, $\hbar\Omega = \hbar^2 / 2m^* r^2$ is the dimensionless kinetic energy, \hbar is the reduced Planck constant, m^* is the effective mass of electron, r is the radius of the ring, σ_r is the r -component of the Pauli spin matrix in cylindrical coordinates (i.e., $\sigma_r = \sigma_x \cos \varphi + \sigma_y \sin \varphi$), Φ is the magnetic flux passing through the ring, Φ_0 is flux quantum, and $\alpha \equiv \alpha_R / \hbar a \Omega$ is the normalised Rashba constant.

The electron wave functions in the incoming and outgoing leads are as follows:

$$\begin{aligned} \psi_I(x_I) &= \begin{pmatrix} f_\uparrow \\ f_\downarrow \end{pmatrix} e^{ikx_I} + \begin{pmatrix} r_{L\uparrow\uparrow} + r_{L\downarrow\uparrow} \\ r_{L\uparrow\downarrow} + r_{L\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} e^{-ikx_I}, \\ \psi_{II}(x_{II}) &= \begin{pmatrix} t_{R\uparrow\uparrow} + t_{R\downarrow\uparrow} \\ t_{R\uparrow\downarrow} + t_{R\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} e^{-ikx_{II}}, \end{aligned}$$

for upper and lower arms of two similar rings:

$$\begin{aligned} \psi_{Lup}(\varphi) &= \sum_{\mu=1,2} \sum_{j=1,2} a_{Lj}^\mu e^{K_{Lj}^\mu \varphi} \chi_L^{(\mu)}(\varphi), \\ \psi_{Llow}(\varphi) &= \sum_{\mu=1,2} \sum_{j=1,2} b_{Lj}^\mu e^{K_{Lj}^\mu \varphi} \chi_L^{(\mu)}(\varphi), \\ \psi_{Rup}(\varphi) &= \sum_{\mu=1,2} \sum_{j=1,2} a_{Rj}^\mu e^{K_{Rj}^\mu \varphi} \chi_R^{(\mu)}(\varphi), \\ \psi_{Rlow}(\varphi) &= \sum_{\mu=1,2} \sum_{j=1,2} b_{Rj}^\mu e^{K_{Rj}^\mu \varphi} \chi_R^{(\mu)}(\varphi), \end{aligned}$$

where L and R denote the left and right rings respectively, f_σ ($\sigma = \uparrow, \downarrow$) is the amplitude of injected electron with spin σ , $t_{L\sigma\sigma'}$ ($t_{R\sigma\sigma'}$) is the transmission amplitude of electron with incoming spin σ and outgoing spin σ' , and similarly $r_{L\sigma\sigma'}$ ($r_{R\sigma\sigma'}$) is the reflection amplitude of electron. Next using Griffith's boundary conditions and employing the Gaussian elimination method, we can obtain all the unknown coefficients $a_{Lj}^\mu, b_{Lj}^\mu, a_{Rj}^\mu, b_{Rj}^\mu, r_{L\sigma\sigma'}, t_{R\sigma\sigma'}$ for the left and right rings.

Finally, the transmission coefficient for the outgoing lead can be determined by $T_{\sigma\sigma'} = \frac{\langle \psi_{out} | \psi_{in} \rangle}{\langle \psi_{in} | \psi_{in} \rangle}$.

Numerical results

In this section we perform a numerical study of the spin-dependent electron transport in two coupled quantum rings with Rashba spin-orbit interaction. The effects of different system parameters such as the Rashba coupling constant, the radius of the rings, the angles between the leads and the attachment point of the rings, on spin-polarization were also obtained. We have found an appropriate value of Rashba SOI constant when the system of two coupled quantum rings can work as a perfect electron spin-inverter. This property can be used in spintronic as a magnetic spin-switching. Perfect spin-inversion can be obtained when the angles between rings and corresponding leads are π , radiuses of the rings are 1 and Rashba constants in left and right rings are equal 1. Also the system of two coupled rings can be used as a controllable spin-polarization device, by using magnetic flux. Also it was shown that a model of two coupled rings is a limiting case of double Rashba quantum ring when the length of the middle lead between rings vanishes.

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project number 19-31-90164 and partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 08-08), by grant 16-11-10330 of Russian Science Foundation.

Список литературы

1. D. Awschalom, D. Loss, and N. Samarth, *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
2. E. I. Rashba, *Sov. Phys. Solid State* 2, 1109, 1960
3. L. Eslami, E. Faizabadi, S. Ahmadi, Quantum nano ring composed of quantum dots as a source of pure persistent spin or charge current, *Phys. Lett. A* 380 (45), 3854-3860, 2016.
4. A. Naeimi, M. Esmailzadeh, A wide range of energy spin-filtering in a Rashba quantum ring using S-matrix method, *Appl. Phys.* 113 (4), 044316-044322, 2013.
5. A. Naeimi, L. Eslami, M. Esmailzadeh, M.R. Abolhassani, Spin transport properties in a double quantum ring with Rashba spin-orbit interaction, *Appl. Phys.* 113, 014303, 2013.
6. E. Dehghan, D.S. Khoshnoud, A. Naeimi, Logical spin-filtering in a triangular network of quantum nanorings with a Rashba spin-orbit interaction, *Physica B Condensed Matter* 529, 21-26, 2018.

Номер проекта РФФИ: 19-31-90164

Методика анализа электронного спектра полупроводниковых квантовых точек методом нормированных туннельных дифференциальных ВАХ

Гавриков М.В.¹, Михайлов А.И., Кабанов В.Ф.

¹СГУ им. Н. Г. Чернышевского

e-mail: maks.gavrikov.96@gmail.com

Целью настоящей работы являлось обоснование методики анализа электронного спектра квантовых точек (КТ) полупроводниковых материалов группы $A^{III}B^V$ (*InSb*) посредством анализа дифференциальных туннельных ВАХ. Соединения $A^{III}B^V$ обладают характерными особенностями энергетического спектра электронов и самыми малыми значениями их эффективной массы. Это обеспечивает относительно большие значения длины волны де Бройля для электронов, исчисляемые десятками нанометров, что обуславливает высокие параметры размерного квантования [1, 2].

Образцы КТ-InSb были синтезированы по технологии, описанной в работах [3]. При использовании технологии Ленгмюра-Блоджетт были сформированы пленочные образцы КТ, которые далее исследовались методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) с помощью сканирующего зондового микроскопа СЗМ SOLVER NANO. Результаты измерений обрабатывались по общепринятым методикам сканирующей зондовой микроскопии полупроводниковых наноструктур.

Для анализа экспериментальных данных использовалась методика нормированных дифференциальных туннельных ВАХ. Модельные представления процесса туннелирования электронов через дискретные уровни квантово-размерного объекта в структуре, характерной для СТМ-измерений, рассмотрены в [4].

В ходе исследований были получены и проанализированы нормированные дифференциальные туннельные ВАХ при отрицательном потенциале смещения на подложке относительно зонда. В этом случае происходит туннелирование электронов через дискретные уровни КТ в зонд туннельного микроскопа. Дискретный спектр энергии электронов проводимости обуславливает пики на нормированных дифференциальных ВАХ. Величины напряжения (взяты по модулю), при которых наблюдаются пики, были поставлены в соответствие со значениями энергии на рассчитанных зависимостях уровней энергетического спектра КТ от ее размера (по выбранной модели). Таким способом анализировался электронный спектр (положение первых трех энергетических уровней) квантовой точки, а также диапазон характерных размеров, исследуемых КТ. Анализ экспериментальных данных по группе образцов позволил провести оценку величины линейных размеров КТ при погрешности измерений положения энергетических пиков не более 2кТ.

Для подтверждения справедливости полученных результатов были проведены гранулометрический и спектральный анализ, которые показали качественное и количественное согласование результатов с полученными при использовании рассматриваемой методики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-07-00087.

Список литературы

1. Mikhailov A.I., Kabanov V.F., Zhukov N.D. Peculiarities of field electron emission from submicron protrusions on a rough InSb surface. *Technical Physics Letters*, 2015, 41(11), P.1065–1067.
2. Angela Y. Chang et al. Carrier Dynamics in Highly Quantum-Confined, Colloidal Indium Antimonide Nanocrystals. *ACS Nano*, 2014, 8(8), P 8513–8519.
3. Дежуров С.В., Трифонов А.Ю., Ловыгин М.В., Рыбакова А.В., Крыльский Д.В. Синтез высокостабильных коллоидных квантовых точек CdTeSe/CdS/CdZnS/ZnS, флуоресцирующих в БЛИК-диапазоне 650-750 нм // *Российские нанотехнологии*. 2016. Т. 11. № 5–6. С. 54-59.
4. Mikhailov A.I., Kabanov V. F., Zhukov N. D., Glukhovskoy E. G. Features of the energy spectrum of quantum dots indium antimonide // *Nanosystems: physics, Chemistry, Mathematics*, 2017, 8 (5), P. 596–599.

Номер проекта РФФИ: 19-07-00087

Спектры оптического отражения резонансных фотонных структур на основе системы из 100 квантовых ям InGaN

Иванов А. А.^{1,2}, Чалдышев В.В.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

²СПБПУ

e-mail: aleksei98.ivanov@gmail.com

Исследование структур, диэлектрическая проницаемость которых периодически изменяется в пространстве, интересно как с фундаментальной точки зрения, так и прикладной. Подобные структуры называются фотонными кристаллами. Одной из разновидностей одномерных фотонных кристаллов является резонансная брэгговская структура. В таких структурах резонансный отклик при отражении света осуществляется за счет экситонных состояний в квантовых ямах (КЯ). Квазидвумерные экситоны в квантовых ямах

вносят значительный вклад в диэлектрическую функцию среды. Как следствие, при совмещении брэгговской периодичности с энергий экситонного состояния в КЯ в подобных структурах можно наблюдать коллективную суперизлучательную экситон-поляритонную моду. Сила осциллятора этой моды пропорциональна числу КЯ в структуре. Поскольку экситон, представляя из себя электрон и дырку, связанные кулоновским взаимодействием, чувствителен к внешним воздействиям, например, приложению электрического поля, представляется возможным управлять отражением света, управляя параметрами экситонного резонанса в среде.

Создание резонансных брэгговских структур является технически сложной задачей, поскольку для формирования суперизлучательной оптической моды необходима система из большого числа КЯ с малым разбросом геометрических параметров и малым нерадиационным уширением экситонов. Ранее были исследованы брэгговские структуры с одиночными [1] и двойными [2] КЯ InGaN/GaN. Был обнаружен существенный вклад экситонов в резонансное отражение о таких структур с 60 КЯ при комнатной температуре, тогда как в более узкозонных системах на основе GaAs исследования этого эффекта проводились только при криогенных температурах.

Цель работы: экспериментально изучить возможности управления оптическими свойствами резонансной брэгговской структуры на основе системы 100 квантовых ям InGaN вблизи двойного экситонно-брэгговского резонанса.

Экспериментальная часть работы заключалась в исследовании спектров оптического отражения, полученных при различных углах падения для s- и p- поляризации. Измерения проводились при температуре 300К. Образец представлял собой набор из 100 эквидистантных КЯ InGaN, выращенный на подложке из сапфира методом газофазной эпитаксии. Для избежания прораствания дислокаций в рабочую область образца между ней и подложкой был выращен буферный слой GaN. Данная периодическая структура имела неоднородность по толщине (выращена в виде клина), вследствие чего оптические свойства разных областей поверхности структуры различаются. Обнаружено, что величина и форма особенностей в спектре заметно меняются с изменением положения брэгговского пика относительно экситонного резонанса.

Численное моделирование спектров оптического отражения для различных углов падения и поляризаций света осуществлялось методом матриц переноса, которые строятся на основе формул экситонного отражения и пропускания, приведенных в работе [3]. Из подгонки были определены значения параметров экситонов для различных точек образца. Полученные значения радиационного затухания экситона в квантовой яме InGaN/GaN оказались больше, чем в других полупроводниковых системах.

Таким образом, резонансные брэгговские структуры с числом квантовых ям InGaN 100 и более позволяют получать резонансный экситонный отклик при комнатной температуре, что делает возможным разработку управляемых брэгговских отражателей на их основе.

Список литературы

1. V.V. Chaldyshev, A.S. Bolshakov, E.E. Zavarin, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, A.F. Tsatsulnikov, M.A. Yagovkina, T. Kim, Y. Park. Appl. Phys. Lett., 99, 251103 (2011).
2. А.С. Большаков, В.В. Чалдышев, Е.Е. Заварин, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, А.Ф. Цацульников, М.А. Яговкина, ФТТ, 55, 9, 1706-1708 (2013).
3. Е. Л. Ивченко. ФТТ, 33, 2388–2393 (1991).

Влияние постоянного поля на циркулярный фотогальванический эффект в двумерных сверхрешетках

Мячкова А. А.¹, Завьялов Д.В.¹

¹ВолгГТУ

e-mail: amyachkova@gmail.com

В последнее время внимание исследователей сосредотачивается на изучении различных нелинейных явлений в низкоразмерных полупроводниковых структурах, имеющих перспективу применения в области генерации и детектирования волн терагерцевого диапазона [1]. Так, нелинейные оптические свойства двумерных структур изучались в [2-6].

В настоящей работе с использованием квазиклассического подхода исследован эффект возникновения постоянной (перпендикулярной тянущему постоянному электрическому полю, направленному вдоль оси X) составляющей тока в ситуации, когда на сверхрешётку, энергетический спектр которой имеет вид

$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \Delta \left(1 - \cos\left(\frac{p_x d}{\hbar}\right) \cos\left(\frac{p_y d}{\hbar}\right) \right), \quad (1)$$

нормально к ее поверхности падает эллиптическая поляризованная электромагнитная волна. В формуле (1) Δ – ширина минизоны, d – период сверхрешётки. Найдено выражение для постоянной составляющей тока и проанализирована ее зависимость от напряженностей полей и сдвига фаз между компонентами электромагнитной волны. Ранее похожая задача решалась в работе [1]. Для того, чтобы ток вдоль одного из направлений зависел от напряженности поля в перпендикулярном направлении, необходимо существование взаимной зависимости движений носителей зарядов в перпендикулярных друг другу направлениях. Такая зависимость отражается, прежде всего, в энергетическом спектре материала: он должен быть неаддитивным. В поставленной задаче напряженности электрического поля компонент эллиптически поляризованной волны подчиняются законам:

$$E_x = E_{10} \cos(\omega t),$$

$$E_y = E_{20} \cos(\omega t + \varphi).$$

Постоянная составляющая плотности тока вдоль оси Y задается соотношением:

$$j_y = e \sum_{\mathbf{p}} v_y(\mathbf{p}) f(\mathbf{p}, t),$$

где v_y – компонента скорости носителей заряда вдоль оси OY:

$$\mathbf{v} = \frac{\partial \varepsilon(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\Delta d}{\hbar} \left\{ \sin \frac{p_x d}{\hbar} \cos \frac{p_y d}{\hbar}; \cos \frac{p_x d}{\hbar} \sin \frac{p_y d}{\hbar} \right\}.$$

Неравновесная функция распределения $f(\mathbf{p}, t)$ является решением кинетического уравнения Больцмана, столкновительный член которого выберем в приближении постоянной частоты столкновений ν :

$$f(\mathbf{p}, t) = \nu \int_{-\infty}^t dt' \exp(-\nu(t-t')) f_0(\mathbf{p}'(t'; \mathbf{p}, t)),$$

где $\mathbf{p}'(t'; \mathbf{p}, t)$ представляет собой решение квазиклассического уравнения движения $\frac{d\mathbf{p}'}{dt'} = e\mathbf{E}(t')$ с начальным условием $\mathbf{p}' = \mathbf{p}$ и $t' = t$. После необходимых преобразований неравновесную функцию распределения можно представить в виде:

$$f(\mathbf{p}', t) = \frac{Av}{\exp(\gamma)} \int_0^\infty \exp(-va) \exp(\gamma \cos[q_x + F_1 g_1 + Ca] \cos[q_y + F_2 g_2]) da,$$

где $q_{x,y} = \frac{p_{x,y}d}{\hbar}$, $F_{1,2} = \frac{eE_{10,20}d}{\omega\hbar}$, $C = \frac{eE_c d}{\hbar}$, $g_1 = \sin(a+t) - \sin(t)$,

$$g_2 = \sin(a+t+\varphi) - \sin(t+\varphi), \quad \gamma = \Delta/T.$$

Таким образом, плотность тока принимает вид:

$$j_y = \frac{e\Delta d Av}{\hbar \exp(\gamma)} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^\infty \cos\left(\frac{p_x d}{\hbar}\right) \sin\left(\frac{p_y d}{\hbar}\right) \exp(-va) \times \\ \times \exp(\gamma \cos[q_x + F_1 g_1 - Ca] \cos[q_y + F_2 g_2])$$

Следовательно, для усредненной по времени плотности тока вдоль оси Y получаем:

$$j_y = j_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{1}{i} J_n(F_1) J_k(F_1) J_l(F_2) J_m(F_2) \times \\ \times \exp(i\varphi(l+m)) \delta(Q, 0) \left[\frac{(-1)^{k+l} - (-1)^{k+m}}{in + il - iC + v} - \frac{(-1)^{n+m} - (-1)^{n+l}}{in + il + iC + v} \right],$$

где $v \rightarrow v/\omega$, $Q = n + k + l + m$, $j_0 = \frac{Aen\beta\hbar\Delta v}{4d\exp(\gamma)}$.

В случае приложения слабого тянущего поля E_c последнюю формулу можно упростить до следующего вида:

$$j_y = j_0 \frac{16F_0(1+v^3)J_0(F_1)J_0(F_2)J_1(F_1)J_1(F_2)}{v^2(-i+v)^2(i+v)^2}.$$

Из последнего выражения видно, что зависимость выпрямленного тока от амплитуд падающих волн существенно нелинейна и носит осциллирующий характер.

Список литературы

1. Завьялов, Д.В., Крючков, С.В., Марчук, Э.В. О возможности эффекта выпрямления поперечного тока в графене, Письма в ЖТФ, 2008, 34, вып. 21;
2. Шорохов А.В., Хвастунов Н.Н., Хьярт Т., Алексеев К.Н. Генерация постоянного тока в полупроводниковой сверхрешетке под действием бихроматического поля как параметрический эффект, Журнал экспериментальной и теоретической физики, 138, С. 930-938, 2010.;
3. Qian, X., Cao, B., Wang, Z., Shen, X., Soci, C., Eginligil, M., Yu, T Carrier density and light helicity dependence of photocurrent in mono- and bilayer graphene, (2018) 33 (11), статья № 114008, DOI: 10.1088/1361-6641/aae2f1
4. Hirose, H., Ito, N., Kawaguchi, M., Lau, Y.-C., Hayashi, M. Circular photogalvanic effect in Cu/Bi bilayers, (2018) 113 (22), статья № 222404, DOI: 10.1063/1.5047418
5. Mikheev, G.M., Saushin, A.S., Styapshin, V.M., Svirko, Y.P. Interplay of the photon drag and the surface photogalvanic effects in the metal-semiconductor nanocomposite, (2018) 8 (1), статья № 8644, DOI: 10.1038/s41598-018-26923-2

6. Durnev, M.V., Tarasenko, S.A. High-Frequency Nonlinear Transport and Photogalvanic Effects in 2D Topological Insulators, (2019) статья № 1800418, DOI: 10.1002/andp.201800418

Свободные экситоны в низкоразмерных галогенидных перовскитах

Самсонова А.Ю.¹, Капитонов Ю.В.¹, Селиванов Н.И.¹, Емелин А.В.¹.

¹СПбГУ

e-mail: samsonowaa@yandex.ru

В данной работе исследуются оптические и электронные свойства галогенидных перовскитов, химическая формула которых $A^+B^{2+}X_3^-$, где А и В – катионы, а Х – галоген-анион. Кристаллическая структура такого 3D-перовскита представляет собой устойчивый трёхмерный кубический каркас с органическим катионом А в центре, состоящий из соединённых друг с другом анионов октаэров. Выбор катиона А в гибридных органо-неорганических галогенидных перовскитах позволяет изменить их кристаллическую структуру и понизить размерность 3D-кристаллического каркаса. Такие кристаллы с пониженной размерностью называются низкоразмерными.

Примером такого низкоразмерного галогенидного перовскита является новый квази-одномерный монокристалл $[C_5H_5NH]^+Pb^{2+}I_3^-$, а также его модификации. Ионы пиридина Pu ($[C_5H_5NH]^+$) разорвали трёхмерный каркас на одномерные цепочки октаэров PbI_6^{2-} , вдоль которых ограничено движение носителей заряда. При этом возникает квантово-размерный эффект, обуславливающий большую энергию связи экситона, которая в $PuPbI_3$ составляет 0,5 эВ. В то время как энергия связи экситона в одном из наиболее известных 3D-перовскитов $MAPbI_3$ в десятки раз меньше энергии связи экситона в $PuPbI_3$. Ширина запрещённой зоны $PuPbI_3$ составляет 3 эВ, что в два раза превышает ширину запрещённой зоны $MAPbI_3$.

В галогенидных перовскитах при фотовозбуждении генерируются свободные электроны и дырки. При энергии кТ меньше энергии связи экситона они образуют свободные экситоны (free exciton, FE) с узким резонансом. При УФ-фотовозбуждении монокристалла $PuPbI_3$ в спектре фотолюминесценции дополнительно наблюдается широкая линия излучения со стоксовым сдвигом 0.5 эВ. Эта линия была приписана рекомбинации автолокализованных экситонов (self-trapped excitons, STE)², возникающих при понижении энергии свободных экситонов с искажением ими кристаллической структуры. Нагревание кристалла приводит к росту интенсивности полосы STE относительно полосы FE, что свидетельствует о наличии энергетического барьера между этими состояниями. Природу существования этого барьера и механизм динамики автолокализованных и свободных экситонов в кристалле $PuPbI_3$ еще предстоит изучить.

Выражается благодарность гранту РФФИ № 19-03-00836, при поддержке которого на оборудовании ресурсного центра «Нанопотоника» выполнена данная работа.

Список литературы

1. N. I. Selivanov, A. A. Murashkina, R. Kevorkyants, A. V. Emeline, D. W. Bahnemann, Pyridinium lead tribromide and pyridinium lead triiodide: quasi-one-

- dimensional perovskites with an optically active aromatic π -system, Dalton Transactions, 47, 16313-16319, 2018.
2. Te Hu, Matthew D. Smith, Emma R. Dohner, Meng-Ju Sher, Xiaoxi Wu, M. Tuan Trinh, Alan Fisher, Jeff Corbett, X.-Y. Zhu, Hemamala I. Karunadasa and Aaron M. Lindenberg, Mechanism for Broadband White-Light Emission from TwoDimensional (110) Hybrid Perovskites, The Journal of Physical Chemistry Letters, 7, 2258-2263, 2016.

Номер проекта РФФИ: 19-03-00836 А19-03-00836 А

Влияние профиля легирования буферных слоёв GaN:Fe на свойства гетероструктур для полевых транзисторов

Артеев Д.С.¹, Сахаров А.В.¹, Лундин В.В.¹, Заварин Е.Е.¹, Закгейм Д.А.¹, Цацульников А.Ф.^{1,2}, Гиндина М.И.^{1,3}, Брунков П.Н.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²НТЦ Микроэлектроники РАН

³Университет ИТМО

e-mail: ArteevDS@mail.ioffe.ru

Гетероструктуры на основе системы InGaAlN, благодаря своим уникальным свойствам, являются очень перспективными для создания приборов высокомошной и СВЧ электроники. Одной из ключевых задач при создании таких приборов является создание изолирующих буферных слоёв, т.к. из-за непреднамеренного легирования в процессе роста слоёв GaN могут иметь проводимость n-типа. Кроме того, возникновение токов утечки возможно даже в высокочистых структурно совершенных полупроводниковых слоях из-за инжекции электронов [1].

Для формирования изолирующих слоёв GaN изначально был распространён подход, основанный на преднамеренном снижении структурного совершенства путём повышения плотности краевых дислокаций, формирующих глубокие акцепторные уровни [2]. Однако, повышение плотности дислокаций неизбежно приводит к ухудшению электрофизических параметров структур. Другим подходом является создание глубоких акцепторных уровней за счёт легирования углеродом, который, однако, имеет некоторые сложности при росте на сапфировых подложках. Более перспективным, на наш взгляд, является легирование железом, подходящее для роста на любых подложках, но имеющее свой недостаток, связанный с сильной диффузией атомов железа в вышерастущие слои после выключения потока легирующей примеси и формированием т.н. «хвоста» [3], который может доходить до области канала, ухудшая свойства двумерного электронного газа.

В данной работе проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния расстояния от канала с двумерным электронным газом до буферного слоя GaN:Fe в структуре AlGaIn/AlN/GaN на её электрофизические свойства. Путём численного моделирования проведён расчёт концентрации двумерного электронного газа, токов утечки и пробойного напряжения в транзисторных структурах с учётом влияния «хвоста» легирующей примеси и без него и найден оптимальный дизайн структуры. Получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных значений.

Вольт-емкостные измерения выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», поддержанного Минобрнауки России (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Список литературы

1. *Lampert M. A., Mark P.* Current injection in solids. N.Y. – London: Academic Press, 1970
2. *Weimann N. G. et al.* Scattering of electrons at threading dislocations in GaN // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. N. 7. P. 3656-3659
3. *Heikman S. et al.* Growth and characteristics of Fe-doped GaN // J. Cryst. Growth. 2003. V. 248. P. 513-517

Энергия и импульс отдачи фотона в диспергирующей среде: теория и сравнение с экспериментом

Аветисян Ю.А.¹, Малышев В.А.², Трифонов Е.Д.³

¹ИПТМУ РАН

²University of Groningen, Netherlands

³РГПУ им. А.И. Герцена

e-mail: yuaavetisyan@mail.ru

Адекватное понимание физической сущности взаимодействия света с диспергирующими средами актуально для многочисленных приложений в области оптики технических и биологических объектов. Настоящая работа является продолжением предыдущих [1, 2] по моделированию на микроскопическом уровне эксперимента [3] по измерению импульса отдачи фотона в диспергирующей среде с помощью интерферометра Рамсея (Ramsay). Исследования в этой области остаются актуальными и в настоящее время, в частности, в квантовой метрологии для определения фундаментальных констант [4].

В качестве диспергирующей среды рассматривается бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК) разреженного атомарного газа ^{87}Rb в магнитной ловушке с параболической формой потенциала. БЭК имеет сигарообразную форму и дважды, с задержкой τ , облучается идентичными встречными лазерными импульсами в направлении, перпендикулярном оси вытянутости образца. В результате многократных актов взаимодействия со светом атомы БЭК приобретают импульсы поступательного движения p_j , где $j = 0, \pm 2, \pm 4, \dots$, k – волновой вектор (в вакууме) поля накачки. Это приводит к появлению серии атомных облаков, движущихся с соответствующими импульсами. В эксперименте [3] анализировалась динамика основного облака ($j = 0$) и двух облаков с импульсами $p_{\pm 2}$.

В соответствие с экспериментом [3], в котором были задействованы два орбитальных перехода ^{87}Rb , разделенные интервалом 157 МГц, атом конденсата моделировался трехуровневой Бозе-частицей с основными электронными состояниями $|a; p_j\rangle$ и двумя сериями возбужденных состояний $|b; p_{j+1}\rangle$ и $|c; p_{j+1}\rangle$. Слабая неидеальность бозе-газа учитывалась в приближении Гросса-Питаевского [5].

Наш анализ основан на численном решении полуклассических уравнений Максвелла-Гросса-Питаевского с параметрами, близкими к экспериментальным [3]. В частности, рассчитывались населенности S_0 и $S_{\pm 2}$ атомных облаков $|a; p_0\rangle$ и $|a; p_{\pm 2}\rangle$ непосредственно по окончании действия второго импульса накачки, т.е. в момент времени $t = \tau + \delta t$, где $\delta t = 5\text{мкс}$ – длительность каждого из двух импульсов накачки, τ – время задержки второго

импульса. Расчеты населенностей S_0 и $S_{\pm 2}$ как функции задержки τ при различных значениях отстройки D от резонанса с переходом $a \leftrightarrow b$ продемонстрировали осцилляции с частотой $W(D)$. В осцилляциях этих населенностей проявлялась строгая корреляция по частоте, фазе и амплитуде, отражающая сохранение полного числа атомов в БЭК. Частота осцилляций W при отрицательной отстройке больше, чем при положительной. Величина $\hbar W(D)$ определяет энергию отдачи фотона при данном значении отстройки. Результаты расчета $W(D)$ для серии значений D показали, в частности, что неидеальность БЭК приводит к сдвигу дисперсионной кривой для полной энергии отдачи фотона в БЭК на величину константы взаимодействия атомов (отсутствующему для идеального газа [1]). Перечисленные результаты полностью согласуются с результатами эксперимента [3].

Помимо расчета полной энергии отдачи фотона в БЭК, преобразованием Фурье по координате волновых функций атомных состояний $|a; p_{\pm 2}\rangle$ находился импульс фотонной отдачи. Такой подход позволил нам вычислить квантово-механически среднее значение импульса отдачи атома, его статистическое распределение и соответствующие характеристики кинетической энергии отдачи фотона в БЭК.

Резюмируя, предложен теоретический подход, основанный на связанных уравнениях Максвелла-Гросса-Питаевского, который позволяет выполнять расчеты энергии и импульса отдачи фотона в бозе-эйнштейновском конденсате разреженного атомарного газа с учетом слабого межатомного взаимодействия. Разработанный алгоритм моделирования применим для теоретического исследования энергии и импульса отдачи фотона в других диспергирующих средах, а также в области атомной интерферометрии и лазерного манипулирования атомами.

Список литературы

1. Yu. A. Avetisyan, V.A. Malyshev and E.D. Trifonov, "Photon recoil momentum in a Bose-Einstein condensate of a dilute gas," J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 50, 085002-6 (2017).
2. Ю. А. Аветисян, В.А. Малышев, Е.Д. Трифонов, "Фотонная отдача при рассеянии света на бозе-эйнштейновском конденсате разреженного газа," ЖЭТФ, 57, вып. 3, С. 454-460 (2020).
3. G. K. Campbell *et al.*, "Photon recoil momentum in dispersive media," Phys. Rev. Lett. 94, 170403-4 (2005).
4. S. Gupta *et al.*, "Contrast interferometry using BECs to measure \hbar/m and α ," Phys. Rev. Lett. 89 140401-4 (2002).
5. Л. П. Питаевский, "Конденсаты Бозе-Эйнштейна в поле лазерного излучения," УФН 176, 345-364 (2006).

Локализованные и делокализованные состояния в цепочке асимметрично взаимодействующих атомов с беспорядком

Федорович Г. А.¹, Корнован Д.Ф.¹, Петров М.И.²

¹Университет ИТМО

e-mail: gleb.fedorovich239@gmail.com

Квантовая оптика является одним из передовых направлений современной физики, важным как с прикладной, так и как с фундаментальной точки зрения. В то же время, развитие нанофотоники значительно расширило возможности управления свойствами электромагнитного излучения на субволновом уровне, что потенциально открывает недоступные ранее перспективы для изучения свойств взаимодействия света и вещества. В частности, особый интерес представляет эффект спин-орбитального взаимодействия света в поверхностно-локализованных волнах, за счет которого оказывается возможным блокировка оптического спина – жесткой связи поляризации активного перехода излучателя с направлением распространения излучаемой им волны [1, 2]. Такой подход позволяет реализовывать однонаправленный и необратимый перенос возбуждения в квантовой оптике, что значительно меняет характер взаимодействия и открывает возможность создания новых устройств – квантово-оптических циркуляторов [3], переключателей [4] и диодов [5].

В данной работе проведено исследование влияния беспорядка на процесс локализации в однофотонной цепочке двухуровневых атомов с асимметричным (однонаправленным) взаимодействием. Асимметричность взаимодействия при этом заключается в том, что каждый атом в цепочке может взаимодействовать со своими правыми соседями сильнее, чем с левыми. Были рассмотрены два принципиально разных режима взаимодействия атомов в цепочке – ближнедействующее (атом взаимодействует только со своими соседями) и дальнедействующее (атом взаимодействует со всеми атомами в цепочке посредством волноводной моды). Как известно, в отсутствие беспорядка такие системы поддерживают делокализованные состояния. При внесении беспорядка в энергию перехода каждого из атомов в цепочке симметричного взаимодействия наблюдалась Андерсоновская локализация для обоих режимов взаимодействия. При непрерывном переходе от симметричного к асимметричному взаимодействию наблюдался процесс делокализации состояний. Когда система достигает режима однонаправленного взаимодействия, все собственные состояния системы снова становились локализованными. В отличие от симметричного взаимодействия, в данном случае локализация состояний объясняется асимметричной связью атомов системы, а именно, все возбуждение в цепочке сосредоточено на одном из ее концов. Описанное поведение системы анализировалось с помощью численного расчета длины локализации и коэффициента участия (“participation ratio”), который показывает долю возбужденных атомов собственного состояния системы в зависимости от величины параметра асимметрии. Кроме того, упомянутые величины, отражающие степень локализации состояний системы, рассчитывались для различного количества атомов в цепочке. Таким образом, полученные зависимости позволяют судить о том, является ли данное собственное состояние цепочки локализованным или делокализованным.

Для случая дальнедействующего взаимодействия было изучено влияние асимметричного типа взаимодействия атомов в цепочке на возникновение сверхизлучающего делокализованного состояния. В случае вещественного гамильтониана взаимодействия дальнедействующей системы, собственная частота такого делокализованного состояния остается чисто вещественной даже при переходе от симметричного к асимметричному взаимодействию несмотря на то, что гамильтониан взаимодействия становится неэрмитовым.

Результаты данной работы показывают принципиальную зависимость локализации собственных состояний от параметра асимметрии и возможность непрерывного перехода от локализованного к делокализованному состоянию, и обратно, что крайне важно для создания систем с однонаправленной связью, таких как структуры топологической фотоники.

Список литературы

1. A. Aiello et al. *Nat. Photonics*. 9, 789–795 (2015).
1. T Van Mechelen, Z. Jacob, *Optica* 3, 118-126 (2016)
2. I. Sillner et al., *Nature Nanotechnology* 10, 775–778 (2015)
3. S. Rosenblum, *Nature Nanotechnology* 10, 775–778 (2015)
4. C. Sayrin et al., *Phys. Rev. X* 5, 041036 (2015)

Номер проекта РФФИ: 18-32-00691

Переходы в континуум для квантовых точек в нанопроволоках и топологических изоляторах в режиме электрического дипольного спинового резонанса

Хомицкий Д. В.¹, Лаврухина Е.А.¹

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского

e-mail: khomitsky@phys.unn.ru

Электрический дипольный спиновый резонанс (ЭДСР), при котором переходы между уровнями с различной проекцией спина возбуждаются периодическим электрическим полем [1], является перспективным инструментом управления состояниями в таких системах, как квантовые точки в наноструктурах, где значительна роль спин-орбитального взаимодействия. При рассмотрении моделей ЭДСР для квантовых точек (КТ) в нанопроволоке на основе InSb с конечной глубиной потенциала конфайнмента нами было обнаружено эффективное вовлечение состояний непрерывного спектра в динамику под действием резонансного электрического поля [2, 3]. Результаты носили преимущественно численный характер, поскольку были получены в рамках исследования динамики квантовой системы с большим числом состояний (от 500 до 4000).

Помимо обычных полупроводниковых структур, проблема создания квантовых точек и моделирования их свойств в переменном поле актуальна и для других систем, таких как топологические изоляторы [4]. В наших работах [5,6] была предложена модель КТ на краю топологического изолятора на базе квантовой ямы HgTe/CdTe, образованной магнитными барьерами. Были описаны состояния как дискретной, так и непрерывной частей спектра. В нашей недавней работе [7] была обнаружена важная роль состояний непрерывного спектра в этой системе для динамики в периодическом электрическом поле, подобная роли состояний континуума в задачах о полупроводниковой квантовой точке. В силу большого набора учитываемых состояний (до 2000) результаты также были получены в основном численным путём.

В данном докладе представлены результаты аналитического исследования вероятностей перехода в непрерывный спектр для описанных выше систем, как КТ в нанопроволоках, так и КТ в топологических изоляторах. Оцениваются вероятности ухода в

континуум как функции амплитуды и частоты переменного электрического поля. Подобные оценки важны для определения границ рабочих режимов подобных структур, когда в них на достаточно больших временах всё ещё реализуется динамика только на дискретной части спектра, а увеличение амплитуды поля приводит к быстрому росту вероятности ухода в континуум. Результаты работы могут представлять интерес для использования данных структур в устройствах квантовых вычислений.

Работа выполнена при поддержке гранта в рамках Проектной части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. E.I. Rashba and A.L. Efros, "Orbital Mechanisms of Electron-Spin Manipulation by an Electric Field", *Phys. Rev. Lett.*, V.91, 126405 (2003).
2. D.V. Khomitsky, E.A. Lavrukina, and E.Ya. Sherman, "Electric dipole spin resonance at shallow donors in quantum wires", *Phys. Rev. B*, V. 99, 014308 (2019).
3. D.V. Khomitsky, E.A. Lavrukina, and E.Ya. Sherman, "Electric dipole spin resonance in finite-size multilevel quantum dots: Floquet dynamics with tunneling", arXiv: 1912.09054 (2019).
4. X-L Qi and S-C Zhang, "Topological insulators and superconductors", *Rev. Mod. Phys.* V. 83, 1057 (2011).
5. D.V. Khomitsky, A.A. Chubunov, A.A. Konakov, "Regular and irregular dynamics of spin-polarized wavepackets in a mesoscopic quantum dot at the edge of topological insulator", *ЖЭТФ*, т. 150, вып.6(12), с.1200 (2016).
6. Д.В. Хомицкий, А.А. Чубанов, Е.А. Лаврухина, Н. Нжийа, "Релаксация энергии в квантовой точке на краю топологического изолятора", *ФТП*, т.51, вып.11, с.1557 (2017).
7. Д.В. Хомицкий, Е.А. Лаврухина, Д.А. Кулаков, К.С. Кабаев, "Спиновый резонанс в квантовой точке на базе топологического изолятора при учёте непрерывного спектра", *Материалы XXIV Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника»* (Нижний Новгород, 10-13 марта 2020 г), <http://www.nanosymp.ru/ru/index>, в печати.

Эффект насыщающегося поглотителя в вертикально-излучающих лазерах спектрального диапазона 1.55 мкм, изготовленных методом спекания пластин

Блохин А. А.¹, Блохин С.А.¹, Бобров М.А.¹, Малеев Н.А.¹, Рочас С.С.², Егоров А.Ю.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

e-mail: bloalex91@yandex.ru

Длинноволновые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ) привлекают интерес для применения в цифровых и аналоговых оптоволоконных линиях связи, оптических межсоединениях кремниевых электронных цепей (т.н. кремниевая фотоника), а также для создания различных газовых датчиков. В последнем случае важно обеспечить одноименный режим генерации с возможностью перестройки длины волны излучения в широком диапазоне за счет изменения тока накачки и температуры. В настоящее время InAlGaAsP/InP ВИЛ монолитной конструкции [1] значительно уступают по своим характеристикам

InAlGaAs/InP ВИЛ гибридной конструкции с высококонтрастными диэлектрическими распределенными брэгговскими отражателями (РБО) [2] и InAlGaAsP/AlGaAs ВИЛ, изготовленным методом спекания пластин [3]. В ВИЛ гибридной конструкции используется геометрия оптического микрорезонатора с инжекцией носителей через внутрирезонаторные контактные слои и токовым ограничением на основе заращенного туннельного перехода (buried tunnel junction) для снижения уровня потерь на свободных носителях (особенно в слоях р-типа). Концепция заращенного туннельного перехода также позволяет обеспечить эффективное оптическое ограничение в латеральном направлении с потенциально более сильным волноводным эффектом по сравнению с ВИЛ с оксидной токовой апертурой [4]. В настоящей работе представлены результаты исследования статических характеристик InAlGaAsP/AlGaAs ВИЛ спектрального диапазона 1.55 мкм на основе напряженных InGaAs/InAlGaAs квантовых ям и заращенным туннельным переходом различной толщины, изготовленными методом спекания пластин.

Для ВИЛ с глубиной травления туннельного перехода ~30 нм (сильный контраст эффективного показателя преломления) стабильный одномодовый режим генерации с фактором подавления боковых мод более 30 дБ реализуется лишь при размере мезы заращенного туннельного перехода менее 5-6 мкм, при этом высокое тепловое сопротивление ограничивает выходную оптическую мощность и диапазон рабочих температур ВИЛ. При уменьшении глубины травления туннельного перехода до ~15 нм (слабый контраст эффективного показателя преломления) одномодовый режим генерации реализуется при существенно больших размерах мезы и, соответственно, обеспечивает рост максимальной выходной оптической мощности. Однако в данном случае при малых размерах мезы наблюдается резкое увеличение «эффективного» порогового тока сопровождающееся скачкообразным изменением выходной оптической мощности (дифференциальная эффективность ~100%) и небольшим гистерезисом ватт-амперной зависимости. Обнаруженный эффект, по-видимому, свидетельствует о наличии насыщающегося поглотителя аналогично явлению, наблюдавшемуся в узкоапертурных InGaAs/AlGaAs ВИЛ с активной средой на основе субмонослойных квантовых точек и оксидной апертурой клиновидной формы [4]. В самом деле, при слабом контрасте эффективного показателя преломления электромагнитное поле поперечной моды микрорезонатора существенно выходит за рамки области инжекции носителей (мезы туннельного перехода) в активную среду. В силу специфики конструкции исследуемых ВИЛ латеральным растеканием носителей можно пренебречь, в результате чего формируются непрокачиваемые области активной среды, выполняющие роль насыщающегося поглотителя. Данный эффект необходимо учитывать при разработке конструкции одномодовых длинноволновых ВИЛ.

Список литературы

1. Park M.-R. et al., All-epitaxial InAlGaAs-InP VCSELs in the 1.3–1.6 μm wavelength range for CWDM band applications, IEEE Photonics Technology Letters 18 (16), 1717–1719, 2006
2. Hofmann W., High-Speed Buried Tunnel Junction Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, IEEE Photonics Journal 2 (5), 802–815, 2010
3. Ellafi D. et al., Control of cavity lifetime of 1.5 μm wafer-fused VCSELs by digital mirror trimming, Optics Express 22 (26), 32180–32187, 2014
4. Kuzmenkov A. G. et al., Self-sustained pulsation in the oxide-confined vertical-cavity surface emitting lasers based on submonolayer InGaAs quantum dots, Applied Physics Letters 91 (12), 121106, 2007

Микро-фотолюминесценция структур квантовых точек InP/GaInP₂ для топологических квантовых вентиляей

Афанасьев К.М.^{1,2}, Власов А.С.¹, Калюжный Н.А.¹, Лебедев Д.В.¹, Минтаиров С.А.¹, Салий Р.¹,
Задиранов Ю. М.¹, А. М. Минтаиров^{1,3}

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²СПбПУ Петра Великого

³University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556 USA

e-mail: Gruzaa01@gmail.com

Самоорганизованные квантовые точки (КТ) InP/GaInP₂ представляют собой естественные энионные молекулы (ЭМ) и являются перспективными объектами для исследования квантовой физики и создания элементов квантовой логики [1-3]. Контроль состояний ЭМ в КТ обеспечивается измерениями спектров фотолюминесценции (ФЛ) и до настоящего времени производился, в основном, методом ближнепольной сканирующей оптической микроскопии, что обусловлено относительно большой поверхностной плотностью КТ ($\sim 10^8$ см⁻²) [1] самоорганизованных структур. Для практического использования ЭМ в элементах квантовой логики необходимо, однако, получение структур с существенно меньшей поверхностной плотностью, позволяющей обеспечить возможность электрического доступа к изолированным КТ. Кроме того, для малых плотностей оптический доступ к изолированным КТ может быть осуществлен с помощью микро-ФЛ, что существенно облегчает контроль состояний ЭМ.

В настоящей работе продемонстрирована возможность использование кислородной очистки поверхности для селективного тушения InP/GaInP₂ КТ и получения заданной плотности активных КТ. Были получены струкутры с поверхностной плотностью до 10^6 см⁻² и измерены спектры микро-ФЛ изолированных КТ от гелевой до комнатной температур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00321.

Список литературы

1. А. М. Mintairov et al. Phys. Rev B, 97, 195443-9 (2018).
2. А. М. Mintairov et al Appl. Phys. Lett. 115, 202104 (2019).
3. А. М. Mintairov, Semiconductors, 54, 138 (2020).

Особенности ионизации примесей в квазиклассически сильных постоянном и переменном электрических полях в щелевых модификациях графена

Глазов С. Ю.¹, Сыродоев Г.А.¹

¹ФГБОУ ВО "ВГСПУ"

e-mail: ser-glazov@yandex.ru

Изучены особенности ионизации примесных центров под действием квазиклассически сильных внешних электрических полей с использованием метода «многого времени» для полупроводниковых материалов с неквадратичным энергетическим спектром: щелевого графена (ЩГ) и графеновой сверхрешетки (ГСР). Интерес к графену и структурам на его основе обусловлен высокой подвижностью носителей заряда, непараболичностью и неаддитивностью энергетического спектра. Структуры, в которых энергетический спектр носителей содержит запрещенную зону, графеновые полупроводники, востребованы в современных электронных устройствах.

Вероятность ионизации примеси внешними постоянным и переменным электрическими полями в ЩГ исследовалась в работах [1, 2] методом многого времени. В сравнении с такой структурой энергетическая зона ГСР разбивается на узкие разрешенные (запрещенные) минизоны, что сильно влияет на кинетические свойства образца. В [3] исследована вероятность ионизации примесей и коэффициент поглощения электромагнитной волны в двумерной ГСР в присутствии постоянного электрического поля.

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа коэффициентов поглощения квазиклассически сильной электромагнитной волны в ЩГ и двумерной ГСР в присутствии постоянного электрического поля. Получены аналитические выражения для вероятности ионизации примеси и коэффициента поглощения, когда на образец действует постоянное или сильное переменное электрические поля, поляризованные вдоль одной из характерных осей структуры. В случае одновременного воздействия полей коэффициенты поглощения проанализированы численно. Выявлена анизотропия коэффициента поглощения при разной ориентации вектора напряженности постоянного и вектора поляризации переменного электрических полей. Для ЩГ коэффициент поглощения обладает слабо выраженной анизотропией, проявляющейся в случае, когда ширина запрещенной зоны графена больше энергии перескока электронов между соседними узлами кристаллической решетки. Проведено сравнение результатов с ранее известными, полученными для спектра ЩГ, заданного в низкоэнергетическом приближении. Показано, что медленный рост коэффициента поглощения при малых частотах обусловлен примесным поглощением, а более быстрый его рост при больших частотах определяется межминизонными переходами. Эти особенности можно использовать при создании детекторов излучения.

Список литературы

1. Глазов С.Ю. Ионизация примесей постоянным электрическим полем в графене с широкой запрещенной зоной / С.Ю. Глазов, П.В. Бадикова // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2018. V. 2. № 10. 02020.
2. Бадикова П.В. Ионизация примесей постоянным и переменным электрическими полями в щелевой модификации графена / П.В. Бадикова, С.Ю. Глазов // *Известия РАН. Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 11. 1536-1539.

3. Бадикова П.В. Особенности ионизации примесей в квазиклассически сильных постоянном и переменном электрических полях в двумерной сверхрешетке на основе графена / П.В. Бадикова, С.Ю. Глазов, Г.А. Сыродоев // ФТП. 2019. Т. 53. В.7. С. 927-934.

 Номер проекта РФФИ: №18-42-340005

Гауссовы примесные зоны в GaN и ослабление конфайнмента носителей в квантовых ямах InGaN/GaN

Бочкарева Н. И.¹, Иванов А.М.¹, Клочков А.В.¹, Шретер Ю.Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru

Нитрид галлия и наноструктуры на его основе имеют высокий потенциал для энергоэффективного твердотельного освещения. Высокая эффективность светоизлучающих наноструктур на основе широкозонного GaN ($E_G=3.42$ эВ при 300 К) достигается в присутствии высокой плотности протяженных и точечных дефектов, неприемлемой для работоспособности приборов на основе более узкозонных материалов, GaAs и GaP. Неоднозначная и сложная роль дефектов в электрических и оптических свойствах наноструктур на основе GaN недостаточно изучена, и для поиска путей оптимизации характеристик приборов критически важны детектирование, характеристика и идентификация глубоких центров, связанных с дефектами [1-3].

Цель настоящей работы состояла в определении энергетического спектра глубоких центров в GaN и механизма влияния глубоких центров на туннельную прозрачность барьеров квантовой ямы InGaN/GaN и квантовую эффективность излучения в светодиодных наноструктурах.

Исследования объемного GaN и эпитаксиальных пленок GaN методом оптического поглощения показали, что подзонное поглощение в GaN значительно и коэффициент поглощения достигает $\approx 10^2-10^3$ см⁻¹. В видимой и ближней ИК области спектра наблюдались широкие пики поглощения с пиковыми энергиями $h\nu_p = 2.65$ и 1.25 эВ. Разложение пика поглощения в видимой области на отдельные гауссовы компоненты с оптическими активационными энергиями, равными пиковым энергиям полос дефектной фотолюминесценции в GaN, показало, что поглощение обусловлено внутрицентровыми переходами в вакансионных донорно-акцепторных комплексах, ответственных за желтую, зеленую и голубую фотолюминесценцию и формирующих в верхней и нижней половинах запрещенной зоны GaN гауссовы примесные зоны шириной 400 мэВ. В образцах *n*-GaN со слабой желтой фотолюминесценцией полосы поглощения перекрываются широким бесструктурным фоном, причиной которого являются оптические переходы между состояниями, вовлеченными в излучательные переходы.

Высокая плотность дефектных состояний в запрещенной зоне *n*- GaN и *p*-GaN приводит к туннельной прыжковой проводимости через *n*- и *p*-барьеры в наноструктурах с квантовыми ямами InGaN/GaN и снижению порогового напряжения детектирования излучения [1, 2]. Туннельный ток в квантовую яму на порядки превышает ток, обусловленный тепловым возбуждением носителей на вершину потенциального барьера. Прыжковая проводимость через барьер увеличивается при пересечении квазиуровнем Ферми края

гауссовой примесной зоны на границе с квантовой ямой и уменьшается после пересечения им максимума плотности состояний в примесной зоне, вызывая появление горбов на вольтамперной характеристике наноструктуры [2, 3]. Так как прыжковая проводимость экспоненциально зависит от расстояния между центрами, это может приводить к росту тока с напряжением с характеристической энергией, меньшей больцмановского предела.

Корреляция между зависимостями тока и интенсивности излучения от напряжения на p - n -переходе в светодиодных структурах, излучающих в синей и ближней ультрафиолетовой областях спектра, и спектрами оптического поглощения и фотолюминесценции в слоях n -GaN и p -GaN позволила показать, что туннельная прыжковая проводимость барьеров, снижая инжекционные барьеры и обеспечивая туннельную инжекцию, приводит при повышении туннельного сопротивления с напряжением к вытеканию инжектированных носителей из квантовой ямы в барьеры и уменьшает квантовую эффективность.

Показано, что малая плотность состояний в сильнолегированных слоях p -GaN, ответственных за UVL-полосу фотолюминесценции, связываемую с донорно-акцепторной комбинацией пар, является причиной падения квантовой эффективности при высоких уровнях инжекции в синих GaN-светодиодах, и насыщения эффективности в GaN-светодиодах, излучающих в ближней ультрафиолетовой области спектра.

Список литературы

1. N. I. Bochkareva, Y. G. Shreter et al., Appl. Phys. Lett., V.96, 133502, 2010
2. Бочкарева Н.И., Шретер Ю.Г., ФТП. том. 52, вып.7, 796-803, 2018
3. Бочкарева Н.И., Иванов А.М., Клочков А.В., Шретер Ю.Г., ФТП. 2019. том. 53. вып. 1, 104-110, 2019

Номер проекта РФФИ:

Релаксация горячих экситонов в связанной асимметричной структуре двойных квантовых ям CdTe/ZnTe

Резницкий А.Н.¹, Агекян В.², Будкин Г.¹, Karczewski G.³, Серов А.², Философов Н.², Чукаев М.^{1,2}

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

²СПбГУ

³Institute of Physics PAN, Warsaw

e-mail: ran.oftt@mail.ioffe.ru

В работе [1] было показано, что в асимметричной системе полупроводниковых квантовых ям (КЯ), разделенных широкозонным барьером, можно реализовать условия, при которых в широком интервале энергий фотовозбуждения основным каналом переноса энергии к состояниям, формирующим спектр фотолюминесценции (ФЛ) мелкой ямы, является каскадная релаксация горячих экситонов с излучением LO фононов. Характерным проявлением таких свойств связанной системы КЯ является существенная зависимость относительной интенсивности излучения из мелкой (I_1) и глубокой (I_2) ям от интенсивности возбуждения I_0 . Как показано в работе [1], такая зависимость связана с разной проницаемостью барьера для одиночных электронов и дырок и экситонов. Целью настоящей работы является проверка применимости этой модели к системе двойных квантовых ям CdTe/ZnTe.

Мы исследовали спектры ФЛ и возбуждения ФЛ (ВФЛ), а также зависимости от I_0 отношения интегральных интенсивностей ФЛ мелкой и глубокой КЯ в серии образцов, содержащих два слоя CdTe D_1 и D_2 номинальной толщиной 2 и 4 монослоя (МС) в матрице ZnTe. Исследованные образцы различаются шириной барьерного слоя ZnTe, разделяющего области КЯ и составляющего 45, 65 и 75 МС.

Спектры ФЛ при надбарьерном возбуждении включают две полосы I_1 и I_2 , обусловленные рекомбинацией экситонов в слоях D_1 и D_2 . Полуширина полос излучения из мелкой и глубокой КЯ I_1 и I_2 составляет 3-4 meV и 15-20 meV, соответственно. Это может означать, что слой D_1 образуется однородным твердым раствором ZnCdTe, в то время как слой D_2 , по всей видимости, включает состояния самоорганизованных квантовых точек.

Одним из следствий развитой в [1] модели является предсказание экспоненциального уменьшения вклада горячих экситонов в зависимость отношения $Y_3 = I_1/I_2$ от I_0 при уменьшении длины волны возбуждающего света. Для возбуждения ФЛ мы использовали линию 442 нм He-Cd лазера, а также излучение набора полупроводниковых лазеров с длинами волн от 517 до 405 нм и обнаружили, что величина Y_3 при предельно низких уровнях возбуждения может быть описана зависимостью:

$$Y_3(I_0 \sim 0) = a^* \{ \exp(-x/b) + c \} \quad (1),$$

с параметрами $b = b_{PL} = 187$ meV и $c = c_{PL} = 0.124$, где $x = (E_i - E_g)$ – начальная кинетическая энергия горячих экситонов, E_i – энергия возбуждающих ФЛ фотонов, E_g – ширина запрещенной зоны ZnTe, а параметр c_{PL} определяет относительный вклад в ФЛ разделенных электронно-дырочных пар.

Каскадная релаксация горячих экситонов с испусканием LO фононов должна также проявляться в спектрах ВФЛ. Для записи спектров ВФЛ мы использовали излучение Хе лампы, пропущенное через дополнительный монохроматор, и обнаружили, что спектры ВФЛ состояний, формирующих область максимума и коротковолнового края полосы ФЛ мелкой ямы, имеют отчетливую осциллирующую структуру. Максимумы в спектре ВФЛ этих состояний отстоят друг от друга на величину (26.2 ± 0.5) мэВ, что с хорошей точностью совпадает с энергией LO фонона ZnTe, при этом спадание интенсивности в максимумах спектра ВФЛ в области $E > E_g$ хорошо описывается зависимостью аналогичной (1) с параметрами $b = b_{PLE} = 158$ meV и $c = c_{PLE} = 0.057$, хорошо согласующимися с параметрами, полученными из анализа спектров ФЛ.

Изложенные экспериментальные результаты были получены на образце с шириной барьера в 65 МС ZnTe, однако аналогичное поведение было обнаружено и в образцах с барьерами шириной 45 и 75 МС.

Таким образом, в работе показано, что в системе двойных КЯ CdTe/ZnTe, состоящей из однородной КЯ образованной осаждением 2 МС CdTe, и КЯ с самоорганизованными квантовыми точками номинальной толщины в 4 МС, барьер ZnTe шириной вплоть до 75 МС оказывается туннельно прозрачным для одиночных носителей заряда и изолированным для экситонов. Это обстоятельство приводит к тому, что в пределе достаточно слабого возбуждения излучение из состояний мелкой ямы формируется, в основном, за счет захвата экситонов. Подобное поведение объясняет полученные зависимости и хорошо описывается моделью, предложенной в работе [1].

Список литературы

1. Г.В.Будкин, М.В.Еременко, А.Н.Резницкий, ЖЭТФ, 2017, т.151, стр.870-872.

Молекулярно-пучковая эпитаксия, структурные и оптические свойства полупроводниковых 2D-слоев GaTe/GaAs(001)

Авдиенко П.С.¹, Седова И.В.¹, Комков О.С.², Сорокин С.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

e-mail: avdienko.pavel@gmail.com

Двумерные (2D) слоистые материалы по-прежнему находятся в фокусе повышенного внимания из-за своих уникальных электрических и оптических свойств. В частности, GaTe, относящийся к классу монокалькогенидов постпереходных металлов, является перспективным материалом для создания высокочувствительных фотоприемников и фототранзисторов [1]. Однако, крайне мало работ посвящено исследованию свойств слоев GaTe, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [2, 3]. Одной из возможных причин этого является то, что GaTe характеризуется высокой скоростью окисления на воздухе, что приводит к постепенной деградации его оптических свойств при отсутствии внешнего защитного слоя на поверхности структуры [2].

В настоящей работе представлены результаты исследований 2D-слоев GaTe, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs(001) при $T_S = 450\text{--}520^\circ\text{C}$ с использованием стандартных элементных источников Ga и Te при отношении эквивалентных давлений в пучках ($P_{\text{Te}}/P_{\text{Ga}}$) $\sim 10\text{--}16$, т. е. в условиях, близких к стехиометрическим. Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) исследовано влияние температуры роста на морфологию поверхности GaTe и показано, что в слоях GaTe, выращенных при $T_S > 500^\circ\text{C}$, возникает анизотропия рельефа на поверхности структуры. В спектрах фотолюминесценции (ФЛ) слоев GaTe при $T = 11\text{ К}$ отчетливо проявляется пик с энергией 1,72 эВ, связанный с излучением связанных на акцепторе экситонов в GaTe [4], при этом доминирующим является излучение из подложки GaAs, а пик с энергией 1,24 эВ может быть объяснен диффузией Te в подложку в процессе МПЭ. В работе будут представлены исследования слоев GaTe/GaAs(001) и гетероструктур GaTe/GaSe/GaAs(001) методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а также обсуждаться особенности спектров комбинационного рассеяния (КРС) данных слоев. Анализ кривых рентгеновской дифрактометрии, данных КРС, а также постепенная деградация ФЛ свойств гетероструктур в зависимости от времени нахождения на воздухе подтверждают наличие процессов окисления слоев GaTe.

Работа частично поддержана грантом РФФ № 18-79-10161.

Список литературы

1. Wang Z. et al., Role of Ga vacancy on a multilayer GaTe phototransistor, ACS nano, 8(5), 4859-4865, 2014.
2. Baе С. J. et al., Influence of thickness on crystallinity in wafer-scale GaTe nanolayers grown by molecular beam epitaxy, AIP Advances, 7, 035113, 2017.
3. Liu S. et al., Controllable growth of vertical heterostructure GaTe x Se1-x/Si by molecular beam epitaxy, ACS Nano 9(8), 8592–8598, 2015.
4. Zubiaga A. et al., Near band edge recombination mechanisms in GaTe, Physical Review B, 68(24), 245202, 2003.

Электропроводность сверхрешетки на основе полудираковских кристаллов

Кухарь Е.И.^{1,2}, Крючков С.В.^{1,2}, Николаева Л.Н.¹

¹ВГСПУ

²ВоЛГТУ

e-mail: eikuhar@yandex.ru

В настоящее время в физике твердотельных наносистем повышенное внимание уделяется электрическим и оптическим свойствам так называемых вейлевских или дираковских кристаллов [1]. Относительно недавно в лабораторных условиях получен фосфорен, который относят к 2D полудираковским материалам [2]. В одном направлении носители заряда таких систем имеют линейный закон дисперсии как у дираковских фермионов, в то время как в перпендикулярном направлении они обладают конечной эффективной массой. В [3] изучен закон дисперсии нового типа сверхрешеток (СР) на основе наноструктур с полудираковскими фермионами. Ниже приведены результаты исследования вольтамперной характеристики (ВАХ) такой СР в случае, когда вектор напряженности электрического поля \mathbf{E} направлен вдоль оси СР.

Модельный гамильтониан системы в ситуации, когда две дираковские точки сливаются в одну (соответствующую $\mathbf{p} = 0$) имеет вид [3]

$$\hat{H} = \frac{2\hbar v F}{d} \sin\left(\frac{p_x d}{2\hbar}\right) \hat{\sigma}_x + \frac{p_y^2}{2m} \hat{\sigma}_y,$$

где Ox – ось СР, d – период СР, $\hat{\sigma}_{x,y,z}$ – матрицы Паули, $v F$ – скорость на поверхности Ферми, m – эффективная масса электрона. Для расчета плотности тока, возникающего вдоль оси Ox использовалось приближение постоянного времени релаксации τ :

$$j_x = e \int_0^\infty e^{-\xi} d\xi \sum_{\mathbf{p}} V_x(p_x + eE\tau\xi, p_y) f_0(\varepsilon(\mathbf{p}))$$

Здесь $V_x = \partial\varepsilon / \partial p_x$ – скорость электронов, $f_0(\varepsilon)$ – равновесная функция распределения носителей заряда в материале. Далее рассматривались предельно низкие температуры. Учитывая, что исследуемый материал обладает полуметаллическим типом проводимости (т.к. отсутствует щель между минизоной проводимости и валентной минизоной), необходимо применить статистику Ферми-Дирака. Для температур близких к абсолютному нулю имеем: $f_0(\varepsilon) = \theta(\varepsilon F - \varepsilon)$, где εF – энергия Ферми, $\theta(\xi)$ – ступенчатая функция. Вычисления дают следующий результат:

$$j_x = j_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n f_n(w) \omega B \tau}{1 + n^2 \omega B^2 \tau^2},$$

где $j_0 = e\sqrt{m}\Delta^{3/2} / 4\sqrt{2}\pi^2 \hbar d$, $\omega B = eEd / \hbar$ – блоховская частота, $w = \varepsilon F / \Delta$, $\Delta = 2\hbar v F / d$,

$$f_n(w) = -2 \int_{g(w)}^{\sqrt{w}} A_n(y) \sin\left(2n \arcsin \sqrt{w^2 - y^4}\right) dy,$$

$$A_n(y) = \frac{2y\Gamma(3/2)}{\Gamma(n+3/2)} \operatorname{Re} \left[\frac{(1+y^4)^{1/4}}{i^n} P_{1/2}^n \left(\frac{1+2y^4}{2y^2\sqrt{1+y^4}} \right) \right],$$

$g(w) = \theta(w-1)(w^2-1)^{1/4}$, $\Gamma(\xi)$ – гамма-функция, P_k^n – присоединенный полином Лежандра. По результатам расчетов построены ВАХ исследуемой СР для различных положений уровня Ферми. При этом использовались стандартные значения параметров: $v F \sim 10^8$ см/с, $d \sim 2 \cdot 10^{-6}$ см, $\tau \sim 10^{-12}$ с.

Численный анализ результатов вычислений показал следующее.

- Для ВАХ исследуемой СР характерно наличие области отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), что свойственно полупроводниковым СР, и является следствием узости зоны проводимости материала. Тем не менее, исследуемая структура является полуметаллом, а не узкозонным полупроводником (таким как полупроводниковая СР).
- Положение максимума ВАХ может регулироваться путем изменения энергии Ферми, причем зависимость величины максимума плотности тока от энергии Ферми является немонотонной.
- Для слабых электрических полей справедлива линейная зависимость $j_x = \sigma E_x$, где значение проводимости σ определяется положением уровня Ферми. С ростом значения εF проводимость СР σ возрастает, проходит через максимум, а затем убывает до нуля.

Таким образом, для рассматриваемой СР характерны как свойства полуметалла, так и свойства узкозонного полупроводника.

Список литературы

1. Weng H., Lighting up Weyl semimetals, Nature Materials, Vol. 18, 428-429, 2019.
2. Kumar U., Kumar V., Enamullah, Anisotropic nonlinear optical response of phosphorene, Physica E, Vol. 108, 288-295, 2019.
3. Kukhar E.I., Kryuchkov S.V., Topological phase transitions in superlattice based on 2D Dirac crystals with anisotropic dispersion, Superlattices and Microstructures, Vol. 133, 106183, 2019.

Асимметричное рассеяние в полупроводниковых гетероструктурах с нарушенной симметрией к инверсии времени

Ракицкий М. А.¹

¹СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

e-mail: mixrak@gmail.com

Спинтроника, являющаяся быстро развивающимся направлением физики, изучает поведение частиц со спином в полупроводниках и металлах и возможности управления ими для создания устройств хранения и обработки информации. В этой области было открыто множество интересных эффектов, таких как, например, спиновый эффект Холла.

Особенно интересны в последнее время системы со спин-орбитальным взаимодействием и нарушенной симметрией к инверсии времени, вследствие легирования магнитными примесями или эффекта близости к ферромагнетiku.

В работе теоретически исследовано возникновение поперечного тока в полупроводниковой двумерной системе со спин-орбитальным взаимодействием и нарушенной симметрией к инверсии времени. Вычислено рассеяние электрона в модели со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы и однородной намагниченностью. Показана асимметричность рассеяния на короткодействующем потенциале в каждой спиновой подзоне, при этом в случае заполнения обеих спиновых подзон вклады от них сокращаются в согласии с [1].

Кроме того, рассмотрено рассеяние на магнитной примеси в системе со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы в отсутствие однородной намагниченности, т.е. без спиновой поляризации. Получены аналитические выражения для асимметричной части сечения рассеяния и холловского тока, которые демонстрируют качественное отличие от первого случая и представляют интерес для исследования транспортных свойств в различных полупроводниковых гетероструктурах со спин-орбитальным взаимодействием, легированных магнитными примесями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00668.

Список литературы

1. M. Borunda, et. al., Phys. Rev. Lett. 99, 066604 (2007)

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, ГИДРО- И АЭРОДИНАМИКА

Селективное травление $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ плазмой SF_6/H_2

Панкратьев П.А.¹, Барсуков Ю.В.¹, Кобелев А.А.¹, Виноградов А.Я.², Мирошников И.В.²,
Смирнов А.С.¹

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: pavel-pankratiev@yandex.ru

Плазмохимическое травление широко используется в полупроводниковой промышленности. Одним из важных процессов, имеющих целый ряд приложений при производстве интегральных микросхем, является селективное травление нитрида кремния Si_3N_4 по отношению к оксиду кремния SiO_2 . Такое травление необходимо, например, при создании 3D-NAND флэш-памяти, а также сегнетоэлектрической оперативной памяти FRAM [1, 2]. Ранее был предложен механизм травления Si_3N_4 фторсодержащей смесью, согласно которому наличие в смеси атомов H, а также молекул HF может ускорять травление [3]. Кроме того, интересным является вопрос о влиянии на травление SF_x , S_2F_x , S и S_2 , которые присутствуют в разрядах SF_6 [4]. Было показано, что травление кремния Si плазмой SF_6 сильно отличается от его травления в разрядах CF_4/O_2 и NF_3 , что возможно вызвано адсорбцией серы из плазмы [5, 6].

Было проведено экспериментальное исследование высокочастотного емкостного разряда в смеси SF_6/H_2 , направленное на определение наилучших параметров для травления Si_3N_4 и SiO_2 . Небольшое количество аргона добавлялось в плазму для определения концентрации атомов фтора посредством актинометрии. Эксперименты проводились в специальной установке, оснащенной спектрометром. Частота приложенного ВЧ напряжения составляла 40 МГц. Мощность и давление составляли 300 Вт и 60 мТорр.

Эксперименты показали, что увеличение доли H_2 в смеси от 0 до 50% не приводит к заметному изменению скорости травления оксида кремния, которая составляет примерно 190 Å/мин. В тоже время скорость травления Si_3N_4 претерпевает ряд изменений. При увеличении доли водорода скорость травления Si_3N_4 увеличивается, начиная от 760 Å/мин, достигая максимума равного 900 Å/мин на отметке 40% H_2 в смеси. Вблизи отметки 50% скорость травления резко падает до 670 Å/мин. Увеличение водорода от 50 до 60% вновь приводит к росту скорости травления SiN до уровня 740 Å/мин после чего происходит монотонный спад. При доле водорода в смеси равной 77% скорости травления как Si_3N_4 так и SiO_2 заметно спадают до 102 Å/мин и 27 Å/мин соответственно. Общий спад скорости травления при высоком содержании H_2 можно объяснить уменьшением концентрации F, которое происходит при образовании молекул HF в реакции $\text{F} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HF} + \text{H}$. Причина немонотонности скорости травления Si_3N_4 неизвестна, однако, может быть связана с изменением преобладающего механизма травления.

На оптических спектрах наблюдалось излучение димера серы S_2 , интенсивность которого заметно менялась при небольшом варьировании состава газовой смеси. При добавлении водорода в гексафторид серы, интенсивность излучения S_2 увеличивалась и достигала максимума вблизи доли водорода в смеси равной 60%. Дальнейшее добавление H_2 приводило к спаду интенсивности. Поскольку изменение доли H_2 в смеси SF_6/H_2 также

приводило к немонотонному изменению скорости травления Si_3N_4 , можно предположить, что образующиеся в плазме, молекулы S_2 оказывают влияние на травлении нитрида кремния. Выявление механизма воздействия S_2 на травление является одной из целей дальнейшего исследования.

Список литературы

1. D.W. Bassett et al., ECS Transaction, 69, 159 (2015).
2. T. Li et al., US patent No 0073706 A1 (2006).
3. Yu. Barsukov et al., Journal of Vacuum Science and Technology A, 36, 061301 (2018).
4. N. Sadeghi et al., Plasma Chem. Plasma Process. 10, 553 (1990).
5. V. M. Donnelly, J. Vac. Sci. Technol. A 35, 05C202 (2017).
6. P. Arora et al., Journal of Vacuum Science & Technology A 37, 061303 (2019);

Обнаружение колебательных решений у диода со встречными потоками электронов и ионов

Кузнецов В.И.¹, Флегонтова Е.Ю.¹, Бакалейников Л.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: victor.kuznetsov@mail.ioffe.ru

Для плазменных диодов характерна ситуация, когда в межэлектродном промежутке потоки электронов и положительно заряженных ионов движутся навстречу друг другу. Например, это имеет место в термоэмиссионных диодах [1]. Наличие встречных потоков частиц противоположного заряда характерно и для ряда объектов астрофизики. Например, предполагают, что области со встречными потоками электронов и позитронов существуют в окрестности пульсаров [2, 3]. Считается, что именно в этих областях происходит ускорение частиц, ответственных за мощное излучение пульсаров. В докладе предпринята попытка понять, почему в диодах со встречными потоками частиц, имеющими заряды с противоположным знаком, вместо стационарных состояний развиваются нелинейные колебания.

У диода со встречными потоками электронов и ионов при фиксированных значениях тока и энергии заряженных частиц могут существовать несколько стационарных решений [4]. В докладе изучается устойчивость решений, у которых около каждого электрода существует потенциальный барьер, отражающий часть частиц обратно на эмитировавший их электрод. Задача решается численно с использованием высокоточного E,K-кода [5, 6]. Обнаружено, что существует порог по плотности электронного тока, при превышении которого стационарное решение оказывается неустойчивым. Процесс развития неустойчивости завершается выходом либо на другое стационарное состояние, соответствующее тем же внешним параметрам, либо на состояние с нелинейными колебаниями. Изучены свойства колебательных решений.

Один из авторов проекта (В. И. Кузнецов) благодарит РФФИ (проект N 19-08-00628) за финансовую поддержку.

Список литературы

1. T. Klinger, F. Greiner, A. Rohde, and A. Piel. Physics of Plasmas. 2, 1822 (1995).
2. F.G. Smith. Pulsars. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1977.

3. P. Goldreich, W. H. Julian. *Astrophys. J.* 157, 869 (1967).
4. А.Я. Эндер, В.И. Кузнецов, А.А. Груздев. *Физика плазмы.* 42(10), 891 (2016).
5. В.И. Кузнецов, А. Я. Эндер. *ЖТФ.* 53 (12), 2329 (1983).
6. В.И. Кузнецов, А.Я. Эндер. *Физика плазмы.* 36 (3), 248 (2010).

Ультразвуковой контроль температуры при кратковременном локальном нагреве тест-объекта фокусированным ультразвуком

Иванова Я.Ф.¹, Гатаулин Я.А.¹, Юхнев А.Д.¹, Тархов Д.А.¹, Смирнов Е.М.¹, Беркович А.Е.¹

¹СПбПУ

e-mail: radfn94@mail.ru

Высокоинтенсивный фокусированный ультразвук (High Intensity Focused Ultrasound, HIFU) представляет собой метод, основанный на генерации ультразвука высокой энергии и его фокусировании в небольшой области, где происходит кратковременный нагрев тканей. Данный метод широко применяют в современной медицине для лечения различных органов с опухолевыми образованиями посредством термического разрушения опухолей последовательной серией кратковременных нагревов [1, 2]. При персонифицированном применении терапевтического ультразвука необходим контроль температуры здоровых тканей вокруг опухоли для предотвращения их повреждения. Несмотря на широкое медицинское применение фокусированного ультразвука контроль производится не всегда.

Основными неинвазивными методами контроля температуры в здоровых тканях являются магниторезонансная томография [3] и метод ультразвуковой термометрии (УЗТ). Второй метод обладает значительными преимуществами в стоимости, размере оборудования и скорости получения данных. Метод УЗТ находится на стадии разработки различными научными группами (см., например, [4, 5]) и основан на зависимости скорости звука в материале от температуры. Алгоритмы обработки данных могут основаны на методе средневзвешенных [6], корреляционном методе [7] и других подходах. Тестирование метода УЗТ проводится путем сравнения с образцовыми измерениями, выполненными температурными датчиками, тепловизором и т.д.

В данной работе представляется авторская реализация метода ультразвуковой термометрии в применении к случаю локального кратковременного (около одной секунды) нагрева материала. Адаптированная для этого случая программа обработки данных УЗТ, основанная на ранее представленном методе [6], включает дополнительный алгоритм сглаживания и аппроксимации данных УЗТ, аналитическое решение задачи о мгновенном точечном нагреве материала. Вычисление релевантных параметров аппроксимирующей функции выполняется на этапе постобработки ультразвуковых сигналов.

Модифицированный алгоритм обработки данных УЗТ протестирован на экспериментальном стенде, где посредством фокусированного ультразвука создается локальный кратковременный нагрев (1 с) однородного тканеэквивалентного тест-объекта [2]. Нагрев эллипсоидальной области фокуса размером $10 \times 1 \times 1$ мм ультразвуковым излучателем Н-148 (Sonic Concepts) обеспечивает приращение температуры в ней до 30 °С. Ультразвуковой диагностический датчик МС4-2R20N (АО «НПФ БИОСС») записывает данные после

нагрева из окна 15×20 мм, которые затем обрабатываются с помощью программы, реализующий модифицированный алгоритм УЗТ. Найденное приращение температуры сравнивается с измерениями термисторного датчика B57560G1 (NTC) на различных расстояниях от центра нагрева: 2, 3, 4 мм. Установлено, что применение модифицированного алгоритма позволяет существенно понизить величину случайных погрешностей измерений и измерять приращение температуры при локальном кратковременном нагреве с точностью не ниже 3 С.

Список литературы

1. Sapozhnikov O.A. et al. Nonlinear Acoustics Today. Acoustical Society of America, Vol. 15(3): p. 55-64, 2019;
1. Andreeva T.A., Berkovich A.E., Bykov N.Y., Kozyrev S.V., Lukin A.Y. Heating and destruction of biological tissue by high-intensity focused ultrasound. Materials Physics and Mechanics, Vol. 42: p. 625-636, 2019;
2. McDannold N., Tempany C. M., Fennessy F. M., So M. J., Rybicki F. J., Stewart E. A., Jolesz F. A. and Hynynen K. Uterine leiomyomas: MR imaging-based thermometry and thermal dosimetry during focused ultrasound thermal ablation, Radiology, Vol. 240: p. 263-272, 2006;
3. Xuehua S., Xiong Q., Shi W., Liang S., Shi X. and Wang K. A new algorithm for reconstructing two-dimensional temperature distribution by ultrasound thermometry. Math. Probl. in Eng., Vol. 2015: 10 p., 2015;
4. Hsiao Y.-S. and Deng C. X. Calibration and evaluation of ultrasound thermography using infrared imaging, Ultrasound in Med. & Biol., Vol.42(2), p. 1–15, 2015;
5. Ivanova Y. F., Yuhnev A. D., Gataulin Y. A., Smirnov E. M., Tarkhov D. A., Berkovich A. E. Application of ultrasound thermometry technique in case of local HIFU heating of test-object, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1400: 6 p., 2019;
6. Мануилов Г.А., Гатаулин Я.А., Сеницына Д.Э., Смирнов Е.М., Юхнев А.Д. Отработка методики ультразвуковой термометрии с использованием тканеквивалентного тест-объекта, Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт прикладной математики и механики: с. 268-271, 2018.

Анализ потока нейтронов из плазмы сферического токамака Глобус-М2 при ее инжекционном нагреве

Скрекель О.М.¹, Бахарев Н.Н.¹, Гусев В.К.¹, Жильцов Н.С.¹, Ильясова М.В.¹, Киселев Е.О.¹, Корнев В.А.¹, Курский Г.С.¹, Мельник А.Д.¹, Минаев В.Б.¹, Мирошников И.В.¹, Патров М.И.¹, Петров Ю.В.¹, Сахаров Н.В.¹, Тельнова А.Ю.¹, Тюхменева Е.А.¹, Толстяков С.Ю.¹, Хилькевич Е.М.¹, Чернышев Ф.В.¹, Чугунов И.Н.¹, Шевелев А.Е.¹, Щёголев П.Б.¹

¹ ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: skrekelenok@mail.ru

Гибридный реактор – установка, сочетающая в себе технологии ядерного синтеза и деления. В качестве драйвера в такой системе можно использовать сферический токамак, который будет генерировать термоядерные нейтроны, являющиеся продуктом реакции ядерного синтеза изотопов водорода. Эти испускаемые нейтроны затем будут

использованы для замыкания топливного цикла атомных электростанций, то есть позволят «дожигать» отработанное термоядерное топливо и нарабатывать новое. Кроме того, энергий термоядерных нейтронов будет хватать для деления материалов, на которых не может работать классический реактор, например, ^{238}U и ^{232}Th .

Сферический токамак Глобус-М2 (тороидального магнитное поле 1 Тл, ток плазмы 500 кА [2]), являясь модернизированной версией установки Глобус-М, сохранил вакуумную камеру (большой радиус $R = 36$ см, малый радиус $a = 24$ см, аспектное отношение $\approx 1,5$) и соответственно геометрические параметры плазмы. Основная цель реконструкции установки – достижение в ней параметров плазмы, близких к планируемым в будущем термоядерном источнике нейтронов. В связи с этим одним из основных направлений исследований на токамаке Глобус-М2 является измерение нейтронного потока, возникающего при инжекции высокоэнергичного дейтериевого пучка в дейтериевую плазму. Для измерения нейтронного потока применяется He^3 -газоразрядный счетчик, работающий на смеси газов He^3 , Ar и CO_2 с полиэтиленовым замедлителем [3] и 2 коронных счетчика СНМ-11 с полиэтиленовым замедлителем.

Работа посвящена созданию и экспериментальной верификации «синтетической» нейтронной диагностики токамака Глобус-М2. Одним из основных элементов расчета является функция распределения ионов плазмы, которая при инжекционном нагреве плазмы может быть разделена на две составляющих: тепловая и надтепловая. Тепловая часть – это ионы, имеющие Максвелловскую функцию распределения. Она восстанавливается на основе измерений ионной температуры, выполненных с помощью анализатора атомов перезарядки; пространственного распределения концентрации электронов, измеренного при помощи диагностики томсоновского рассеяния и данных диагностики эффективного заряда. Функция распределения быстрых частиц (надтепловая часть) рассчитывается с помощью кода NUBEAM [4]. Реализован алгоритм вычисления трехмерной функции источника нейтронов, который учитывает три составляющие общей излучательной способности нейтронов плазмой: нейтроны, возникающие при взаимодействиях «пучок-плазма», «пучок-пучок» и «плазма-плазма». На следующем шаге результаты расчетов по алгоритму применяются для вычисления потока нейтронов на детекторы с учетом реальной геометрии эксперимента. Результаты моделирования сравниваются с данными, полученными с помощью нейтронных счетчиков, установленных на токамаке Глобус-М2.

Бахарев Н.Н., Киселев Е.О., Щеголев П.Б., Тельнова А.Ю. и Мельник А.Д. благодарят за поддержку РФФИ, грант 18-32-20031 мол_a_вед.

Список литературы

1. Gusev V. K., Bakharev N. N., Ber B. Ya., Bulanin V. V., Chernyshev F. V., Dyachenko V. V., Goncharov P. R., Gusakov E. Z., Ibyaminova A. D., Irzak M. A., Kaveeva E. G., Khitrov S. A., Khromov N. A., Kornev V. A., Kurskiev G. S., Melnik A. D., Minaev V. B., Mineev A. B., Mironov M. I., Novokhatsky A. N., Patrov M. I., Petrov A. V., Petrov Yu. V., Rozhansky V. A., Sakharov N. V., Saveliev A. N., Senichenkov I. Yu., Shchegolev P. B., Shcherbinin O. N., Tolstyakov S. Yu., Varfolomeev V. I., Voronin A. V., Yashin A. Yu., Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development, Plasma Phys. Control. Fusion, 58, 014032 (6pp), 2016;
2. Minaev V. B., Gusev V. K., Sakharov N. V., Varfolomeev V. I., Bakharev N. N., Belyakov, V.A., Bondarchuk E.N., Brunkov P.N., Chernyshev F. V., Davydenko V.I., Dyachenko Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kononov A.N., Kornev V. A., Kurskiev G. S., Labusov A.N., Melnik A. D., Mineev A. B., Mironov M. I., Miroschnikov I.V., Patrov M. I., Petrov Yu. V., Rozhansky V. A., Saveliev A. N., Senichenkov I. Yu., Shchegolev P. B., Shcherbinin O. N., Shikhovtsev I.V., Sladkomedova A.D., Solokha V.V.,

- Tanchuk V.N., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G., Spherical tokamak Globus-M2: design, integration, construction, Nucl. Fusion, 57, 066047, 2017;
3. V.A. Kornev, L.G. Askinazi, M.I. Vildjunas et al, Techn. Phys. Lett., v.39(2013), No.3, p.290
 4. Alexei Pankin, Douglas McCune, Robert Andre, Glenn Bateman, Arnold Kritz, The tokamak Monte Carlo fast ion module NUBEAM in the National Transport Code Collaboration library, 2003.

Номер проекта РФФИ: 18-32-20031 мол_а_вед

Численное моделирование пространственно-временной эволюции течения в модели бифуркации брюшной аорты при наличии стеноза в одной из ветвей

Синицына Д. Э.¹, Зайцев Д.К.¹

¹СПбПУ

e-mail: sinicina.daria@yandex.ru

Численным методом исследована пространственно-временная эволюция вихревых структур, формирующихся при движении крови в среднестатистической модели бифуркации брюшной аорты, общих, наружных и внутренних подвздошных артериях. Проведен анализ влияния гемодинамически значимого стеноза, находящегося в правой общей подвздошной артерии (ОПА), на структуру течения в ниже расположенных участках.

Использованная в исследовании модель среднестатистической конфигурации брюшной аорты и подвздошных артерий построена по осредненным клиническим данным около 800 пациентов [1-6]. В этой модели учтены характерные пространственные изгибы сосудистого русла из трех бифуркаций. Отклонения от оси выходного участка брюшной аорты для общих подвздошных артерий составляют: для левой – 20°, для правой – 25°. Угол между внутренними и наружными подвздошными артериями составляет 30° (на виде сбоку) и 40° (на виде спереди). В правой ОПА, недалеко от бифуркации аорты, расположен осесимметричный стеноз с проходным диаметром 5,9 мм. Степень сужения стеноза по площади составляет 70 %.

Численное моделирование сердечного цикла в условии покоя проводилось в предположении о ламинарном характере движения жидкости. Решалась полная система нестационарных уравнений Навье – Стокса для несжимаемой ньютоновской жидкости с постоянной вязкостью. На входе в брюшную аорту (БА), на выходах из правой и левой наружных подвздошных артерий (НПА), на выходе из левой внутренней подвздошной артерии (ВПА) задавались релевантные кривые расхода, на выходе из правой ВПА – нулевой уровень давления. Величины и соотношение расходов в непораженной ветви подбирались на основе клинических данных, полученных при обследовании 15 пациентов. Отличительной особенностью пульсирующего режима в выделенном участке сосудистого русла является наличие обратного тока в фазу диастолы. Характерное число Рейнольдса на входе в БА в момент максимального расхода составляет $Re=1524$.

Практически полная симметричность бифуркации брюшной аорты позволила провести сравнительное исследование течения в непораженной и стенозированной ветвях. Расчеты показали, что в рассмотренной модели бифуркации брюшной аорты и последующих

бифуркациях подвздошных артерий формируется сложная вихревая структура, которая трансформируется по длине сосуда в течение цикла. Стеноз оказывает влияние как вниз, так и вверх по потоку – образуется зона обратных токов, а формирующаяся вихревая структура поперечного течения отлична от наблюдающейся в непораженной ветви. В течение цикла на входе в стенозированную ОПА развивается зона обратных токов, размеры которой достигают максимального размера (40% площади сечения) в фазу уменьшения расхода. Еще большая по размерам зона обратных токов формируется за стенозом, она занимает около 50% площади сечения ОПА в течение почти всего цикла. Вместе с тем, влияние стеноза на формирование зон обратных токов ниже по течению (в НПА и ВПА) почти отсутствует, за исключением фазы уменьшения расхода – в этот момент в НПА у внешней стенки сосуда наблюдается зона обратных токов, занимающая 20% площади поперечного сечения. Анализ структуры поперечного течения позволил заключить, что в стенозированной ветви, как в ОПА, так и в НПА, наблюдается переход от устойчивого двухвихревого течения, присущего фазе увеличения и максимального расхода, к одновихревому течению в фазах уменьшения расхода и обратного тока. Это существенно отличается от эволюции течения в ОПА и НПА непораженной ветви, для которых предсказываются различные неустойчивые в течение цикла картины вихревого течения – двухвихревой или четырехвихревой структуры. В обеих ВПА в течение цикла наблюдается переход от двухвихревого к одновихревому движению. Наличие стеноза влияет только на вихревую структуру в фазу обратного тока: в непораженной ветви ВПА на этом участке цикла формируется одновихревое течение, а в ВПА стенозированной ветви сколько-нибудь выраженные вихревые структуры отсутствуют.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-01-00629).

Список литературы

1. Lorbeer R., Grotz A., Dörr M., et al. Reference values of vessel diameters, stenosis prevalence, and arterial variations of the lower limb arteries in a male population sample using contrast-enhanced MR angiography. *PLoS One*. 2018. Vol. 13, No. 6, p.15
2. Cuomo F., Roccabianca S., Dillon-Murphy D., et al. Effects of age-associated regional changes in aortic stiffness on human hemodynamics revealed by computational modeling. *PLoS One*. 2017. Vol. 12, No. 3, p.21
3. Kurra V., Schoenhagen P., Roselli E.E., et al. Prevalence of significant peripheral artery disease in patients evaluated for percutaneous aortic valve insertion: preprocedural assessment with multidetector computed tomography. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. 2009. Vol. 137, No. 5, pp. 1258–1264.
4. Shah P.M., Scartont H.A., Tsapogas M.J. Geometric anatomy of the aortic-common iliac bifurcation. *Journal of Anatomy*. 1978. Vol. 126, Pt. 3, pp. 451–458.
5. O'Flynn P.M., O'Sullivan G., Pandit A.S. Geometric variability of the abdominal aorta and its major peripheral branches. *Annals of Biomedical Engineering*. 2010. Vol. 38, No. 3, pp. 824–840.
6. Yeung J.J., Jin Kim H., Abbruzzese T.A., et al. Aortoiliac hemodynamic and morphologic adaptation to chronic spinal cord injury. *Journal of Vascular Surgery*. 2007. Vol. 44, No. 6, pp. 1254–1265.

Изучение свойств альфвеновских колебаний в модернизированном сферическом токамаке Глобус-М2

Балаченков И. М.¹, Бахарев Н.Н.¹, Буланин В. В.², Гусев В. К.¹, Жильцов Н. С.^{1,2}, Киселёв Е. О.¹, Курские Г. С.¹, Минаев В.Б.¹, Патров М.И.¹, Петров А.В.², Петров Ю. В.¹, Сахаров Н.В.¹, Тельнова А. Ю.¹, Щеголев П. Б.¹, Яшин А. Ю.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

В результате модернизации токамака Глобус-М, было увеличено магнитное поле с величины 0.4 – 0.5 Т в токамаке Глобус-М до 0.7 – 0.8 Т в токамаке Глобус-М2 [1]. Это привело к изменению характеристик альфвеновских колебаний, а также к обнаружению новых эффектов, связанных с ними, которые ранее не регистрировались на установке Глобус-М. Для наблюдения альфвеновских колебаний в разрядах с увеличенным магнитным полем был расширен частотный диапазон магнитной диагностики, а также применен новый 6-канальный рефлектометр доплеровского обратного рассеяния (ДОР), позволяющий зондировать более центральные области плазмы.

Была получена зависимость величины потерь быстрых ионов (по данным анализатора атомов перезарядки) от величины амплитуды альфвеновских колебаний при величине тока 300-330 кА и магнитного поля 0.6 и 0.7 Т. Характер зависимости позволяет сделать вывод о том, что с увеличением магнитного поля и тока потери быстрых ионов становятся меньше, чем в разрядах с более низким током и магнитным полем [2].

Другим связанным с увеличением основных параметров разряда эффектом является регистрация мод на обращенном шире (RSAE) или альфвеновских каскадов (АС) в начальной стадии разрядов с инжекцией нейтральных атомов. Моды на обращенном шире до этого не регистрировались на Глобусе-М так как для их возбуждения требуются более низкие значения β [3], чем те, которых удавалось достигнуть в разрядах с низким полем во время инжекции. Кроме того, данные рефлектометрии ДОР свидетельствуют о том, что локализация обнаруженных RSAE смещена в центральную область плазменного шнура, в отличие от регистрировавшихся ранее мод ТАЕ, локализованных на периферии [4]. Обнаружение АС дает возможность использовать т.н. МГД-спектроскопию для определения минимума коэффициента запаса устойчивости, которая была успешно применена на токамаке Глобус-М2.

Список литературы

1. Gusev V.K. et al, 20th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2019), October 28-31, 2019, Frascati, Italy
2. Ю.В. Петров, Н.Н. Бахарев, В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курские, А.А. Мартынов, С.Ю. Медведев, В.Б.Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Н.В. Сахаров, П.Б. Щёголев, А.Ю. Тельнова, С.Ю. Толстяков, А.Ю. Яшин // Физика плазмы, 2019, том 45, в 8, с. 675–684
3. Fredrickson E.D. et al, Phys. Plasmas 14, 102510 (2007)
4. Bulanin V.V. et al, Tech. Phys. Lett. 43 (2017) 12, pp. 1067–1070

Моделирование взаимодействия гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме турбулентного горения

Попов П.А.¹, Талалов В.А.², Пашкевич Д.С.², Камбур П.С.², Капустин В.В.², Зимин А.Р.², Алексеев Ю.И.³

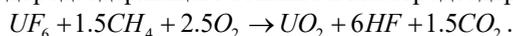
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПБПУ

³ООО «Новые химические продукты», Россия

e-mail: pavel.popov@mail.ioffe.ru

Гексафторид урана UF₆, обедненный по изотопу ²³⁵U является побочным продуктом процесса изотопного обогащения урана при производстве ядерного топлива. В настоящее время, в мире накоплено до 2 млн. тонн UF₆, в том числе в России до 1 млн. тонн. Данное соединение относится к 1 классу опасности и представляет угрозу для окружающей среды. Одним из перспективных методов переработки гексафторида урана является его утилизация в пламени водородсодержащего топлива и кислородсодержащего окислителя:



Экспериментальные исследования переработки гексафторида урана сопряжены с многочисленными сложностями, вызванными высокой коррозионной активностью реагентов. Опубликованы результаты термодинамического анализа данного метода переработки, а также результаты экспериментальных исследований. Однако имеющиеся данные не позволяют провести детальный анализ химических и теплофизических процессов в реакторе. Естественным путем решения данной проблемы является численное моделирование турбулентного струйного пламени в реакторе и пиролиз гидролиза гексафторида урана. В настоящее время, детальный расчет невозможен в силу отсутствия в литературе сведений о химической кинетике реакций, протекающих при обработке UF₆ в пламени. В данной работе представлена упрощенная модель процесса пламенной реконверсии UF₆ где учтены основные теплофизические и гидродинамические процессы. Полученные результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

Список литературы

1. Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах: Вып. 2 / Под общ. ред. чл.-корр. РАН Ю. В. Петрова. — СПб.: Политехника, 2018. — 175 с.

Номер проекта РФФИ: 15-08-06280

Further development of the Xe laser plasma 11-nm radiation source – new data on laser energy absorption and spectroscopy

Буторин П.С.¹, Калмыков С.Г.¹, Максимов В.А.¹, Сасин М.Э.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Butorin_ps@mail.ru

An earlier discovered effect of EUV radiation intensity increase from Xe laser-produced plasma when the latter was irradiated with a wide defocused laser beam needed a further

investigation that has become a motivation for the present work. Absorption of the laser pulse energy in the plasma has been shown to change from 8.5% at irradiation of a gas-puff target with a beam narrow-focused onto a near-central area of the jet up to 65% at the wide defocused irradiation. An analysis of this phenomenon is based on a hypothesis that plasma density decays significantly during the 10ns laser pulse due to hydrodynamic expansion of the hot plasma. A similarity of the EUV intensity and the laser light absorption as functions of the laser beam diameter suggests a revision of the conventional idea of a strong EUV radiation self-absorption in a cold peripheral shell of the laser plasma whereas the high absorptivity of the laser radiation by the plasma looks like a major feature to gain high efficiency of an EUV source.

Additionally, a spectroscopic study of the Xe laser plasma emission at different laser irradiation geometries is now in progress. Its results are expected to clarify the questions emerged.

Список литературы

1. S.G. Kalmykov, P.S. Butorin and M.E. Sasin, "Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11 nm—Optimization and conversion efficiency", *Journal of Applied Physics* 126, 103301, 2019
2. Garbaruk A.V., Gritskovich M.S., Kalmykov S.G., Mozharov A.M., Sasin M.E., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v. 50 p. 25201, 2017

Номер проекта РФФИ: 18-08-00716

Свойства долгоживущих ионов, возникающих в ходе нелинейных колебаний в плазменном диоде

Бакалейников Л.А.¹, Кузнецов В.И.¹, Флегонтова Е.Ю.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: bakal.ammp@mail.ioffe.ru

В [1] показано, что в плазменном диоде со встречными потоками электронов и ионов при определенных внешних параметрах могут существовать решения с нелинейными колебаниями. В ходе расчетов обнаружилось, что наличие колеблющегося потенциального барьера для ионов на распределении потенциала приводит к довольно сложной структуре функции распределения ионов на фазовой плоскости. Оказалось, что наряду с обычными областями, соответствующими частицам, преодолевшим потенциальный барьер и долетевшим до противоположного электрода, или частицам, которые отразились от барьера и вернулись на эмитирующий ионы электрод, в процессе колебаний появляются новые области. Эти области характеризуются тем, что их число увеличивается с течением времени, а их ширина и расстояние между ними уменьшаются. Такая структура фазовой плоскости весьма похожа на структуру фазовой плоскости долгоживущих электронов, которые изучались в [2]. Было сделано предположение, что эта структура обусловлена существованием в окрестности барьера долгоживущих ионов.

Эти ионы подлетают к колеблющемуся барьеру со скоростями, близкими к нулю, колеблются в окрестности максимума потенциала в течение нескольких периодов колебаний потенциала, а затем уходят на один из электродов.

Для проверки этого предположения была выбрана простая форма колебаний распределения потенциала вблизи максимума, что позволило получить аналитические формулы

для траекторий ионов. Установлено, что появление долгоживущих ионов связано с неустойчивостью их траекторий. Сделаны оценки интервалов скоростей на фазовой плоскости, соответствующих различным группам долгоживущих ионов. Сравнение предсказываемых аналитической моделью ширин скоростных интервалов с численными результатами показало хорошее согласие. Таким образом, можно утверждать, что при развитии нелинейных колебаний в плазменном диоде в режиме с отражением ионов от потенциального барьера всегда присутствуют долгоживущие ионы.

Один из авторов (В.И.Кузнецов) благодарит за финансовую поддержку РФФИ, проект 19-08-00628.

Список литературы

1. В. И. Кузнецов, Е. Ю. Флегонтова, Л. А. Бакалейников. Доклад на конференции ФизикаСПб2020.
2. В. И. Кузнецов, А. Я. Эндер. Физика плазмы. 36(3), 258, 2010.

Номер проекта РФФИ: 19-08-00628

Измерение теплового потока с помощью тонкопленочного датчика и датчика на анизотропных термоэлементах при отражении ударной волны

Сахаров В.А.¹, Попов П.А.¹, Поняев С.А.¹, Монахов Н.А.¹, Митяков А.В.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru

Исследование особенностей теплообмена на поверхности тела является одной из актуальных задач экспериментальной газодинамики. В настоящее время изучение взаимодействия высокоскоростного потока газа с моделью проводится на установках импульсного действия. Наиболее распространенными тепловыми датчиками, применяемыми в импульсном газодинамическом эксперименте, являются тонкопленочные датчики сопротивления и коаксиальные термопары. Датчики данного типа обладают достаточным временным разрешением, однако их использование связано с определенными сложностями. Тонкая металлическая пленка обладает низкой механической прочностью и быстро разрушается твердыми частицами, часто присутствующими в сверхзвуковом потоке. Коаксиальные термопары обладают значительно большей механической прочностью, однако низкий электрический сигнал затрудняет его регистрацию и дальнейшую обработку.

Одним из перспективных средств тепловых измерений являются датчики на анизотропных термоэлементах из монокристалла висмута. Они обладают высокой механической прочностью, высоким электрическим сигналом и устойчивостью к сильным электромагнитным помехам.

Основной задачей исследования являлось сравнение результатов измерений тонкопленочным датчиком сопротивления и датчиком на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте при условии минимального механического воздействия. Модельной задачей, в которой в наибольшей степени удастся реализовать данное требование, является нормальное отражение ударной волны. В данных экспериментах,

характерное время процесса составляет $1 \mu s$. В работе представлены результаты измерений температуры поверхности и рассчитанного по ней теплового потока.

В работе использованы экспериментальные данные, полученные при поддержке РФФИ, проект 08-08-00414.

Список литературы

1. Hollis B.R., Prabhu D.K., Maclean M. and Duffrene A. 2017 J. Thermophys. Heat. Tr. 31 (3) 712-31
2. Mityakova A.V., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y. Snarskii A.A., Zhenirovsky M.I. and Pyrhonen J.J. 2012 Sensor Actuat. A-Phys. 176 1-9
3. Popov P.A., Bobashev S.V., Reznikov B.I. and Sakharov V.A. 2018 Tech. Phys. Lett. 44 (4) 316-9

Номер проекта РФФИ: 08-08-00414

Численное исследование течения жидкости и движения стенки в модели упругой бифуркации кровеносного сосуда

Гатаулин Я.А.¹, Котмакова А.А.², Юхнев А.Д.¹, Зайцев Д.К.¹

¹Московский авиационный институт

e-mail: yakov_gataulin@mail.ru

Численные исследования течений в среднестатистических моделях кровеносных сосудов, построенных по осредненным на группе пациентов клиническим данным, позволяют оценить влияние упругости стенок артерии на течение крови и принять решение, стоит ли учитывать данный фактор при моделировании кровотока в пациент-ориентированных моделях для прогнозирования патологических изменений стенки.

Для оценки влияния упругости стенки на течение в модели бифуркации брюшной аорты решена сопряженная однонаправленная задача гидроупругости по следующей методике. Для разных модулей Юнга стенки сосуда проведена серия прочностных расчетов с приложенным к стенке нестационарным изменением давления, полученным из клинических данных. Затем из решенной прочностной задачи взято нестационарное перемещение стенки и передано в качестве граничного условия в гидродинамическую задачу. Решение уравнения движения твердой стенки проводилось в программе ANSYS Transient Structural. Нестационарные трехмерные уравнения Навье-Стокса решались в программе ANSYS CFX на перестраиваемой сетке. Передача данных между солверами выполнялась на каждом шаге по времени автоматически в модуле ANSYS System Coupling.

Геометрическая модель бифуркации брюшной аорты с подвздошными артериями построена в программе SolidWorks [1]. Геометрия сосуда включала брюшную аорту, правую и левую общие подвздошные артерии, правую и левую внутреннюю и наружную подвздошные артерии. На входе модели задавалось изменение давления во времени, на выходах – изменение расхода [2, 3]. Период пульсаций составлял 0,86 с. Число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости на входе в брюшную аорту в момент максимального расхода и ее входному диаметру, равно 1600. Модуль Юнга стенки варьировался в физиологическом диапазоне от 1 до 10 МПа. Толщина стенки 1 мм, плотность

1000 кг/м³, коэффициент Пуассона 0,4. Сосуд считался изотропным линейным упругим материалом. Стенки на входе и выходах жестко закреплены.

Построенные зависимости продольных и поперечных скоростей течения, величины и индекса колебаний сдвиговых напряжений на стенке на разных артериях бифуркации брюшной аорты от модуля Юнга стенки показали, что на большей части бифуркации интенсивность поперечного течения практически не меняется с изменением упругости, так же, как и величина сдвиговых напряжений на стенке и индекс их колебаний. Однако, перед бифуркацией брюшной аорты, где наблюдается наибольшее растяжение, сдвиговые напряжения, продольная и поперечная скорости течения отличаются примерно на 30% в исследованном диапазоне модулей упругости.

Распределение сдвиговых напряжений показало, что наиболее опасные зоны для образования атеросклеротических бляшек находятся на внешних стенках общих и наружных подвздошных артерий. В связи с тем, что влияние упругости на положение и площадь этих зон незначительное, прогнозирование атеросклеротических изменений бифуркации брюшной аорты можно выполнять в первом приближении без учета ее упругих свойств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ No 18-01-00629).

Список литературы

1. Сеницына Д.Э., Юхнев А.Д., Зайцев Д.К., Туркина М.В. Ультразвуковое и численное исследование структуры течения в трехмерной модели бифуркации брюшной аорты // Научно-технические ведомости СПбГПУ.- 2019.- №4.- стр. 50-60
2. Yeung J. J., Kim H. J., Abbruzzese T. A. et al. Aortoiliac hemodynamic and morphologic adaptation to chronic spinal cord injury // Journal of Vascular Surgery, 2006, Vol. 44, pp. 1254-1265.
3. Malossi A. C. I., Bonnemain J. Numerical comparison and calibration of geometrical multiscale models for the simulation of arterial flows // Biomedical Engineering Society, 2013, Vol. 4, pp. 440-463.

Динамики пространственно-временного распределения возбужденных атомов в наносекундном плазменно-пучковом разряде с щелевым катодом

Ашурбеков Н.А.¹, Иминов К.О.¹, Шахсинов Г.Ш.¹, Закарьяева М.З.^{1,2}

¹Дагестанский государственный университет

²Институт физики ДФИЦ РАН

e-mail: nashurb@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию пространственно-временной динамики наработки возбужденных атомов в протяженном наносекундном разряде со щелевым катодом в неоне при средних давлениях газа в условиях генерации в газовой среде ленточных электронных пучков.

Наносекундный разряд происходил в кварцевой трубке между электродами из алюминия, расположенными параллельно на расстоянии 0.6 см друг от друга. Анод представлял собой плоскую пластину длиной 5 см, шириной 2 см и толщиной 0.5 см. Катод имел форму цилиндрического стержня длиной 5 см и диаметром 1.2 см, вдоль которого

прорезана полость в виде прямоугольной щели шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см [1, 2]. Разрядная область между катодом и анодом ограничена с обеих сторон диэлектрическими пластинами из стеклотекстолита, в результате область разряда имеет форму прямоугольного параллелепипеда длиной 5 см, высотой 1.2 см и шириной 0.2 см. В работе экспериментально исследована покадровая динамика пространственно-временного формирования оптического излучения разряда с временем экспозиции 5 нс и временными интервалами между кадрами 2 нс. В аналогичных условиях методом лазерной абсорбционной спектроскопии измерены концентрации возбужденных атомов неона на метастабильных уровнях с временным разрешением около 10 нс и экспериментально определены вольт-амперные характеристики разряда в широком диапазоне изменения амплитуд импульсов напряжения и давлений газа в диапазоне 1-60 Тор.

Для анализа кинетических процессов в исследуемом плазменном источнике выполнено численное моделирование ионизационных процессов в программной среде Comsol Multiphysics с использованием специального модуля Plasma. Геометрия области моделирования выбиралась исходя из реальных размеров разрядной камеры и конфигурации электродной системы. В области моделирования решалась самосогласованная система, состоящая из уравнения Пуассона, уравнения дрейфа-диффузии для плотности электронов, уравнений Максвелла-Стефана для переноса тяжелых частиц и уравнения энергетического баланса для электронов при заданных начальных и граничных условиях.

Показано, что с развитием разряда меняется не только общая концентрация возбужденных атомов, также качественно меняется профиль распределения возбужденных атомов в разрядном промежутке. Проанализирована динамика распространения плазменного фронта от анода до входа в полость катода, а также кинетические плазменные процессы внутри полости катода, влияющие на пространственное распределение концентраций возбужденных атомов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-90179

Список литературы

1. Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 8. С. 63 – 70.
2. Ashurbekov N. A., Iminov K.O., Zakaryeva M. Z., Ramazanov A. R. and Shakhshinov G. Sh. // 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1393 012001

Номер проекта РФФИ: № 19-32-90179

Управление параметрами разряда токамака с помощью плазменной струи

Горяинов В. Ю.¹, Воронин А.В.¹, Гусев В.К.¹, Минаев В.Б.¹, Новохацкий А.Н.¹, Петров Ю.В.¹, Сахаров Н.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: vgoryainov@mail.ioffe.ru

Технология пробоя рабочего газа, заполнение плазмой, а также оптимизация сценария разряда являются актуальными задачами, стоящими на пути решения эффективного управления параметрами токамака. В настоящее время рассматриваются и применяются

методы управления, основанные на источниках ВЧ излучения, высокоэнергичных нейтральных атомов [1], плазменных струй, компактных торов [2] и др. В работе представлены результаты управления параметрами разряда с помощью инжекции струи плазмы, создаваемой коаксиальным ускорителем. Возможности эффективного применения ускорителя плазмы были продемонстрированы ранее экспериментально на токамаке Глобус-М с магнитным полем ≤ 0.4 Тл [3], в результате чего удалось увеличить плотность частиц на 30 % в центральной области плазменного шнура без срыва тока.

В настоящее время было достигнуто существенное увеличение энергии струи плазмы с применением оригинального коаксиального ускорителя со скоростью движения потока 100-200 км/с, плотностью плазмы $> 10^{22}$ м⁻³ и давлением на оси струи > 0.4 МПа [4]. Настоящая работа является продолжением ранее начатых исследований по разработке ускорителя плазмы с большой кинетической энергией и его применению на сферическом токамаке Глобус-М2 и Казахском материаловедческом токамаке с магнитным полем до 1 Тл.

Работа выполнена при поддержке проекта министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 05.585.21.0007 "Совершенствование основных технологических систем токамака КТМ, включая систему управления плазмой, сбора и обработки экспериментальных данных, систему предионизации рабочего газа, диверторную систему".

Список литературы

1. ITER Physics Basis 1999 *Nucl. Fusion* 39 12 2391-2469.
2. Raman R. et. al. 2013 *Nucl. Fusion* 53 073017 (7pp).
3. Voronin A, Gusev V, Petrov Yu, Sakharov N, Abramova K, Sklyarova E and Tolstyakov S 2005 *Nucl. Fusion* 45 1039-45.
4. Voronin A, Goryainov V and Gusev V 2020 *Technical Phys.* 90 Issue 6 (in press).

Номер проекта РФФИ: грант № 05.585.21.0007, проект № 16-08-00338.

Моделирование методом Монте-Карло характеристик дрейфа электронов в инертном газе с парами ртути

Рагимханов Г.Б.², Голятина Р.И.¹, Курбанисмаилов В.С.², Майоров С.А.¹, Халикова З.Р.¹

¹ИОФ РАН

²Дагестанский государственный университет

e-mail: gb-r@mail.ru

Актуальность изучения высоковольтных импульсных газовых разрядов обусловлена их широким практическим применением: плазменно-стимулированное горение [1-3], плазменная аэродинамика [4-6], плазменная медицина [7-8], обработка поверхности [9]. В то же время большое разнообразие физических процессов в импульсных газовых разрядах обуславливает и сложность интерпретации наблюдаемых явлений.

В зависимости от условий формирования разряда возможны различные механизмы формирования и режимы его горения [10-13]. С точки зрения практики представляется очень важным изучение влияния разряда на эрозию электродов.

Как известно, переходу от объемной формы горения к искровому каналу, предшествует либо взрыв микроострий катодной поверхности, либо происходит инициирование эмиссионного центра при пробое диэлектрических включений [14, 15]. Следовательно, в рабочий газ может попадать некоторое количество атомов материала электродов [16-17]. Хорошо известно [18, 19], что добавление в инертный газ с большим потенциалом ионизации даже небольшого количества легкоионизируемого газа (например, аргон в гелий [18], или криптон в гелий [20]) может радикально менять кинетические характеристики разряда.

Отметим, что пары металла имеют значительно более низкий потенциал ионизации по сравнению с атомами благородных газов. Поэтому наличие даже малой доли атомов металла в благородном газе существенно влияет на кинетику процессов в разряде – повышается частота ионизации, уменьшается температура электронов, в разряде появляется значительное число ионов металла [21-23].

В связи с этим, несомненный интерес представляют экспериментальные и теоретические исследования влияния паров металла на ионизационно-дрейфовые характеристики электронов в инертных газах.

В работе методом Монте-Карло выполнены расчеты ионизационно-дрейфовых характеристик электронов в инертном газе (He, Ar, Xe) с парами ртути при напряженности электрического поля $E/N = 1-100$ Тд с учетом неупругих столкновений.

Вычислительный эксперимент основан на рассмотрении ансамбля невзаимодействующих между собой электронов, движение которых определяется заданными полями и мгновенными столкновениями с атомами. Модель столкновений основана на процедуре генерации случайных чисел – методе типа Монте – Карло. Реализация электрон – атомных столкновений методом Монте – Карло позволяет учитывать энергобаланс электронов на основе элементарных актов, в том числе и при неупругих столкновениях [21-23].

Показано, что даже очень малые примеси атомов ртути в инертный газ существенно меняют функцию распределения электронов по энергиям и зарядовый состав плазмы. Исследовано влияние процентного содержания атомов ртути в инертном газе на кинетические характеристики: коэффициенты диффузии и подвижности, частоту ионизации и т. п. Рассчитаны значения скорости дрейфа, средней энергии электронов, характеристической энергии Таунсенда, ионизационного коэффициента Таунсенда.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-08-00333 и № 19-08-00611.

Список литературы

1. Starikovskaia S // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014 47 353001
2. Popov N A // Plasma Sources Sci. Technol. 2011 20 045002
3. Aleksandrov N.L., Kindysheva S.V., Kosarev I.N., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Y. // Proc. Combust. Inst. 2009 32, 205–212.
4. Yang Liu et al // Plasma Sources Sci. Technol. 2019 28 014001.
5. Starikovskii A.Yu. et al // Plasma Sources Sci. Technol. 2009 18 034015
6. Atsushi Komuro et al // Plasma Sources Sci. Technol. 2018 27 104005.
7. Fridman G., Friedman G., A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman // Plasma Processes and Polymers 2008 5 №. 6 pp. 503–533.
8. Lee H.J., Shon C.H., Kim Y.S., Kim S., Kim G.C. and Kong M.G. // New J. Phys. 2009 11 115026.
9. Erofeev M., Ripenko V., Shulepov M., and Tarasenko V. // Eur. Phys. J. D 2017 71: 117.
10. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Рафид А.А. Али. // Прикладная физика, 2015, № 2. С. 63-68

11. Баирханова М.Г., Гаджиев М.Х., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. // Прикладная физика № 5, 2009. С. 62-67
12. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х., Баирханова М.Г., Катаа А.Дж. // Прикладная физика, 2010, № 4. С. 56-64
13. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Арсланбеков М.А., Рагимханов Г.Б., Курбанисмаилов М.В., Али Рафид Аббас Али. // Прикладная физика, 2013, № 5, С. 47-54
14. Mesyats G. A., Osipov V.V. and Tarasenko V. F. Pulsed Gas Lasers (Washington: SPIE Press) 1995, p. 374
15. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. // Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224с.
16. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 234-242
17. Ломаев М.И., Белоплатов Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 2. С. 179–183.
18. Maiorov S.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N. and Dosbolaev A.N. // Physics of Plasmas. 2008. Vol. 15. P. 093701.
19. Бохан П.А., Закревский Д.Э. // Журнал технической физики. 1997. Т. 67. № 4. С. 25-31.
20. Antipov S.N., Vasil'ev M.M., Maiorov S.A., Petrov O.F., Fortov V.E. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2011. Vol. 112. №. 3. pp. 482–493.
21. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2007. № 7. С. 44.
22. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. № 5. С. 15.
23. Maiorov S. A., Ramazanov T. S., Dzhumagulova K. N., Jumabekov A. N. and Dosbolaev A. N. // Phys. Plasm. 2008. Vol. 15. P. 093701.

Номер проекта РФФИ: 19-08-00611 А1, 19-08-00333 А2

Влияние рассеяния электронов на стационарные состояния релятивистского диода Пирса в режиме с отражением электронов от потенциального барьера

Герасименко А. Б.¹, Кузнецов В.И.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: gerasimenko.alexander@mail.ioffe.ru

Изучено влияние рассеяния электронов на тяжелых частицах фона на стационарные состояния диода Пирса – диода с моноэнергетическим потоком электронов, летящих через фон неподвижных ионов. Электроны считаются релятивистскими, но мы не учитываем процессы излучения. Столкновения электронов с фоновыми частицами учитываются упрощенно путем введения в уравнение движения силы трения, пропорциональной скорости частиц с коэффициентом, равным средней частоте столкновений. Аналогичная задача решалась ранее в [1] для случая, когда электроны движутся, не отражаясь от минимума потенциала. В данной работе изучается более сложный случай, когда электроны могут отражаться от потенциального барьера. Для учета отражений мы вводим, как и в [2], коэффициент отражения, равный отношению доли отраженных электронов к числу

эмитированных электронов. Математически мы решаем систему, состоящую из трех уравнений: уравнения неразрывности, релятивистского моментного уравнения для электронов и уравнения Пуассона с граничными условиями для концентрации и импульса электронов и потенциала. Изучается одномерный случай.

Результаты расчета представлены для релятивистского фактора, равного 2, и ряда значений средней частоты столкновений ν в виде пространственных зависимостей скоростей электронов и потенциала, а сами стационарные решения представлены точками на параметрической плоскости $\{\varepsilon_0, \delta\}$, где ε_0 – напряженность электрического поля на эмиттере, а δ – ширина межэлектродного зазора. Оказалось, что все решения, как и в случае нерелятивистского пучка электронов, можно отнести к одному из двух семейств: бурсиановскому (распределение потенциала имеет только один минимум) и небурсиановскому (распределение потенциала имеет несколько минимумов). Показано, что с ростом частоты столкновений область существования небурсиановских решений сужается, и при величине отношения ν к плазменной частоте порядка 0.1 этот класс решений исчезает. Таким образом, когда процессы излучения не учитываются, стационарные решения для релятивистского случая качественно похожи на решения для нерелятивистского случая [2]. Однако при больших величинах релятивистского фактора необходимо учитывать излучение, и у решений в релятивистском случае могут появиться отличительные особенности.

Список литературы

1. S. Pramanik and S. Ghosh. Nonlinear characteristics of relativistic Pierce diodes in stationary state. *Phys. Plasmas*, 26, 113503, 2019
2. V. I. Kuznetsov, A. B. Gerasimenko, S. Pramanik, and N. Chakrabarti. Effect of electron collisions on stationary solutions of plasma diodes in the case with electron reflection. *Phys. Plasmas*, 26, 123513, 2019

THz gas discharge in nitrogen as a source of ultraviolet radiation

Сидоров А. В.¹, Глявин М.Ю.¹, Лучинин А.Г.¹, Разин С.В.¹, Водопьянов А.В.¹

¹ИПФ РАН

e-mail: alvasid@inbox.ru

THz band lying between microwave one and infrared still remains the least studied from the point of view of gas discharge physics and its investigation, that became possible recently due to the creation of the powerful sources of THz radiation – gyrotrons and free-electron lasers [1-3], is in a great interest from the point of view of both fundamental and applied sciences.

One of the possible applications of THz gas discharge dense plasma – powerful source of radiation in different bands, mainly from EUV to UV. This work presents the results of investigation of THz gas discharge in inhomogeneous flow of nitrogen. As a source of sub-millimeter radiation we used 40 kW@670 GHz gyrotron created in IAP RAS [3].

It is shown that, despite the tendency of the discharge in electromagnetic wave beams to propagate towards the heating radiation from the breakdown region, in the case of a strongly inhomogeneous gas flow (nitrogen in our case), conditions can be created under which the discharge practically does not propagate and becomes point-like. The features of the glow of a THz discharge in a nitrogen flow in a wide range of background gas pressures are studied. The presence of a powerful afterglow in some bands of the second positive system of nitrogen at high

pressures was demonstrated. The prospects of using such a discharge as a source of UV radiation are discussed.

Список литературы

1. Bratman V L, Kalynov Yu K and Manuilov V N 2009 *Phys. Rev. Lett.* 102 245101.
2. Bolotin V P *et al* 2004 Status of the Novosibirsk free electron laser and first experiment with high power terahertz radiation *Proc. 1 Int. Conf. on Submillimeter Sci. and Tech. (Ahmedabad, India)* pp 1–8.
3. Glyavin M Yu, Luchinin A G, Nusinovich G S, Rodgers J, Kashyn D G, Romero-Talamas C A and Pu R 2012 *Appl. Phys. Lett.* 101 153503.

Квазипериодические колебания, возникающие при сверхзвуковом ламинарном обтекании установленного на пластине затупленного тела

Колесник Е.В.¹, Смирновский А.А.^{1,2}, Смирнов Е.М.¹

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kolesnik_ev@mail.ru

Необходимость проведения исследований структуры течения при обтекании сверхзвуковым потоком какой-либо конструкции, закреплённой на поверхности, возникает во многих практических задачах, например, авиакосмической отрасли. Подобные задачи встречаются, в частности, при конструировании таких элементов летательных аппаратов, как соединения фюзеляжа и крыла, хвостового оперения и других элементов. В этом случае наиболее важной характеристикой является интенсивность теплообмена в области перед обтекаемым телом. Результаты исследований показывают, что при натекании пограничного слоя на препятствие перед обтекаемым телом возникает обширная отрывная область с системой подковообразных вихрей, возникающие скачки уплотнения приводят к сложным эффектам вязко-невязкого взаимодействия. Течение в данной конфигурации характеризуется сильно неоднородным распределением теплового потока в области перед обтекаемым телом, значения которого могут в несколько раз превышать значения в невозмущённом пограничном слое. Стационарный ламинарный режим течения реализуется при относительно малых числах Рейнольдса. При увеличении числа Рейнольдса реализуется нестационарный режим течения, что может быть вызвано увеличением длины отрывной области. Отметим, что нестационарные эффекты могут приводить к еще большему локальному увеличению тепловой нагрузки. При больших числах Рейнольдса характер нестационарного течения может быть достаточно сложным [1], тогда как при умеренных числах Рейнольдса течение имеет квазипериодический характер [2].

В данной работе рассматривается модельная задача сверхзвукового обтекания удлиненного цилиндрического тела, установленного на пластине, вдоль которой развивается пограничный слой. Постановка задачи основана на [3], в которой рассмотрено течение при числе Маха 6.7 в диапазоне чисел Рейнольдса от $1.25 \cdot 10^4$, до $3.75 \cdot 10^4$. Численное моделирование (на сетках, содержащих до 25 миллионов ячеек), проведено для условий [3] при числе Рейнольдса $1.875 \cdot 10^4$, при котором реализуется ламинарный квазипериодический режим течения, характеризующийся небольшим набором частот. Дается анализ

мгновенных и осредненных полей течения, а также особенностей теплообмена в области перед обтекаемым телом. Расчеты выполнены с использованием конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого в ИПММ СПбПУ.

Список литературы

1. Clemens N.T., Narayanaswamy V. Low-Frequency Unsteadiness of Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interactions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2014. V. 46. № 1. P. 469–492.
2. Zhuang Y.Q., Lu X.Y. Quasi-periodic Aerodynamic Heating in Blunt-fin Induced Shock Wave/Boundary Layer Interaction // *Procedia Eng.* 2015. V. 126. P. 134–138.
3. Tutty O.R., Roberts G.T., Schuricht P.H. High-speed laminar flow past a fin-body junction // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 737. P. 19–55.

On plasma neutralization of the ion beam

Shalenov E.O., Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S.

IETP, Department of Physics, al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

e-mail: shalenov.erik@mail.ru

Currently, various installations for the acceleration of charged particles are one of the most important tools for the study of many fundamental and applied problems. For example, ion accelerators are used in thermonuclear fusion installations [1], they also are used to create and study so-called Warm Dense Matter (WDM) [2] and in many other important projects. In 2018 in Kazakhstan Innovative Nazarbayev University's Research Accelerator (INURA) [3] was launched. This accelerator was designed and created in collaboration with LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory, USA) and TPU (Tomsk Polytechnic University, Russia).

Ion accelerators are subject to general requirements, namely, the ion beam must be radially compressed to a small point. In order to create a short (\sim ns) pulse with an energy input sufficient for the intended purpose, it is necessary to split the initially long pulse from the ion beam injector into shorter ones and then compress them more strongly in both transverse and longitudinal (temporal) directions. The main problem here is the spatial charge of ion beams, which creates repulsive forces inside the beams, defocusing them, preventing the transportation. To avoid these problems the spatial charge must be neutralized.

The neutralization can be carried out by introducing free electrons into the positive ion beam. Significant neutralization can be obtained on the basis of the plasma neutralization, i.e. by the introducing of plasma sources in the transportation channel. The general conditions for this are as follows: the density of the generated plasma should significantly exceed the density of the ion beam, and the thermal energy of plasma electrons should be small compared with the value of the potential energy of the beam.

In recent years, computer simulation of both charged particle beams themselves and their interaction with plasma and targets has been developing. The interaction with a cold background plasma, whose density is much higher than the beam density, can be described in the framework of the theory of linear perturbations. Modeling using the PIC method showed that the electronic component is well described in the hydrodynamic approximation by the equations for the electron fluid: the continuity equation and the force balance equation.

In the present work, an attempt was made to simulate the process of free expansion of the ion bunch in INURA with plasma neutralization based on molecular dynamics method.

Список литературы

1. B. G. Logan, F. M. Bieniosek, C. M. Celata, J. Coleman, W. Greenway, E. Henestroza, J. W. Kwan, E. P. Lee, M. Leitner, P. K. Roy, P. A. Seidl, J.-L. Vay, W. L. Waldron, S. S. Yu, J. J. Barnard, R. H. Cohen, A. Friedman, D. P. Grote, M. Kireeff Covo, A. W. Molvik, S. M. Lund, W. R. Meier, W. Sharp, R. C. Davidson, P. C. Efthimion, E. P. Gilson, L. Gri-sham, I. D. Kaganovich, H. Qin, A. B. Sefkow, E. A. Startsev, D. Welch, and C. Olson, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 577, 1 (2007).
2. A.B. Sefkow, R.C. Davidson, E.P. Gilson, I.D. Kaganovich, A. Anders, J.E. Coleman, M. Leitner, S.M. Lidia, P.K. Roy, P.A. Seidl, W.L. Waldron, S.S. Yu, and D.R. Welch, Phys. Plasmas 16, 056701 (2009).
3. M. Kaikanov, K. Baigarin, A. Tikhonov, A. Urazbayev, J.W. Kwan, E. Henestroza, G. Remnev, B. Shubin, A. Stepanov, V. Shamanin, and W.L. Waldron, Journal of Physics:Conference Series 717, 012099 (2016).

Studies of terahertz discharge in noble gases using a Michelson interferometer

Бармашова Т.В.¹, A. Luchinin, A. Murzanev, A. Sidorov,
A. Stepanov, A. Veselov, A. Vodopyanov

¹ИПФ РАН

e-mail: tanyabarmashova@ipfran.ru

The studies of gas discharge sustained by the powerful radiation of the terahertz frequency range have been of benefit in fundamental and applied physics. The measurements of the spatial-time evolution of the discharge in noble gases (Ar, Kr) at a wide range of pressures were performed.

The gyrotron [1] was used for plasma ignition. The radiation was 40 kW with frequency of 0.67 THz. The pulse duration was 20 ns. A Michelson interferometer has been exploited for investigation of the discharge [2] in argon and krypton in a focused beam of terahertz waves. The diameter of the laser beam near the plasma cloud was 25 mm at $1/e^2$ level, $\lambda = 532$ nm. The rectangle area (about 20×15 mm) near the focus of the THz beam was examined synchronously by the interferometer and a CCD-camera.

The spatial-time evolution of laser beam phase-shift of THz discharge in Kr and Ar from atmospheric pressure down to a few torrs was obtained. The intensity of the discharge glow in the optical range correlates with the phase shift map. Previous measurements of plasma density made in Ar under a background gas pressure at a level of a few torrs, based on the Stark effect [3], are in good agreement with the gained results.

Список литературы

1. M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, G. S. Nusinovich, J. Rodgers, D. G. Kashyn, C. A. Romero-Talamas, and R. Pu, *Appl. Phys. Lett.* 101, 153503 (2012).
2. Plasma diagnostic edited by W. LOCHTE-HOLTGREVEN, (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1968) 928 pp.

3. Sidorov A V, Razin S V, Golubev S V, Safronova M I, Fokin A P, Luchinin A G, Vodopyanov A V and Glyavin M Yu, *Phys. Plasmas* 23, 043511(2016).

Logarithmic fluid models and sound propagation in superfluid helium

Zloshchastiev K. G.¹

¹Durban University of Technology, South Africa

e-mail: bozons@gmail.com

We begin by reviewing a large class of condensate-like strongly-interacting materials and many-body systems, which allows description in terms of a single macroscopic function. Recently proposed statistical mechanics arguments [1] and previously known Madelung hydrodynamical presentation [2] reveal that the logarithmic nonlinearity occurs in equations describing such matter. From the viewpoint of classical fluid mechanics, the resulting equations describe in the simplest case the irrotational and isothermal flow of a two-phase barotropic compressible inviscid fluid with internal capillarity and surface tension [3-5]. The applications of such models can be found in both classical and quantum physics. In the latter, logarithmic fluids can be used for describing strongly-interacting quantum fluids, including a superfluid component of He-4 [6-10].

More specifically, we are going to tackle the problem of sound propagation in liquid helium. Experimental data suggests that, at temperatures below 1 K, the pressure in liquid helium has a cubic dependence on density. Thus, the speed of sound scales as a cubic root of pressure. Near a critical pressure point, this speed approaches zero whereby the critical pressure is negative, thus indicating a cavitation instability regime. We demonstrate that to explain this dependence, one has to view liquid helium as a mixture of three quantum Bose liquids: dilute (Gross-Pitaevskii-type) Bose-Einstein condensate, Ginzburg-Sobyanin-type fluid, and logarithmic superfluid itself. Therefore, the dynamics of such a mixture is described by a quantum wave equation, which contains not only the polynomial (Gross-Pitaevskii and Ginzburg-Sobyanin) nonlinearities with respect to a condensate wavefunction, but also the logarithmic nonlinearity which is non-polynomial. We derive an equation of state and speed of sound in our model, and show their agreement with experiment [10].

Список литературы

1. K.G. Zloshchastiev, *Z. Naturforsch. A* 73, 619 (2018).
2. Y.A. Rylov, *J. Math. Phys.* 40, 256 (1999).
3. S. De Martino, M. Falanga, C. Godano and G. Lauro, *Europhys. Lett.* 63, 472 (2003).
4. K.G. Zloshchastiev, *Europhys. Lett.* 122, 39001 (2018).
5. K.G. Zloshchastiev, *J. Theor. Appl. Mech.* 57, 843 (2019).
6. A. Avdeenkov and K.G. Zloshchastiev, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 44, 195303 (2011).
7. K.G. Zloshchastiev, *Z. Naturforsch. A* 72, 677 (2017).
8. K.G. Zloshchastiev, *Eur. Phys. J. B* 85, 273 (2012).
9. K.G. Zloshchastiev, *Int. J. Mod. Phys. B* 33, 1950184 (2019).
10. T.C. Scott and K.G. Zloshchastiev, *Low Temp. Phys. B* 45, 1231 (2019).

Визуализация пространственной картины обтекания модели транспортного самолета с работающими воздушными винтами в аэродинамической трубе

Пигусов Е. А.¹, Крутов А.А.¹, Черноусов В.И.¹

¹ЦАГИ

e-mail: pigusoff@gmail.com

Визуализация течений является важным видом эксперимента в аэродинамике, позволяющая дополнить получаемые в аэродинамической трубе интегральные и распределенные характеристики [1]. В настоящей работе представлены результаты эксперимента по визуализации пространственной картины течения за крылом и фюзеляжем модели легкого конвертируемого самолета (ЛКС) с работающими воздушными винтами (ВВ) в аэродинамической трубе (АДТ) малых скоростей Т-102 ЦАГИ.

Легкий конвертируемый самолет предназначен для перевозки 50 пассажиров или 6 тонн груза на местных и региональных линиях с крейсерской скоростью 480 км/ч. Отличительной особенностью проекта является возможность использования ЛКС как для пассажирских, так и для грузовых перевозок без изменения типовой конструкции [2]. Аэродинамическая компоновка ЛКС выполнена по классической схеме со свободносущим высокорасположенным крылом с удлинением $l=9.68$, фюзеляжем с поперечным сечением в регулярной части в форме трапеции со скругленными углами и палубным хвостовым оперением.

Исследования проводились на модели ЛКС, изготовленной в масштабе 1:10 по отношению к натурным размерам самолета. Модель была оборудована тензометрированной силовой установкой для моделирования работы ВВ. Испытания модели проводились в крейсерской и взлетно-посадочной конфигурациях при скоростях потока в АДТ $V=19-36$ м/с, что соответствует значению числа Рейнольдса $Re=(0.37 - 0.7) \cdot 10^6$, вычисленному по средней аэродинамической хорде крыла.

Визуализация течения проведена с помощью лавсановых лент, закрепленных пучками на задних кромках закрылков (на расстоянии 170 мм от оси мотогондолы в обе стороны), нижней поверхности фюзеляжа, обтекатель шасси и в основании киля. Использование лавсановых лент в сочетании с нанесенной на фюзеляж модели контрольной линии также позволило экспериментально определить склоны потока за крылом при различных углах отклонения закрылков и режимах работы ВВ.

В результате анализа картины обтекания и сопоставления с ранее полученными интегральными характеристиками выявлены элементы модели, модификация которых позволит улучшить аэродинамическое совершенство ЛКС. Показано, что на эксплуатационных углах атаки за обтекателем шасси образуется вихревое течение, увеличивающее лобовое сопротивление и, по всей видимости, негативно влияющее на характеристики продольной устойчивости. На крейсерских углах атаки на уплощенной хвостовой части фюзеляжа образуются вихревые жгуты.

Таким образом, визуализация течения лавсановыми лентами является эффективным методом получения картины обтекания.

Список литературы

1. Ван-Дайк. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986 – 181 с.
2. Крутов А.А., Мельничук Ю.П., Петров А.В., Пигусов Е.А., Черноусов В.И. Совершенствование аэродинамической компоновки легкого конвертируемого

самолета // Материалы XXIX научно-технической конференции по аэродинамике, с. 143, 2018.

Бифуркации трансзвукового обтекания двойного клина

Кузьмин А. Г.¹

¹СПбГУ

e-mail: a.kuzmin@spbu.ru

Численные исследования 1990-х годов выявили бифуркации невязкого трансзвукового обтекания аэродинамических профилей, содержащих участки малой кривизны [1, 2]. Дальнейшие исследования невязких и турбулентных течений показали, что возникновение бифуркаций обусловлено взаимодействием местных сверхзвуковых зон, формирующихся около таких профилей [3-5]. В частности, в [4] было изучено обтекание простого профиля в виде симметричного двойного клина 7%-й толщины с прямоугольной вставкой и показана неединственность режимов течения в некотором интервале числа Маха набегающего потока при нулевом угле атаки. Неустойчивость взаимодействия местных сверхзвуковых зон была продемонстрирована также в задачах обтекания аэродинамических профилей при отклонениях элерона или спойлера от нейтрального положения. Аналогичные вопросы для стреловидных и прямых 3D крыльев изучались в [6, 7].

Аэродинамические профили с участками малой кривизны привлекают особое внимание исследователей в последние годы в связи с тем, что к ним приводят задачи оптимизации [8]. Однако физические причины возникновения бифуркаций и неустойчивости структуры течения остаются недостаточно изученными.

В данной работе проведено детальное исследование трансзвукового обтекания двойного клина невязким и турбулентным потоками. В отличие от [4] рассмотрен клин толщины 8%, для которого бифуркационный интервал по числу Маха набегающего потока M_∞ оказывается более широким. Решения нестационарных уравнений Эйлера и уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, получены на мелких расчетных сетках с помощью вычислительной программы второго порядка точности, основанной на методе конечных объемов. Полученные решения показывают, что в интервале $0.8355 \leq M_\infty \leq 0.8407$ может существовать до трех разных стационарных режимов невязкого обтекания клина. Реализация того или иного режима зависит от истории изменения M_∞ и угла атаки. На концах бифуркационного интервала наблюдаются резкие изменения конфигурации ударных волн. Установлены физические причины неустойчивости ударно-волновых структур при слиянии и дроблении местных сверхзвуковых зон.

Изучено трансзвуковое обтекание двух профилей с укороченной хвостовой частью. Бифуркационный интервал для них оказывается шире бифуркационного интервала исходного клина, что объясняется более сильным взаимодействием сверхзвуковых зон, расположенных на верхней и нижней сторонах профиля, через область ближнего следа.

Расчеты турбулентного течения также показывают наличие неединственных режимов обтекания двойного клина, при этом интервал неединственности незначительно смещается в сторону больших значений M_∞ . Кроме того, в турбулентном течении развиваются автоколебания, вызванные неустойчивостью отрыва пограничного слоя от поверхности клина (buffet onset).

Возможность резкой реструктуризации течения под действием малых возмущений должна учитываться при проектировании несущих аэродинамических поверхностей и органов управления, так как скачкообразные изменения давления на поверхности могут существенно повлиять на аэродинамические силы и устойчивость полета.

Работа выполнена с использованием ресурсов вычислительного центра СПбГУ (<http://cc.spbu.ru>) при финансовой поддержке РФФИ.

Список литературы

1. Jameson A., Airfoils admitting non-unique solutions of the Euler equations, AIAA Paper, no. 91-1625, 1–13, 1991.
2. Hafez M., Guo W., Some anomalies of numerical simulation of shock waves. Part I: inviscid flows, Computers and Fluids, Vol. 28, 701–719, 1999.
3. Kuzmin A., Instability and bifurcation of transonic flow over airfoils, AIAA Paper, no. 2005-4800, 1–8, 2005.
4. Кузьмин А. Г., Бифуркации течения при трансзвуковом обтекании простых профилей с эллиптической и клиновидной носовыми частями, Прикладная механика и техническая физика, том 51, 22–28, 2010.
5. Kuzmin A., Non-unique transonic flows over airfoils, Computers and Fluids, Vol. 63, 1–8, 2012.
6. Ryabinin A. N., Transonic flow past symmetrical unswept and swept wings with elliptic nose, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 10, no. 20, 9359–9363, 2015.
7. Kuzmin A., Sensitivity analysis of transonic flow over J-78 wings, Int. J. Aerospace Engineering, Vol. 2015, Article ID 579343, 1–6, 2015.
8. Destarac D., Carrier G., Anderson G. R., Nadarajah S., Poole D. J., Vassberg J. C., Zingg D. W., Example of a pitfall in aerodynamic shape optimization, AIAA Journal, Vol. 56, no. 4, 1532–1540, 2018.

Номер проекта РФФИ: 19-01-00242

Экспериментальные исследования спектральных характеристик свободного тлеющего разряда в диапазоне длин волн 340–440 нм

Безверхний Н. О.¹, Монахов Н.А.¹, Петренко М.В.¹, Лапушкина Т.А.¹, Сахаров В.А.¹, Поняев С.А.¹, Бобашев С.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nikolaybezverhny@gmail.com

Низкотемпературная плазма находит широкие применения в электротехнике, энергетике, плазмохимии и других областях науки и техники, что обуславливает большое количество исследований [1]. Исследуются возможности применения электрических разрядов для модификации сверхзвуковых течений, в частности, интерес представляют особенности взаимодействия ударных волн с электродными разрядами [2]. Одним из основных методов диагностики плазмы является оптическая эмиссионная спектроскопия в видимой

области спектра, позволяющая получить информацию о составе плазмы, температурах и концентрациях различных компонент неравновесной плазмы [3-5].

В работе исследовался тлеющий разряд постоянного тока, не ограниченный стенками. Разряд создавался в цилиндрической камере диаметром 300 мм и высотой 400 мм между двумя коническими электродами, расположенными вертикально на расстоянии 100 мм. В качестве плазмообразующей среды использовался воздух при давлении 5.3 кПа. Источник питания обеспечивал постоянный ток разряда ~ 1 А при напряжении на электродах ~ 700 В. Газовый разряд имел форму тела вращения с увеличивающимся к катоду сечением, при этом диаметр сечения видимой части разряда не превышал $1/3$ диаметра рабочей камеры.

Спектроскопия газового разряда проводилась с помощью спектрометра, состоящего из монохроматора, построенного по схеме Сейя–Намиока, и приемника излучения – ПЗС-линейки. Тороидальная дифракционная решетка, содержащая 600 штрихов на 1 мм, обеспечивает обратную линейную дисперсию 3.8 нм/мм. За одно измерение ПЗС-линейкой регистрируется участок спектра шириной $\Delta\lambda \approx 100$ нм, что обеспечивает спектральное разрешение ~ 0.03 нм. Калибровка спектрометра по длинам волн производилась с помощью ртутной лампы ПРК по линиям Hg I из базы данных NIST Atomic Spectra Database [6]. Калибровка спектральной чувствительности оптической системы осуществлялась с помощью ленточной вольфрамовой лампы с известной цветовой температурой.

Наблюдаемая неоднородность свечения разряда указывает на неоднородность параметров плазмы. Были получены спектры приэлектродных областей и центрального столба тлеющего разряда. Сравнительный анализ спектров показал, что в приэлектродных областях разряда относительная интенсивность полос $N2(1-)/N2(2+)$ выше, чем в области положительного столба, что обусловлено увеличением степени ионизации газа вблизи электродов. По относительным интенсивностям молекулярных полос $N2(1-)(0-0)$ (кант 391.4 нм), $N2(1-)(0-1)$ (кант 427.8 нм), $N2(2+)(0-2)$ (кант 380.4 нм) с неразрешенной вращательной структурой были проведены оценки вращательной и колебательной температур. Показано, что вращательная температура молекул азота существенно ниже, чем колебательная.

Список литературы

1. Adamovich, I., Baalrud S. D., Bogaerts A. et al. The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, V. 50, 323001, 2017
2. Baryshnikov A. S., Basargin I. V., Bezverkhni N. O. et al. Interaction of a Shock Wave with a Cathode of Free Glow Discharge, *AIAA Journal*, V.56, №9, 3782-3784, 2018
3. Lebedev Yu. A., Solomakhin P. V., Shakhmatov V. A.. Electrode microwave discharge in nitrogen: Structure and gas temperature, *Plasma Physics Reports*, V. 33, № 2, 157–166, 2007
4. Ruiz-Camacho J. and Castell R. Rotational temperature determination in a nitrogen plasma torch by molecular spectroscopy, *Phys. Scr.*, V. T130, 014016, 2008
5. Zhu X.-M. and Pu Y.-K. Optical emission spectroscopy in low-temperature plasmas containing argon and nitrogen: determination of the electron temperature and density by the line-ratio method, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, V.43, 403001, 2010
6. NIST Atomic Spectra Database // <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>

Особенности развития ионизационной неустойчивости разного масштаба в газовом разряде воздуха

Лапушкина Т. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: tanyusha@mail.ioffe.ru

В работе экспериментально изучается воздушный газовый разряд постоянного напряжения, организованный в неограниченной боковыми стенками камере, что приводит к стратификации области разряда вследствие развития ионизационной неустойчивости [1]. Ионизационная неустойчивость развивается вследствие флуктуационного превышения скорости ионизации над скоростью рекомбинации в некоторой области разряда, что приводит к раскачке процесса ионизации и образованию ионизационных волн (страт), стоячих илидвигающихся от катода к аноду. Страты – области с повышенной концентрацией и температурой электронов. В большинстве исследовательских работ стратификация разряда наблюдается в инертных газах, что вызывает повышенный интерес к задаче данной работы, как возможности структурировать воздушную среду, в том числе воздушные потоки. В зависимости от условий разряда (давления и величины газоразрядного тока) масштаб ионизационных страт меняется, что приводит к слоистой структуре плазменной среды и возможности создать слои разной толщины, где различаются не только электронная, но и газовая температура. В работе получены различные виды разряда от крупномасштабно структурированных (3-5 страт на длину разряда), до мелкомасштабных (20-25 страт на длину разряда) и исследованы условия их возникновения и развития. Основными параметрами диагностики являются давление газа, величина газоразрядного тока, меняемая изменением нагрузочного сопротивления, размер и частота следования ионизационных волн, оценка электронной и газовой температур в разных точках разряда. Так же исследуется влияние пространственного ограничения разряда на условия его стратификации. Результаты исследований могут быть использованы для температурного структурирования среды, в том числе среды распространения ударных волн с целью изменения их формы и интенсивности, перемешивания потоков в камерах сгорания, а так же структурирования кинетической энергии сверхзвуковых потоков путем ее перекачки в отдельные области.

Список литературы

1. Райзер Ю.П., *Физика газового разряда*, Наука, Москва, 1987, 592с.

Номер проекта РФФИ: №15-01-04635а

Перспективы ионно-циклотронного нагрева ионов в плазме (^3He)-D-H токамака Глобус-М2

Корепанов П. А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: p.corepanov2013@yandex.ru

В работе, с помощью численных методов [1], исследуется трехионный сценарий ионно-циклотронного нагрева на установке Глобус-М2 с увеличенным тороидальным магнитным полем. Трехионный сценарий нагрева [2] на установках УТС представляет собой перспективный сценарий дополнительного нагрева в водородно-дейтериевой плазме с небольшим, порядка долей процента, содержания гелия-3. Основной компонентой, поглощающей вкладываемую мощность, является гелий-3. Вся высокочастотная мощность в данном сценарии поглощается на ионах компоненты, составляющей менее 1% от общего состава плазмы, что приводит к появлению малочисленной, но высокоэнергетичной (≈ 1 МэВ) группы частиц. Это позволяет рассматривать данный сценарий, также как хороший инструмент для генерации и исследования удержания высокоэнергетичных ионов в токамаке Глобус-М2.

Выполнен подбор нескольких возможных резонансных частот. В зависимости от выбора частоты может быть определено местоположение генерируемого пучка по малому радиусу токамака. Кроме того, выявлено ограничение по частоте, связанное с расположением третьей гармоники водорода вблизи излучающей антенны, негативно влияющим на согласование антенны.

Проведено сравнение генерируемых пространственных спектров антенны и анализ поглощаемой мощности для однопетлевой и двухпетлевой антенн при различной фазировке подводимой высокочастотной мощности.

Исследовано влияние профиля концентрации вдоль малого радиуса на согласование антенны с плазмой, генерируемый пространственный спектр и поглощение высокочастотной мощности. Профили концентрации строились по экспериментальным данным разрядов токамаков Глобус-М2 и Глобус-М. Два типа профиля концентрации рассматривались: соответствующие H-моду и L-моду. Проведена оценка возникающего рассогласования ионно-циклотронной антенны с плазмой при возникновении перехода в H-моду.

Список литературы

1. O.N. Shcherbinin, F.V. Chernyshev, V.V. Dyachenko, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov and V.M. Leonov, «Numerical modelling and experimental study of ICR heating in the spherical tokamak Globus-M», 2006 Nuclear Fusion 46, 592-597.
2. Ye.O. Kazakov, D. Van Eester, R. Dumont and J. Ongena, «On resonant ICRF absorption in three-ion component plasmas: a new promising tool for fast ion generation», 2015 Nuclear Fusion 55, 032001.

Наблюдение параметрических неустойчивостей в экспериментах по генерации тока на сферическом токамаке Глобус-М2

Коновалов А. Н.¹, Дьяченко В. В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: konovalov.al@mail.ioffe.ru

В данной работе представлены первые наблюдения параметрических неустойчивостей в экспериментах по генерации тока нижегибридными волнами на токамаке Глобус-М2.

Формирование плазмы с последующим созданием и подъемом тока без участия индукционного вихревого электрического поля всегда представляло важную задачу для термоядерных установок типа токамак. Использование данного процесса позволило бы со временем отказаться от центрального соленоида, перейдя к установкам стационарного типа. Эксперименты по нижегибридному получению плазмы и подъема тока были проведены на токамаке Глобус-М [1, 2].

Эксперименты по генерации тока нижегибридными волнами были начаты на токамаке Глобус-М с полоидальным возбуждением волны [3] и продолжены на токамаке Глобус-М2 с тороидальным возбуждением [4]. Частота генератора составляла 2.45 ГГц при вводимой мощности до 150 кВт и длительности импульса до 30 мс. Для возбуждения волн в плазме использовалась сфазированная антенна-«грилл», состоящая из 10 волноводов, соединенных широкими сторонами в направлении тороидального магнитного поля. Фазовый сдвиг между волноводами позволяет возбуждать волну необходимых для генерации тока параметров [5].

Анализ спектра высокочастотного излучения из плазмы обнаруживает появление большого количества низкочастотных колебаний, возбуждаемых волной накачки. Такие спектры характерны в случае развития в плазме нелинейных параметрических неустойчивостей. Параметрические распадные неустойчивости (ПРН) могут приводить к перераспределению вводимой в плазму ВЧ мощности между «дочерними» волнами на частотах, отличных от частоты волны накачки, к аномальному отражению и даже к существенному изменению механизма взаимодействия волны накачки с плазмой. Поэтому, наблюдение и анализ ПРН является крайне важным для понимания процессов, происходящих при дополнительном нагреве и генерации безындукционного тока на токамаках, и их оптимизации.

Наблюдения параметрических неустойчивостей производились с помощью высокочастотного штырьевго зонда и широкополосного (до 8 ГГц) цифрового 4-х канального осциллографа Keysight MSOS804A. Наблюдалось уширение пика спектра, соответствующего частоте накачки, в «красную» сторону. Определена связь ПРН с параметрами разряда.

Список литературы

1. Dyachenko V V et al 2013 *Plasma Phys. Rep.* 39 3
2. Konovalov A N et al 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1400 7
3. Dyachenko V V et al 2015 *Nucl. Fusion* 55 11
4. Bakharev N N et al 2019 *AIP Conf. Proc.* 2179 1
5. Gusakov E Z et al 2010 *Plasma Phys. Control. Fusion* 52 7

Численное моделирование течения моно- и полидисперсной пузырьковой среды в трехмерной колонне под действием силы тяжести в рамках эйлера-эйлеровского подхода

Чернышев А. С.¹, Шмидт А.А.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: alexander.tchernyshev@mail.ioffe.ru

В работе представлено сравнение результатов численного моделирования трехмерного течения моно- и полидисперсных сред в пузырьковом реакторе колонного типа. Мотивацией этих исследований является широкое распространение пузырьковых течений в природе и промышленных установках, при этом полидисперсность среды играет значительную роль в формировании структуры течения [1]. В частности, при проектировании химических газожидкостных реакторов одним из важнейших вопросов является анализ эволюции распределения пузырьков в потоке, а следовательно, и эволюции межфазной поверхности, которая во многом определяет интенсивность протекающей на ней химических процессов. Кроме того, сравнение структур моно- и полидисперсных течений позволит определить границы применимости допущений о характере распределения пузырьков по размерам.

Численное моделирование использовалось в силу гибкости и эффективности этого метода для исследования сложных нестационарных многомерных неравновесных течений. Такой подход обеспечивает детальную информацию об исследуемом процессе, что не всегда бывает доступно при использовании экспериментальных методик.

В основе используемой математической модели лежит эйлера-эйлеровское описание [2], в рамках которого каждая среда рассматривается как континуум, это позволяет для всех фаз использовать уравнения Навье-Стокса, дополненные слагаемыми, учитывающими межфазный массообмен и силовое взаимодействие. Турбулентность потока описывается в рамках $k-\omega$ SST модели Ментера [3] с дополнительными слагаемыми, включающими в себя генерацию и диссипацию турбулентности дисперсной фазой. Кроме того, учитывается траекторная дисперсия пузырей из-за турбулентных пульсаций несущей среды. Полидисперсность пузырьковой среды описывается в рамках гетерогенной многоклассовой модели MUltiple SIze Group (MUSIG) [4].

Моделирование пузырькового течения проведено в вертикальной колонне, имеющей квадратное сечение. Колонна заполнена водой, пузыри, заполненные воздухом, поступают в колонну через вмонтированный в дно аэратор, формирование структуры течения происходит за счет всплытия пузырей в поле силы тяжести.

Получена структура течения пузырьковой среды под действием силы тяжести, проанализированы распределения объемной доли дисперсной фазы и плотности межфазной поверхности в различных сечениях колонны для монодисперсного и полидисперсного случаев. Проведен анализ зон рециркуляции потока, которые возникают в колонне, их размеров и скорости рециркуляции.

Полученные результаты сравнивались с имеющимися экспериментальными данными [5].

Список литературы

1. A. S. Chernyshev and A. A. Schmidt, Journal of Physics: Conf. Series 899, 032009 (2017)
2. A. S. Chernyshev and A. A. Schmidt, Technical Physics Letters 39(6), 548–551 (2013)
3. F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, Turbulence, heat and mass transfer 4, 625–632 (2003)

4. E. Krepper, D. Lucas, T. Frank, H.-M. Prasser, P. J. Zwart, Nuclear Engineering and Design 238, 1690–1702 (2008)
5. Y.M. Lau, I. Roghair, N.G. Deen, M. van Sint Annaland, J.A.M. Kuipers, Chem. Eng. Sci. 66, 3309–3316 (2011)

Разработка оптической диагностики быстрых ионов на токамаке ТУМАН-3М

Блехштейн М.Д.^{1,2}, Аскинази Л.Г.¹, Жубр Н.А.¹, Корнев В.А.¹, Лебедев С.В.¹, Разуменко Д.В.¹, Резниченко П.В.¹, Смирнов А.И.¹, Тукачинский А.С.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПБПУ

e-mail: bleh.maks@gmail.com

В современных токамаках существует несколько источников Быстрых Ионов (БИ): инжекция пучка нейтральных атомов, ионно-циклотронный нагрев, реакция синтеза и др. БИ оказывают значительное влияние на состояние плазмы и протекающие в ней процессы, поэтому необходимо знать их функцию распределения. В токамаке с инжекционным нагревом информация о функции распределения БИ необходима для оценки эффективности нагрева плазмы, генерации нейтронного излучения, а также может открыть пути подавления нежелательных последствий присутствия БИ в плазме.

Существует несколько методик изучения свойств БИ: детектор потерь БИ, анализатор нейтральных частиц, FIDA (fast-ion D α) и др. Данная работа посвящена оптимизации параметров FIDA на токамаке ТУМАН-3М и получению экспериментальных данных с помощью диагностики излучения линии D α от перезарядки быстрых ионов на пучке нейтральных атомов. Тестовая конфигурация диагностики БИ содержит одну перестраиваемую линию наблюдения, лежащую в экваториальной плоскости установки.

FIDA анализирует излучение сдвинутой Бальмеровской линии α в диапазоне 645 – 665 нм. Она является методикой оптической спектроскопии атомов перезарядки, но применяется к БИ. В результате перезарядки с нейтральными атомами БИ захватывают электроны в возбужденное состояние. Затем возбуждение снимается с излучением линии Бальмера α за короткое время ($\lambda_0 = 656.102$ нм – D $_2$, из n=3 в n=2). Данное излучение удобно, так как оно находится в видимом диапазоне, что позволяет применять обычные оптические элементы, и имеет высокую интенсивность.

Такая диагностика позволяет производить измерения параметров пучка БИ с хорошей локализацией, так как излучение от БИ испускается только из области инжекции за короткое время и размеры области перекрытия линии наблюдения и линии инжекции малы по сравнению с масштабами пучка нейтральных атомов. Только в области инжекции существует достаточно нейтральных частиц и БИ для создания заметного активного сигнала. Форма спектральной линии содержит информацию о функции распределения БИ. Она определяется доплеровским сдвигом, который зависит от проекции вектора скорости БИ на линию наблюдения. Интенсивность излучения FIDA определяется плотностью нейтрализованных БИ в состоянии n = 3.

В ходе данной работы разработан программный модуль, позволяющий проводить моделирование спектра регистрируемого излучения с помощью пакета FIDASIM, основываясь на выходных данных кодов ASTRA и NUBEAM, необходимых для расчета профилей

параметров фоновой плазмы и функции распределения, инжектированных БИ. Пакет FIDASIM используется для проведения моделирования сигнала диагностики FIDA методом Монте-Карло и изучения различных свойств сигнала, в том числе для определения оптимальных параметров оптического тракта для условий эксперимента на токамаке ТУ-МАН-3М. Моделирование показало необходимость внесения корректировок в положение линии наблюдения относительно линии инжекции пучка нейтральных атомов. После проведения необходимых работ был получен активный сигнал, соответствующий излучению линии D_α быстрыми ионами. Такая методика позволяет анализировать эффективность нагрева плазмы и генерации нейтронного излучения вследствие присутствия БИ в плазме.

После наработки некоторого количества данных и их параметризации данная диагностика позволит приступить к разработке связи функции распределения БИ с получаемым сигналом.

Список литературы

1. В. Geiger; Fast-ion transport studies using FIDA spectroscopy at the ASDEX Upgrade tokamak; PhD thesis, LMU Munich (2012)

Области стабильности плазменных микронеустойчивостей в сферических токамаках Глобус-М/М2

Киселев Е. О.¹, Патров М. И., Курскиев Г. С., Гусев В. К., Тельнова А. Ю., Яшин А. Ю.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nightkeo@gmail.com

Данная работа посвящена исследованию микронеустойчивостей (неустойчивостей масштаба ионного Ларморовского радиуса) в центральной области плазмы компактного сферического токамака Глобус-М2 [1] который является модернизированной версией токамака Глобус-М [2]. Большой радиус камеры Глобус-М2 $R = 0.36$ м и малый радиус $a = 0.24$ м (аспектное отношение $A=1.5$). Модернизация позволила увеличить ток плазмы I_p до 0,4 МА и тороидальное магнитное поле $B_T=0,8$ Тл. Условия в плазме сферических токамаков (NSTX [3], MAST [4], Глобус-М [5]) вследствие работы при высоком значении параметра бэта благоприятны для развития электромагнитных неустойчивостей, таких как, например, микротиринговая неустойчивость или кинетическая баллонная мода, сильно влияющая на эффективность термоизоляции плазмы. Например, сильная зависимость времени удержания энергии от столкновительности на токамаках NSTX, MAST и Глобус-М, объясняется именно развитием MTM неустойчивости.

В работе приводятся результаты линейного giroкинетического моделирования кодом GENE [6]. В качестве входных параметров использовались градиенты концентрации и температуры плазмы, электронное бэта, столкновительность и конфигурация магнитного поля. Последнему было уделено особое внимание. Для этого искалось самосогласованное решение уравнения Грэда-Шафранова и уравнения диффузии полоидального магнитного потока с помощью кодов ASTRA 7.0 и SPIDER. В качестве граничного условия задавалось положение последней замкнутой магнитной поверхности, полученной методом токовых колец на основании измерений сигналов с магнитных петель.

Приводятся результаты анализа изменения локальных параметров плазмы токамака Глобус-М2 для широкого диапазона плазменного бэта, столкновительности,

коэффициента запаса устойчивости, шира магнитного поля, а также результаты расчета инкрементов микронеустойчивостей и их идентификация. Определены области стабильности для МТМ, ИТГ, ТЕМ и ЕТГ моды.

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.scc.spbstu.ru).

Список литературы

1. Minaev V.B. et al, 2017, Nucl. Fusion, 57 066047;
2. Gusev V.K. et al, 1999, Tech. Phys. 44 1054;
3. Kaye S M et al 2013 Nucl. Fusion 53 063005
4. Valovic M et al 2009 Nucl. Fusion 49 075016
5. Kiselev E O et al 2019 JPCC will be published
6. T. Dannert and F. Jenko, Phys. Plasmas 12, 072309 – 2005.
7. GENE Development Team 2019 The Gyrokinetic Plasma Turbulence Code GENE: User Manual

Контроль плотности плазмы при помощи дисперсионного интерферометра на сферическом токамаке Глобус-М2

Шулятьев К. Д.¹, Соломахин А.Л.², Гринемайер К.А.², Минаев В.Б.¹, Щеголев П.Б.¹, Гусев В.К.¹, Коваленко Ю.В.², Петров Ю.В.¹, Савкин В.Я.², Сахаров Н.В.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

e-mail: shulyatiev.kd@mail.ioffe.ru

В настоящее время, после физического запуска в ФТИ им. А. Ф. Иоффе сферического токамака нового поколения Глобус-М2 в 2018 году [1], продолжают работы по поэтапному выводу установки на проектные параметры: тороидальное магнитное поле на оси 1 Тл и ток плазмы 0,5 МА [2, 3]. Поскольку в режимах с безындукционным поддержанием тока плазмы, планируется увеличить длительность разряда до 0.7 с, а результаты моделирования предсказывают, что в новых условиях эксперимента существенно увеличится и рабочий диапазон по плотности плазмы [4], возникла необходимость во введении в диагностический комплекс установки нового анализатора плотности плазмы — дисперсионного интерферометра.

Это двухчастотный дисперсионный интерферометр на основе СО₂ лазера, разработанный в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Выбор в пользу именно этого интерферометра был сделан в связи с тем, что новый прибор, в отличие от имеющегося СВЧ-интерферометра, работающего на длине волны 0.8 мм, практически не подвержен влиянию рефракции зондирующего луча в режимах с высокой плотностью плазмы. Это преимущество достигается благодаря выбору оптимальной длины волны зондирующего излучения, инновационной оптической схеме и автоматизированной системе регистрации и обработки данных. Поскольку лучи обеих длин волн проходят по одному и тому же пути, дисперсионный интерферометр является устойчивым к вибрациям установки прибором.

В 2019 году была завершена основная работа по интеграции дисперсионного интерферометра в состав диагностического комплекса токамака и получены первые результаты

измерений в эксперименте. Кроме того, были выявлены и устранены основные недостатки в первоначальном устройстве прибора и выбран оптимальный режим его работы. Схема ввода зондирующего луча интерферометра в экваториальном сечении токамака идентична схеме зондирования диагностики Томсоновского рассеяния. Это обстоятельство позволяет проводить прямое сравнение результатов измерений двух диагностик. В дальнейшие планы входит работа по включению дисперсионного интерферометра в контур управления плотностью плазмы токамака.

Эксперименты выполнены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021). Измерения параметров плазменного разряда выполнены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. N.N. Bakharev, G.I. Abdullina, V.I. Afanasyev, et al. // Nucl. Fusion 59 (2019) #112022
2. V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, et al. // Nucl. Fusion 57 (2017) #066047
3. V.B. Minaev, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, et al. // Proc. 46th EPS Conf. on Plasma Physics, Milan, 2019 ECA 43C P4-1084
4. V.K. Gusev, E.A. Azizov, A.B. Alekseev, et al. // Nucl. Fusion 53 (2013) #093013

Кластерная гипотеза стратификации в канале чёточной молнии

Твердохлебов К. В.¹, Поняев С. А., Бобашев С. В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: k_venom@mail.ru

Чёточная молния является редкой разновидностью разряда молнии, при котором разрядный канал приобретает вид последовательности отдельных светящихся образований, разделенных темными промежутками, расположенных хаотически или периодически. Это делает ее похожей на нитку с бусинами.

В данной работе приводится гипотеза, объясняющая возникновение стратификации в разрядном канале линейной молнии, что приводит к формированию чёточной молнии. Приводится эксперимент, показывающий повышенную склонность к стратификации контрагированных и диффузных разрядных шнуров в кластерной плазме при различных условиях.

В эксперименте для возбуждения разряды использовался генератор переменного электромагнитного поля частотой 600 кГц и мощностью 45 Вт. С его помощью в стеклянных сосудах с регулируемой атмосферой возбуждался емкостной безэлектродный разряд. Кластерная плазма получалась путем добавки в используемую газовую смесь веществ, склонных к полимеризации и/или изомеризации. Проще всего эффект наблюдался при использовании нафталина в качестве добавки.

Стратификация в контрагированных разрядных шнурах, спонтанная контракция разряда и возникновение неустойчивостей наблюдались в инертных газах от неона (10^3 - 10^5 Па), до ксенона ($5 - 10^5$ Па), а также в разреженных воздухе и чистом азоте. Видеосъемка на выдержках 62-125 мкс показала визуальное сходство возникающих разрядов с доступными фотографиями природных чёточных молний. Поскольку при электрических

разрядах в парах воды также может возникать кластерная плазма, данная гипотеза объясняет стратификацию в канале линейной молнии через образование кластерной плазмы в воздухе с наличием паров воды и прочих естественных примесей.

Список литературы

1. Barry J.D. *Ball Lightning and Bead Lightning*. N.-Y.: Plenum Press, 1980 164—171;
2. Тумакаев Г. К. О природе четочной молнии, ЖТФ, 65(7):52-59, 1995;
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный, 2007. 736 с.;
4. Newsome, G.A., Ackerman, L.K. & Johnson, K.J. Humidity Effects on Fragmentation in Plasma-Based Ambient Ionization Sources. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 27, 135–143 (2016). <https://doi.org/10.1007/s13361-015-1259-y>;
5. A Tavant, and M A Lieberman. «Hybrid global model of water cluster ions in atmospheric pressure Ar/ H₂O RF capacitive discharges» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 49, no. 46, 2016. doi:10.1088/0022-3727/49/46/465201

Экспериментальное исследование влияния фронта ударной волны на проницаемый материал

Масюкевич А. В.¹, Булович С. В.²

¹ФТИ им. А. Ф. Иоффе

²СПБПУ

e-mail: 79313165906@yandex.ru

При рассмотрении нестационарных процессов в виде ударных волн или импульсных струй одним из важных прикладных аспектов является определение аэродинамических нагрузок на поверхность. Сложность рассматриваемой задачи возрастает многократно при допущении о газопроницаемости рассматриваемой преграды, так в работах [1, 2] в пористом слое изучаются изменение давления как отдельно газа, так и давление в смеси газ – частицы. Показано, что амплитуда давления проходящей волны зависит от ряда параметров, передающих различные свойства пористого слоя: протяженность, диаметр и форма элементов, теплофизические характеристики материала (плотность, теплоемкость и т.п.), возможность уплотнения элементов структуры.

Предметом настоящего исследования является взаимодействие ударной волны со слоем сыпучего (гранулированного) материала в двух постановках: с неразрушаемым и разрушаемым каркасом. Для обоих вариантов получены и проанализированы волновые структуры, которые возникают как перед пористым слоем гранулированных частиц, так и в зазоре между слоем и торцевой стенкой ударной трубы.

Эксперименты проводились в атмосферной ударной трубе диаметром 55 мм, расположенной горизонтально. Для контроля однородности рассматриваемых процессов в окружном направлении были расположены два датчика в одном и том же сечении трубы. Для создания пористого слоя использовались частицы полиуретана правильной сферической формы. Плотность материала 1200 кг/м³. Размер частиц не был унифицирован и лежал в диапазоне от 2 до 3 мм. Толщина гранулированного слоя составляла 30 мм. Для рассматриваемой серии экспериментов в ударной трубе гранулированный слой располагался между датчиками. Число Маха ударной волны имело значение равное 1,7.

Были получены следующие результаты:

1) Для случая неподвижного пористого слоя, фиксируется рост давления в полости между торцом ударной трубы и пористым слоем, который имеет ступенчатый характер нарастания, связанный с многократным отражением прошедшей ударной волны.

2) В случае подвижного гранулированного слоя темп изменения давления в полости увеличивается в два раза. Связано это с двумя причинами. Во-первых, за счет увеличения проницаемости гранулированного слоя большее количество газа поступает в полость. Во-вторых, сам размер полости уменьшается из-за смещения облака частиц в направлении торца трубы.

Таким образом в работе экспериментально показаны эффекты, связанные с изменением волновой структуры при прохождении фронта ударной волны через пористый слой.

Список литературы

1. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers // Vol. 22, 1997, pp.432-443
2. X. Rogue, G. Rodriguez, J. Haas, R. Saurel. Experimental and numerical investigation of the shock-induced fluidization of a particles bed Shock Waves, 8 (1998), pp. 29-45.

Номер проекта РФФИ: 12-08-01050

Измерение параметров периферийной плазмы токамака ФТ-2 и сравнение результатов с giroкинетической моделью

Каледина О. А.¹, Шаталин С.В.², Есипов Л.А.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kaledinaoa@gmail.com

Периферийная плазма и протекающие в ней процессы имеют особое значение для установок термоядерного синтеза [1]. В пристеночный слой поступает энергия из объема удержания, определяя взаимодействие плазма-поверхность, которое, в свою очередь, определяет поступление примесей. С колебаниями параметров плазмы (плотности, электронной температуры, потенциала) связан существенно аномальный поперечный перенос в приграничном слое (флуктуационные потоки частиц и энергии). Периферийные процессы оказывают влияние на формирования граничных транспортных барьеров и переход в режимы улучшенного удержания.

Вычислительная физика стала незаменимым инструментом в исследованиях синтеза, поскольку эксперименты стоят дорого, подготовка занимает много времени, а измерения некоторых важных явлений и величин затруднены. Для создания адекватной модели необходима, тем не менее, проверка соответствия данных, получаемых в процессе машинной имитации, реальному ходу явлений.

Целью данной работы являлось получение экспериментальных данных о параметрах пристеночной плазмы токамака ФТ-2 (ФТИ им. Иоффе) и сравнение измеренных значений с результатами моделирования giroкинетическим кодом ELMFIRE [2]. Код разработан Научной школой Университета Аалто совместно с Центром технических исследований VTT Финляндии для исследований транспортных явлений в токамаке. Код создавался в сотрудничестве с группой токамака ФТ-2, параметры которого, в частности –

сравнительно небольшие размеры (большой радиус $R_0 = 0.55$ м, радиус полоидальной диафрагмы $a = 0.078$ м) и высокий уровень флуктуаций, хорошо подходят для моделирования.

Измерения выполнялись с помощью подвижных пятиэлектродных ленгмюровских зондов. Применяемая на установке ФТ-2 методика зондовых измерений [3] позволяет определять временную эволюцию локальных значений потенциала плазмы, плотности и температуры электронов, а также двумерную плотность потока частиц, связанного с дрейфом в скрещенных полоидальном электрическом и тороидальном магнитном полях. Исследовался омический разряд в водороде при следующих значениях основных параметров: тороидальное магнитное поле $B_T = 22$ кГс, ток по плазме $I_p = 22$ кА, длительность стационарной фазы разряда $\Delta t = 40$ мс. Эти параметры близки к входным данным расчетов ELMFIRE [4].

Сравнение измеренных значений параметров плазмы с результатами гирокинетического моделирования [5] показало хорошее совпадение значений электронной температуры, в то время как величина плотности заряженных частиц превышала расчетную примерно в 1.5 раза.

Расхождение результатов измерений с данными модельных расчетов может быть связано со следующими обстоятельствами. Во-первых, в описываемых экспериментах профили T_e и n в основном объеме удержания не вполне соответствуют входным данным расчетов. Во-вторых, расположение лимитеров, заложенное в модель, отличается от реального. Были выявлены, также, недостатки в достоверном воспроизведении экспериментального равновесия, что требует уточнений модели источников и стоков, таких как рециклинг и перезарядка.

Экспериментальные данные и расчеты моделирования гирокинетическим кодом ELMFIRE достаточно хорошо соотносятся между собой, что подтверждает правильность модели. Таким образом, гирокинетический код ELMFIRE может служить источником сведений, экспериментальное получение которых затруднено.

Список литературы

1. P.C.Stangeby. Workshop of IAEA/TCM on Divertor Concepts. Provence, 2001.
2. J.A. Heikkinen, S.J. Janhunen, T.P. Kiviniemi et al. Journal of Computational Phys. 227, 5582, 2008.
3. Левицкий А.Н., Сахаров И.Е., Шаталин С.В. ПТЭ. 1992. №5. С.153.
4. L.Chone, A.D.Gurchenko, E.Z.Gusakov et al. 45th EPS Conf. on Pl. Physics, P2.1029, Praga. – 2018.
5. L.Chone, A.Altukhov, L.Esipov et al. 46th EPS Conf. on Plasma Physics, P1.1032, Milan. – 2019.

Применение гибридного метода на основе волнового уравнения для расчета аэроакустического шума при низких числах Маха

Гусева Е. К.¹, Егоров Ю.²

¹СПбПУ

²ANSYS Germany GmbH

e-mail: katia.guseva@inbox.ru

Для расчета аэроакустического шума традиционно применяются два типа методов, а именно, методы прямого моделирования шума и так называемые гибридные методы. В первых из них производится совместный расчёт генерации звука турбулентными структурами и распространения звуковых волн в рамках единой системы газодинамических уравнений. В рамках гибридных методов для расчета генерации и распространения звука используются различные уравнения. Эти методы обладают известными преимуществами при расчете низкоскоростных течений. Наиболее часто используются интегральные гибридные методы (самый распространенный из них – метод Фокс Вильямса–Хоукинса), в которых распространение звука до приемника рассчитывается на основе информации о нестационарных характеристиках потока на контрольных поверхностях. Однако, интегральные методы обычно применимы только в случае акустически компактных источников звука, расположенных в свободном пространстве. Этим ограничений лишены сравнительно новые дифференциальные гибридные подходы, в рамках которых моделирование распространения звука проводится во всей расчетной области с помощью дифференциальной модели переноса акустических возмущений.

Один из таких дифференциальных гибридных подходов недавно был реализован в коммерческом пакете ANSYS Fluent [1]. В нем расчет турбулентного течения проводится в несжимаемой постановке с использованием того или иного вихререзрешающего подхода, а распространение акустических возмущений моделируется с помощью нестационарного волнового уравнения, полученного на основе уравнения переноса акустических возмущений [2] в предположении постоянства плотности среды.

Уравнение сформулировано для волнового потенциала ϕ ($\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{p'}{\rho}$):

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \phi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{flow}}{\partial t} \quad (1)$$

Здесь p' – акустическое давление, p_{flow} – локальное статическое давление, получаемое на основе расчета течения, а c и ρ – постоянные скорость звука и плотность жидкости. Волновое уравнение (1) решается с использованием той же расчетной сетки, на которой производится расчет основного течения.

В работе представлены результаты расчетов турбулентного обтекания упрощенной модели автомобильного водосточного желоба при числе Маха $M = 0.07$ и шума, генерируемого этим течением [3]. Для расчета основного течения использовался вихререзрешающий метод SBES [4], а для расчета шума – волновое уравнение [1]. В работе описаны экспериментальная модель и постановка численной задачи, детально представлены результаты расчетов, а также их сравнение с экспериментальными данными.

Расчеты проводились с использованием вычислительных ресурсов СКЦ СПбПУ (www.spbstu.ru).

Список литературы

1. ANSYS Fluent 2019R3 Theory Guide, 15.2.2. Wave Equation Model, 2019
2. Ewert R., Schoeder W., Acoustic perturbation equations based on flow decomposition via source filtering, J. of Computational Physics, v.188, 365-398, 2003
3. Kumarasamy S., Karbon K., Aeroacoustics of an Automotive A-Pillar Rain Gutter: Computational and Experimental Study, SAE 1999-01-1128, 1999
4. Menter F., Stress-blended eddy simulation (SBES) – a new paradigm in hybrid RANS-LES modeling, Progress in Hybrid RANS-LES Modelling, Springer, 27-37, 2016

Предсказание кризиса сопротивления на круглом цилиндре с использованием моделей перехода

Стабников А. С.¹, Гарбарук А.В.¹

¹СПбПУ

e-mail: an.stabnikov@gmail.com

Кризис сопротивления плохообтекаемых тел – явление, при котором коэффициент аэродинамического сопротивления тела резко падает при увеличении числа Рейнольдса. Причина возникновения кризиса сопротивления состоит в том, что при высоких числах Рейнольдса в присоединённом пограничном слое происходит ламинарно-турбулентный переход; в результате турбулизации пограничного слоя точка отрыва смещается вниз по потоку, что и приводит к уменьшению коэффициента сопротивления. Это явление может быть предсказано в рамках уравнений Рейнольдса с использованием так называемых моделей перехода. Целью настоящей работы является оценка точности существующих моделей этого типа для предсказания кризиса сопротивления при поперечном обтекании круглого цилиндра.

Анализ литературы свидетельствует о том, что в настоящее время наиболее точными и универсальными являются дифференциальные модели ламинарно-турбулентного перехода, в рамках которых решаются уравнения переноса характеристик, позволяющих определить положение и характер перехода, в сочетании с уравнениями для турбулентных характеристик. Наиболее популярная модель этого класса SST γ - Re_θ [2] обеспечивает высокую точность предсказания положения перехода в присоединённых пограничных слоях. Однако, несмотря на свои достоинства, модель [2] обладает рядом недостатков, связанных со сложностью и нелинейностью её формулировки, что зачастую приводит к численным проблемам при её использовании. В качестве альтернативы в последнее время стали появляться алгебраические модели перехода, которые не опираются на дополнительные уравнения переноса величин, определяющих положение перехода. К таким моделям, в частности, относится модель k - ω KD [3], представленные результаты тестирования которой выглядят многообещающе. К сожалению, в силу новизны этой модели, результаты независимого тестирования в литературе пока отсутствуют.

В настоящей работе рассматриваются не только модели [2] и [3], но и ряд других моделей. Расчет обтекания круглого цилиндра в широком диапазоне чисел Рейнольдса проводился методом URANS в трёхмерной постановке (применимость такого подхода обоснована в [1]). Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными [4] показало, в частности, что модель k - ω KD предсказывает слишком ранний кризис

сопротивления, модель SST γ - Re_θ предсказывает кризис при правильном числе Рейнольдса, однако при этом значительно завышает сопротивление как до, так и после кризиса.

Результаты получены с использованием ресурсов СКЦ "Политехнический" СПбПУ". Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-27001.

Список литературы

1. Shur M., Spalart P.R., Squires K.D., Strelets M., Travin A. Three Dimensionality in Reynolds-Averaged Navier–Stokes Solutions Around Two-Dimensional Geometries. AIAA J. 43(6), p. 1230-1242. 2004
2. Menter F.R., Langtry R.B. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. AIAA J. 47(12), p. 2984-2906. 2009
3. Kubacki S., Dick E. An algebraic model for prediction of bypass and separation-induced transition in turbomachinery boundary layers. 11th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements. p.1-6. 2016
4. Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds number. J. Fluid Mech. 133, p. 265-285, 1983

Номер проекта РФФИ: 19-31-27001

Динамическая реакция водной пены на взрывное воздействие

Гайнуллина Э.Ф., Болотнова Р.Х.

ИМех УФИЦ РАН

e-mail: elina.gef@yandex.ru

Исследование взрывного воздействия на водную пену представляет большую научную и практическую значимость, поскольку способность водных пен значительно снижать скорость и амплитуду ударных волн находит широкое практическое применение в целях обеспечения пожаро- и взрывобезопасности на высокоэнергетических технологических производствах.

Особенности демпфирующих свойств водной пены проанализированы в теоретических и экспериментальных работах [1-3]. Установлено значительное ослабление амплитуды ударных волн по сравнению с газовой средой.

Настоящая работа является продолжением серии исследований [4, 5], посвященных изучению поведения водной пены под ударно-волновым воздействием. Динамика ударной волны в пенной среде исследуется на основе разработанной трехмерной двухфазной модели в однодавленческом, двухскоростном, двухтемпературном приближениях и включает уравнения неразрывности, импульса и внутренней энергии для каждой фазы [6]. Модель учитывает межфазное силовое взаимодействие, контактный теплообмен, вязко-упругие свойства и явление синерезиса (осаждение) водной пены. Термодинамические свойства компонент исследуемой среды описаны реалистическими уравнениями состояния Пенга-Робинсона для воздуха [7] и Ми-Грюнайзена для воды [8]. Численное моделирование рассматриваемых процессов было выполнено в среде разработанного авторами решателя на базе открытого программного комплекса OpenFOAM [9].

Для тестирования предложенной модели проведена серия расчетов, моделирующих условия экспериментов по распространению ударных волн в газе [10], воде [11] и водной

пене [10]. При численном моделировании предполагалось, что за фронтом сильной ударной волны пена разрушена на микрокапли в виде монодисперсной газочапельной смеси. Для слабых УВ, когда напряжения сдвига ниже предела упругости, при описании свойств водной пены используется вязкоупругая модель Гершеля–Балкли. Полученные решения с использованием предложенной модели удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В рамках основной задачи исследовалась динамика прохождения и отражения от преграды ударных волн в водной пене в соответствии с экспериментами [12], проведенными в ударной трубе. В ходе расчетов водная пена моделировалась как двухфазная неньютоновская жидкость, обладающая вязкоупругими свойствами. В численном исследовании варьировалось начальное водосодержание пены и интенсивность ударной волны. Результаты расчетов в соответствии с экспериментами [12] выявили динамику образования в водной пене локальной динамической зоны с повышенным водосодержанием, возникающей вслед за ударной волной.

Список литературы

1. Britan A., Shapiro H., Liverts M., et al. Macro-mechanical modeling of blast wave mitigation in foams. Part I: review of available experiments and models // *Shock Waves*. 2013. Vol. 23. No. 1. P. 5–23.
2. Borisov A.A., Gelfand B.E., Kudinov V.M. et al. // *Shock waves in water foams* // *Acta Astron.* 1978. Vol. 5. No. 11. P. 1027–1033.
3. Jourdan G., Marian C., Houas L. et al. Analysis of shock-wave propagation in aqueous foams using shock tube experiments // *Phys. Fluids*. 2015. Vol. 27. P. 056101.
4. Bolotnova R. Kh., Gainullina E. F. Dynamics of a spherical explosion in aqueous foam taking into account heat-exchange and dissipative processes // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. Vol. 1400. 077027.
5. Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Влияние теплообменных процессов на снижение интенсивности сферического взрыва в водной пене // *Прикладная математика и механика*. 2019. Т. 83. № 3. С. 468–477.
6. Zeno Tacconi. Feasibility analysis of a two-fluid solver for cavitation and interface capturing as implemented in OpenFOAM // *Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Politecnico di Milano*. 2018. 134 p.
7. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*. 1976. Vol. 15. P. 59–64.
8. Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // *ТВТ*. 2011. Т. 49. № 2. С. 310–313.
9. OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com>.
10. Del Prete E., Chinnayya A., Domergue L., et al. Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams // *Shock Waves*. 2013. Vol. 23. No. 1 P. 39–53.
11. Chen W., Maurel O., La Borderie C., et al. Experimental and numerical study of shock wave propagation in water generated by pulsed arc electrohydraulic discharges // *Heat mass Transfer*. 2014. Vol. 50. P. 673–684.
12. Monloubou M., Le Clanche J., Kerampran S. New experimental and numerical methods to characterise the attenuation of a shock wave by a liquid foam /24ème Congrès Français de Mécanique: Brest, 26 au 30 Août. 2019.

Исследование пробоя газов в сфокусированном пучке терагерцового излучения на пользовательской станции NovoFEL

Водопьянов А. В.¹, Кубарев В. В.², Сидоров А. В.¹, Шевченко О. А.², Гобачев Я. И.², Бармашова Т. В.¹

¹ИПФ РАН

²ИЯФ СО РАН

e-mail: avod@yandex.ru

Благодаря появлению в последние годы надежно работающих источников излучения терагерцовом [1–3] и в суб-терагерцовом [4, 5] диапазонах, стало возможным проводить исследования разрядов, поддерживаемых в сфокусированных пучках такого излучения [6, 7]. Авторами данной работы были инициированы исследования точечного разряда в неоднородном потоке газа, поддерживаемого излучением лазера на свободных электронах [8]. В данной работе описываются особенности устройства экспериментального стенда для этих исследований, которая была создана на пользовательской станции Новосибирского лазера на свободных электронах, описывается оптическая схема, которая позволяет достигать напряженности электрического поля в волне до 1 МВ/см, описываются результаты первых экспериментов по исследованию пробоя в сфокусированном пучке излучения с частотой 2.3 ТГц. Работа выполнена при поддержке РНФ, проект 19-72-20166.

Список литературы

1. M. Y. Glyavin *et al.*, “A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 15, 2012.
2. G. N. Kulipanov *et al.*, “Novosibirsk Free Electron Laser — Facility Description and Recent Experiments,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 5, no. 5, pp. 798–809, 2015.
3. Y. K. Kalynov, V. N. Manuilov, A. S. Fiks, and N. A. Zavolskiy, “Powerful continuous-wave sub-terahertz electron maser operating at the 3rd cyclotron harmonic,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 114, no. 21, pp. 1–6, 2019.
4. G. G. Denisov *et al.*, “First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 89, no. 8, p. 084702, 2018.
5. M. Y. Glyavin *et al.*, “Experimental tests of a 263 GHz gyrotron for spectroscopic applications and diagnostics of various media,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 86, no. 5, pp. 1–4, 2015.
6. A. Sidorov, S. Razin, A. Veselov, A. Vodopyanov, M. Morozkin, and M. Glyavin, “Breakdown of the heavy noble gases in a focused beam of powerful sub-THz gyrotron,” *Phys. Plasmas*, vol. 26, no. 8, p. 083510, Aug. 2019.
7. V. V. Kubarev, Y. V. Getmanov, and O. A. Shevchenko, “Continuous point-like high-temperature laser discharge produced by terahertz free electron laser,” *AIP Adv.*, vol. 7, no. 9, p. 095123, Sep. 2017.
8. A. V. Vodopyanov, A. V. Sidorov, A. P. Veselov, V. V. Kubarev, O. A. Shevchenko, and Y. I. Gorbachev, “On the Prospects for the Study of a Point Discharge Sustained by a Terahertz Free Electron Laser Radiation in an Inhomogeneous Gas Flow,” in *2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019, pp. 1–2.

Численное исследование эволюции турбулентного следа за тонкой пластиной под действием неблагоприятного градиента давления, созданного аэродинамическими профилями

Гусева Е. К.¹, Стрелец М.Х.¹

¹СПбПУ

e-mail: eguseva@cfд.spbstu.ru

Настоящая работа представляет собой продолжение Германо-Российского проекта «Wake Adverse Pressure Gradient» [1], направленного на детальное расчетное (с использованием вихререзающих подходов к описанию турбулентности) и экспериментальное исследование турбулентных следов, развивающихся под воздействием неблагоприятного градиента давления. В настоящее время даже лучшие из RANS моделей турбулентности не способны удовлетворительно предсказывать характеристики таких течений. В результате, они не обеспечивают надежного предсказания аэродинамических характеристик механизированных крыльев современных пассажирских самолетов в режимах взлета и посадки, при которых аэродинамические следы предкрылка и основного крыла формируются и развиваются под воздействием сильного неблагоприятного градиента давления, возникающего при обтекании отклоненного закрылка.

В связи с этим, главной целью проекта является получение достоверных данных о статистических характеристиках турбулентности, которые можно использовать для усовершенствования RANS моделей.

В работе представлены результаты расчетов следа за плоской пластиной, развивающегося в условиях неблагоприятного градиента давления, создаваемого тонкими аэродинамическими профилями, при условиях, соответствующих условиям эксперимента, параллельно проводимого в Техническом университете Брауншвейга [1]. Расчеты проводились с использованием зонного RANS-IDDES подхода [2-3] и вычислительных ресурсов СКЦ СПбПУ (www.spbstu.ru). В работе описаны экспериментальная модель и постановка численной задачи, представлены результаты исследования влияния расчетной сетки и положения границы RANS-IDDES интерфейса. Детально представлены результаты расчетов течения в различных конфигурациях, в том числе с неблагоприятным градиентом давления, достаточным для создания в следе так называемой висячей зоны отрыва.

Работа выполнена при поддержке фондов DFG и RBRF (гранты No. RA 595/26-1 и No. 17-58-12002).

Список литературы

1. Breitenstein W., Scholz P., Radespiel R., Knopp T., Guseva E., Shur M., Strelets M., A Wind Tunnel Experiment for Symmetric Wakes in Adverse Pressure Gradients, AIAA Paper 2019-18752, 2019
2. Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh, Travin A.K., A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, 1638-1649, 2008
3. Shur M., Strelets M., Travin A., Improved embedded approaches: Acoustically adapted versions of STG, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Vol. 134, 62-69, 2017.

Первые результаты измерений с помощью инфракрасной камеры на токамаке Глобус-М2

Токарев В. А.¹, Гусев В.К., Хромов Н.А., Воронин А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Новохацкий А.Н., Минаев В.Б., Варфоломеев В.И., Балаченков И.М., Тельнова А.Ю., Щеголев П.Б., Бахарев Н.Н., Курский Г.С., Киселев Е.О., Патров М.И., Тюхменева Е.А., Толстяков С.Ю.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: Valentin.Tokarev@mail.ioffe.ru

В установках с магнитным удержанием типа токамак процессы, протекающие в SOL (Scrape-off Layer) и на границе плазмы играют важную роль для достижения стационарных условий зажигания [1], а также влияют на глобальные свойства удержания. В частности, тепловые потоки на стенку и диверторные пластины являются одним из основных ограничений достижения энергонапряженных режимов работы.

Одним из инструментов, который применяют для исследований периферийной области плазмы, является ик-камера (тепловизор) [2], [3]. Подобные устройства позволяют измерять температуру на диверторных пластинах, что даёт возможность вычислить идущие на них тепловые потоки, а также определить такой важный параметр как «ширина» SOL (λ_d), то есть характерное расстояние, на котором тепловой поток спадает в e раз.

В данной работе представлены первые результаты измерений с помощью ик-камеры FLIR SC-7030M [4] на токамаке Глобус-М2.

Глобус-М2 представляет собой сферический токамак [5] с открытым дивертором, большим радиусом $R=0,36$ м, малым радиусом $a=0,24$ м, током по плазме I_p до 0,5 МА и тороидальным магнитным полем в районе геометрического центра плазмы B_T до 1 Тл.

Тепловизор FLIR SC-7030M имеет следующие параметры – спектральный диапазон: от 3,7 до 4,8 мкм, разрешение: 320x256 пикселей, стандартный температурный диапазон: от 5°C до 150°C, частота кадров до 230 Гц в полнокадровом режиме и до 25 КГц в оконном режиме. Ик-камера располагалась на верхнем куполе вакуумной камеры на расстоянии 1,3 м от нижних диверторных пластин, для обеспечения прохождения излучения в требуемом диапазоне использовалось окно из сапфира.

В работе приведены результаты измерений температуры и оценки теплового потока, в области пересечения диверторных пластин внешней ногой сепаратрисы (strike point) при различных магнитных конфигурациях.

Список литературы

1. Stangby P.C., The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices, Bristol: Publishing Ltd, 703 p., 2000;
2. Lasnier C.J., Hill D.N., Survey of target plate heat flux in diverted DIII-D tokamak discharges, Nucl. Fusion, Vol. 37. P. 1225-1249, 1998;
3. Kang C.S., Lee H.H., Oh S., Lee S.G., Wi H.M., Kim Y.S., Kim H.S., Study on the heat flux reconstruction with the infrared thermography for the divertor target plates in the KSTAR tokamak, Rev. Sci. Instrum., Vol. 87. 083508(1-10), 2016
4. FLIR SC7000 Series. (2020, Февраль 12). Взято: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_017/RND_017_US.pdf;
5. Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Petrov Yu.V., Varfolomeev V.I., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Brunkov P.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Davydenko V.I., Dyachenko V.V., Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kononov A.N., Kornev V.A., Kurskiy G.S., Melnik A.D., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Novokhatskii A.N., Oshuev K. Yu., Patrov M.I., Petrov A.V.,

Rozhansky V.A., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shikhovtsev I.V., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Sorokina D.S., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Yashin A.Yu., Zhilin E.G., The Globus-M2 spherical tokamak: the first results, Journal of Physics: Conf. Series, Vol. 1094. P. 012001(1-5), 2018.

Номер проекта РФФИ: 18-32-20031

Тестирование новой алгебраической модели перехода при расчете обтекания крыловых профилей при умеренных числах Рейнольдса

Матюшенко А. А.¹, Стабников А.С., Гарбарук А.В.

¹СПбПУ

e-mail: alexey.matyushenko@gmail.com

Задача точного определения аэродинамических характеристик крыловых профилей в широком диапазоне углов атаки крайне важна как для авиационной промышленности и ветроэнергетики, так и для энергомашиностроения. При умеренных числах Рейнольдса и малых углах атаки высокая точность решения этой задачи, как правило, невозможна без учета ламинарно-турбулентного перехода, для чего в рамках осредненных уравнений Рейнольдса в сочетании используются так называемые полуэмпирические модели перехода.

Существующие модели перехода можно разделить на две группы. В первую из них входят дифференциальные модели, использующие для определения положения ламинарно-турбулентного перехода уравнения переноса тех или иных параметров. Наиболее успешной моделью такого типа является модель γ - $Re_{\theta t}$ -SST [1], в которой используются уравнения переноса перемежаемости γ и локального критического числа Рейнольдса. Недостатком дифференциальных моделей является плохая сходимость итераций при решении дифференциальных уравнений, что стимулировало создание моделей второй группы, использующих алгебраические соотношения для определения положения перехода.

Сравнительно недавно была предложена новая алгебраическая модель перехода [2], однако ее тестирование было проведено на ограниченном круге течний. Целью настоящей работы является более детальное тестирование этой модели и сравнение ее результатов с аналогичными результатами, полученными с использованием наиболее успешных дифференциальных моделей перехода γ - $Re_{\theta t}$ -SST [1] и γ -SST [3] с одним уравнением для величины перемежаемости.

Для тестирования моделей использовались пограничные слои при различном уровне турбулентности, без учета и с учетом градиента давления. Кроме того, было рассмотрено обтекание нескольких крыловых профилей при низких числах Маха. Расчеты проводились с использованием коммерческого программного пакета ANSYS Fluent и академического кода NTS. Результаты расчетов позволили выявить достоинства и недостатки алгебраической модели [2] и определить ее место в ряду аналогичных моделей.

Результаты получены с использованием ресурсов СКЦ "Политехнический" СПбПУ".

Список литературы

1. Langtry R B and Menter F R 2009 Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes AIAA Journal 47 (12) 2894–90
2. Menter F R 2020 Presented in ETMM13 Conference
3. Menter F R, Smirnov P E, Liu T and Avancha R 2015 A One-equation local correlation-based transition model Flow Turbulence Combust 95 583–619

Номер проекта РФФИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-27001.

Численное исследование кавитирующих потоков и выделения растворенного газа

Махнов А. В.^{1,2}, Шмидт А.А.²

¹СПбПУ

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: a_makhnov@mail.ru

Прогнозирование структуры и параметров кавитирующих потоков имеет решающее значение для анализа эффективности работы технических устройств во многих промышленных приложениях. На практике жидкость обычно содержит растворенный газ, который может диффундировать в кавитационные полости, изначально образующиеся как паровые. Выделение растворенного газа значительно влияет на дальнейшее развитие этих полостей. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные по дегазации жидкости не позволяют получить детальную информацию, которая необходима для анализа механизмов данного процесса. В современных подходах к моделированию кавитирующих потоков диффузия газа, как правило, не учитывается. Кроме того, полуэмпирические модели кавитации, которые реализованы в коммерческих CFD-кодах, используемых для решения прикладных инженерных задач, сами по себе имеют ряд существенных недостатков.

В данной работе предложена комбинированная модель кавитации и выделения газа. Рассматриваются образование и эволюция кавитационных полостей в потоке жидкости, а также выделение растворенного газа в полость при заданном давлении окружающей среды. Проведено численное моделирование нестационарного течения жидкости в микроканале с учетом возникновения кавитации и выделения растворенного газа. Анализ турбулентного течения в микро-канале в кавитационном режиме показал, что локальное падение давления жидкости в нестационарных вихревых структурах, образующихся в отрывных зонах, может быть основной причиной возникновения гидродинамической кавитации. Анализ выделения растворенного газа на основе модели диффузии позволил установить, что парообразование (паровая кавитация) оказывает определяющее влияние на скорость дегазации жидкости. Выделение растворенного газа становится возможным только после возникновения в жидкости паровых каверн и продолжается даже после полной конденсации пара, но со значительно меньшей скоростью. Полученный результат на качественном уровне согласуется с имеющимися в литературе экспериментальными сведениями.

Турбулентность течения моделировалась на основе метода крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation). При этом сравнивались результаты, полученные с использованием двух разных методик, основанных на идее LES. В первом варианте расчет проводился без явного моделирования турбулентных структур (вихрей), которые имеют мелкие линейные масштабы по сравнению с размером ячейки сетки (подсеточные масштабы), а во втором варианте был применен гибридный метод IDDES-SA, основанный на комбинированном использовании метода отсоединенных вихрей (DES – Detached Eddy Simulation) и модели Спаларта-Аллмараса (SA). Показано, что влияние выбора модели турбулентности на нестационарную эволюцию массового расхода жидкости при течении через канал несущественно. Среднее значение массового расхода, полученное в расчете, хорошо совпадает с результатом эксперимента. Отсутствие симметрии в распределении давления и его сильная зависимость от времени связаны со сложной структурой отрывного течения, в котором содержатся макрокопические кавитационные полости [1].

Анализ распределений массовой доли, построенных по отдельности для пара и для выделившегося газа, позволил установить принципиальные различия в сценариях образования паровых и газовых (парогазовых) каверн, в динамике их развития. Пар присутствует в составе смеси локально в областях течения, где давление жидкости падает до давления насыщенных паров, то есть далеко не во всем объеме, занятом газообразной фазой. Большая часть этого объема занята не паром, а газом, который исходно присутствует в жидкости как растворенный. После выделения в каверны и переноса этих каверн потоком в области высокого давления газ стремится раствориться обратно в жидкость, однако этот процесс медленный и не успевает заметно проявиться за характерное время установления нестационарного потока [2].

Список литературы

1. Iben, U.; Makhnov, A.V.; Schmidt, A.A. Mathematical modeling of the inception and development of cavitation in turbulent liquid flow in a symmetric channel // Technical Physics Letters, 2019
2. Iben U.; Makhnov A.V.; Schmidt A.A. Numerical study of dissolved gas release induced by cavitation in a high speed channel flow // J. Phys.: Conf. Series, 2019

Математическое моделирование направленного вихревого движения массы воды для малых гидроэлектростанций

Shalenov E.O.^{1,2}, Tolemis M.T.^{1,3}, Bekbayev A.B.³, Abdiyeva Sh.A.¹, Anarbayev S.T.^{1,3}

¹КазНУ, Казахстан

²НИИЭТФ

³КазНИТУ, Казахстан

e-mail: sheo2801@mail.ru

В настоящее время существуют различные виды гидротурбин. Эти турбины имеют достаточно сложную конструкцию, а также коэффициент использования энергии воды ничтожна, мала. В рамках этой проблемы по формированию экологически чистых источников электроэнергии необходимо проектировать унифицированные, локальные малые

гидроэлектростанций. Развитие локальной малой гидроэнергетики даст дешевую электрическую энергию и отсутствие потерь при транспортировке электроэнергии.

Отсюда вытекает задача по созданию единой теории движения потока воды, а также задача по проектированию оптимальной унифицированной конструкции гидротурбин.

Для оптимизации конструкции гидротурбины необходимо рассмотреть энергетический потенциал воды. В настоящее время в процессе конструирования гидротурбин используется в основном напор воды и не рассматриваются кинетическая энергия воды в вихревом движении.

Вихревые движения жидкости используются в узких направлениях науки и в основном их образования даже нежелательно, например, в используемых гидроэлектростанциях, которые могут образовать кавитацию. В настоящее время разработка конструкции гидротурбин осуществляется эмпирическими или экспериментальными путями. Это связано с отсутствием систематизированных теоретических исследований гидродинамических процессов, происходящих в гидротурбинах. Поэтому нами сделана попытка углубления и систематизации теоретических исследований движения жидкости с использованием вихревого движения для максимального использования кинетической энергии воды в гидротурбинных установках.

При проектировании гидротурбины, рассмотрены пути создания вихревого движения воды. При этом, решена задача оптимизации конструкции механизма завихрения, обеспечивающая максимальное использование энергии воды. В результате этого исследования, установлен оптимальный угол расположения направляющих лопаток, создающих вихревое движение воды. Для проверки теоретических исследований был проведен численный эксперимент.

В результате работы разработана математическая модель движения потока воды и оптимальная унифицированная конструкция гидротурбины, которая защищена инновационным патентом Республики Казахстан.

Таким образом, в результате исследования получена новая эмпирико – аналитическая математическая модель первичного преобразователя энергии для гидроэлектростанций малых мощностей. Исследование модели показало ее достаточную адекватность и возможность использования для анализа работы установки как в статическом, так и в динамическом режимах.

Результаты, полученные в данной работе, могут найти применение в составе модели ГЭС разного типа и мощности.

Результаты измерения мощности радиационных потерь и эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М2

Тухменева Е. А., Толстяков С.Ю., Курский Г.С., Гусев В.К., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Киселев Е.О., Жильцов Н.С., Тельнова А.Ю., Бахарев Н.Н., Щеголев П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: tuxmeneva@gmail.com

Понимание процессов переноса примесей в плазме является одним из ключевых вопросов в области УТС. Взаимодействие плазмы со стенкой камеры токамака служит основной причиной поступления примесей. Поскольку мощность радиационных потерь P_{rad}

пропорциональна квадрату эффективного заряда плазмы Z_{eff} , присутствие примесей может приводить к существенному охлаждению плазмы, вплоть до радиационного коллапса.

Двумерное распределение P_{rad} в полоидальном сечении токамака Глобус-М2 восстанавливается методом томографии по измерениям, сделанным при помощи многохордовой системы на основе SPD фотодиодов [1, 2], состоящей из матрицы 16×16 , линейки 1×24 и дискретных фотодиодов. На модернизированной установке Глобус-М2 [3] распределение радиационных потерь получено в различных режимах работы токамака: с чисто омическим и дополнительным нагревом. Проведенный анализ экспериментальных данных позволил построить зависимости мощности полных радиационных потерь P_{rad} от величины тороидального магнитного поля ($0,4 - 0,8$ Т) и тока по плазме ($200 - 400$ кА). Эксперименты в условиях существенного увеличения магнитного поля и тока по плазме продемонстрировали уменьшение пикированности профиля P_{rad} , что свидетельствует о снижении накопления примесей в центре плазменного шнура.

Эффективный заряд Z_{eff} измеряется на Глобусе-М2 по интенсивности тормозного излучения, регистрируемого в спектральном диапазоне $1019 - 1040$ нм вдоль хорды наблюдения в экваториальной плоскости токамака, и с использованием данных диагностики томсоновского рассеяния – электронной температуры T_e и концентрации n_e [4, 5]. Измерения Z_{eff} проведены в широком диапазоне параметров плазмы в условиях повышенного тока (до 400 кА) и магнитного поля (до $0,8$ Т). Получены зависимости величины эффективного заряда от плотности электронов, геометрии, режима нагрева и т. д.

Для более всестороннего анализа поступления примесей, их состава и количества, процессов переноса и накопления на токамаке Глобус-М2 разработана и установлена новая спектрометрическая система: обзорный спектрометр, регистрирующий спектры в диапазоне $200 - 1100$ нм, и дискретные датчики для регистрации отдельных линий основных примесных элементов, присутствующих в плазме токамака Глобус-М2. Дискретные датчики регистрируют интенсивность излучения элементов С III на линии 465 нм, О III на линии 441 нм, N II на линии 568 нм и Fe I на линии 427 нм. Датчики абсолютно прокалиброваны, что позволяет измерять абсолютную интенсивность излучения примесных элементов на данных линиях. Предусмотрена возможность расширения спектрометрической системы путем установки дополнительных датчиков на линии других элементов или зарядовых состояний.

Список литературы

1. A.G. Alekseyev, A.G., Belov, A.M. & Zabrodskii, V.V. 2010 Instrum and Exp Tech 53 209–212
2. A.D. Sladkomedova et al 2018 Review of Scientific Instruments 89 083509
3. V.K. Gusev et al 2013 Nucl. Fusion 53 093013
4. E.A. Tukhmeneva et al 2019 Plasma Sci. Technol. 21 105104
5. G.S. Kurskiev et al 2012 PAS&T/TF 35 81

Численное исследование возмущающего действия кубического препятствия на турбулентный свободно-конвективный пограничный слой, развивающийся на вертикальной нагретой пластине

Левченя А. М.¹, Смирнов Е.М.¹, Смирновский А.А.¹

¹СПбПУ

e-mail: levchenya@ya.ru

Для многих устройств характерна определяющая роль динамических и теплообменных процессов, происходящих в свободно-конвективных пограничных слоях. Базовой моделью в данном случае служит двумерный слой, развивающийся на нагретой вертикальной пластине. В ряде случаев свободно-конвективный пограничный слой может быть возмущен локальными препятствиями (макро-шероховатостями). Таковыми могут быть конструктивные элементы жилого дома или промышленной установки, контейнеры для хранения отработанного ядерного топлива, здания, оборудованные солнечными панелями и т.п.

При натекании двумерного пограничного слоя на трехмерное препятствие создаются условия для формирования крупномасштабных вихревых структур, например, подковообразных. Ранее авторами [1] рассматривалась задача взаимодействия свободно-конвективного пограничного слоя с погруженным в него круговым цилиндром. Согласно решениям, полученным на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), развитие вихревых структур приводит, в частности, к возникновению локальных зон, в которых пиковые значения трения и теплоотдачи в несколько раз превосходят уровень, типичный для двумерного слоя. Из общих соображений следует, что в случае кубического препятствия его возмущающее действие будет проявляться еще сильнее. Примечательно, что для родственной задачи вынужденной конвекции, в которой рассматривается обтекание установленного на стенке препятствия, именно случай кубического препятствия вызывает повышенный интерес (см., например, [2, 3]).

В настоящей работе представляются результаты численного моделирования трехмерного течения воздуха ($Pr=0.7$) в окрестности куба, полностью погруженного в турбулентный свободно-конвективный пограничный слой, полная толщина которого в месте установки куба примерно в 3 раза больше его ребра. Рассматривается два варианта тепловых граничных условий на поверхности куба: адиабатичность и постоянная температура, равная температуре пластины. Расчеты по методу RANS выполнены с использованием «конечно-объемного» программного пакета с использованием SST модели турбулентности Ментера. Для задания профилей скорости и температуры на входе в расчетную область используются распределения, полученные в результате предварительного расчета развития двумерного турбулентного пограничного слоя. По результатам полученных решений анализируются характерные особенности гидродинамических явлений и теплопереноса в свободно-конвективном пристенном течении, возмущенном препятствием. В сопоставлении с полученными ранее численными решениями для случая кругового цилиндра при схожих условиях, количественно определяется влияние образующихся около куба крупномасштабных вихревых структур на интенсификацию теплообменных процессов и уровень пристенного трения. Установлено, в частности, что пиковые значения трения на пластине в окрестности куба в два с лишним раза выше, чем в случае цилиндра, максимум локальной теплоотдачи, обусловленной подковообразным вихрем, больше на 20%, а

общая протяженность теплового следа за препятствием выросла в полтора раза. Расчеты проведены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.scc.spbstu.ru).

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант 18-19-00082.

Список литературы

1. Smirnov E.M., Levchenya A.M., Zhukovskaya V.D., RANS-based numerical simulation of the turbulent free convection vertical-plate boundary layer disturbed by a normal-to-plate circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 144(12), 118573. 2019.
2. Martinuzzi R.J., Tropea C., The flow around surface mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow, J. Fluids Eng., Vol. 115, 85-92, 1993.
3. Yakhot A., Liu H., Nikitin N., Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation, Int. J. Heat Fluid Flow. Vol. 27, 994-1009, 2006.

Исследование взаимодействия конических тел с неравномерным сверхзвуковым потоком при малых углах атаки

Шевченко А. В.¹, С.А. Яшков¹, Е.А. Прокопенко¹, С.А. Поняев^{1,2}

¹ВКА имени А.Ф.Можайского

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: artnetru@yandex.ru

Проведено исследование взаимодействия конических тел с набегающим сверхзвуковым потоком. В представленных теоретических и экспериментальных исследованиях определены параметры набегающего потока вблизи исследуемых тел при различных числах Маха. Экспериментальные исследования выполнены с помощью сверхзвуковой атмосферно-вакуумной аэродинамической трубы аэродинамической лаборатории ВКА имени А.Ф.Можайского. В основу теоретического исследования положена модель невязкого совершенного газа, описываемая уравнениями Навье-Стокса.

В последнее десятилетие сложилась устойчивая тенденция к использованию компьютерных автоматизированных систем инженерных газодинамических расчетов. Наиболее эффективным является использование численных методов исследований в сочетании с экспериментальными, являющиеся средством верификации результатов расчетов. Поэтому при выполнении численных исследований и сопоставления их результатов с данными экспериментов, имеет значение правильность определения адекватности получаемых картин обтекания, влияющих на точность получаемых результатов расчетов. В статье приведены результаты исследования газодинамических параметров сверхзвукового потока вблизи конических тел.

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований параметров набегающего потока вблизи конических тел при различных числах Маха ($M_\infty=1,5; 2; 2,5; 3$ и 4). Значения M_∞ определялись возможностью их реализации в сверхзвуковой атмосферно-вакуумной аэродинамической трубе СТ – 4 аэродинамической лаборатории ВКА имени А.Ф.Можайского. Объектом исследования выбраны конические тела с углом

полураствора 10 град. Угол между осью тела и нормалью набегающего потока в исследованиях изменялся в пределах от 0 до 15 град. В численных исследованиях в качестве модели турбулентности, замыкающей уравнения Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, использовалась модель переноса сдвиговых напряжений Ментнера.

Полученные результаты исследований показали, что используемые математические модели сверхзвукового обтекания конических тел при малых углах атаки, хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, что позволяет их использовать для проведения численных расчетов газодинамических параметров сверхзвукового потока вблизи тел различной конфигурации при M_∞ от 1,5 до 4.

Представленные результаты получены в рамках программы научных исследований по гранту Президента Российской Федерации МК-654.2019.8.

Список литературы

1. Features of start-up processes of a vacuum supersonic tube // N P Savishenko et al 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1135 012099.
2. Raymond Brun. Shock Tubes and Shock Tunnels: Design and Experiments // RTO-EN-AVT-162 lecture series at the von Karman Institute, 2009. 26 p.
3. Звезгинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть 1. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
4. Райзер Ю.П. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков, «Интеллект», 2011. 431 с.
5. Mentner F.R., Galpin P.F., Esch T., Kuntz M., Berner C. CFD Simulations of Aerodynamic Flows with a Pressure-Based Method // Paper ICAS 2004–2.4.1, Japan, Yokohama, 2004. – 11 p.
6. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Расчет сверхзвуковых турбулентных течений. Институт Проблем механики РАН, Препринт № 793 2006, 36 с.
7. Liou M. S., Steffen C. J. Jr., A New Flux Splitting Scheme // Journal of Computational Physics, Vol. 107, 1993, pp. 23-39.

Исследование газодинамических параметров сверхзвукового потока вблизи тела при различных числах Маха

Житников Т. А.¹, А.В. Шевченко¹, А.С. Юрьев¹, С.А. Поняев^{1,2}, Е.Б. Панфилов¹, А.Р. Ротэрмель¹

¹ВКА имени А.Ф. Можайского

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: 0606848@rambler.ru

Рассмотрено взаимодействие тела с набегающим сверхзвуковым потоком. С использованием численных методов определены газодинамические параметры сверхзвукового потока вблизи рассматриваемого тела при различных числах Маха. В работе проведены теоретические расчеты обтекания тела сверхзвуковым потоком, а также верификация используемых в расчетах математических моделей результатами экспериментальных исследований, выполненных в гиперзвуковой импульсной трубе. В основу численного исследования была положена модель невязкого совершенного газа, описываемая уравнениями Навье-Стокса.

В статье приводятся результаты исследования газодинамических параметров набегающего потока вблизи тела, полученные на основе численного и экспериментального моделирования задачи сверхзвукового обтекания тела. Для задач такого класса применение методов математического моделирования на ранних стадиях процесса проектирования позволяет существенно снизить потребности в физическом эксперименте и провести предварительную параметрическую оптимизацию, позволяющую выбрать проектные параметры изделия. В то же время снижение потребности в физическом эксперименте никаким образом не снижает его ценности как основного критерия верификации результатов численного моделирования.

Представлены некоторые результаты исследований газодинамических параметров сверхзвукового потока (ρ , p) вблизи тела при различных числах Маха ($M_\infty=8, 10, 12, 14$ и 17) и следующих значениях параметров невозмущенного потока $p_\infty=77, 79$ Па и $T_\infty=290$ К, что соответствует параметрам потока в импульсной аэродинамической трубе ИТ-1М. В качестве объекта исследования выбран затупленный по сфере конус. В качестве модели турбулентности, замыкающей уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, использовалась модель переноса сдвиговых напряжений Ментнера. Для решения системы уравнений применялась неявная схема на треугольной неструктурированной сетке. Расчетная сетка имела размерность 1.6×10^6 элементов.

Полученные результаты исследования показали, что выбранная математическая модель сверхзвукового обтекания тела, хорошо согласуется с результатами экспериментальных продувок полученных в импульсной трубе ИТ-1М аэродинамической лаборатории ВКА имени А.Ф.Можайского, что позволяет использовать ее в качестве базовой для расчетов газодинамических параметров вблизи тел различной конфигурации.

Список литературы

1. Прокопенко Е.А., Шевченко А.В., Яшков С.А. Экспериментальная установка на основе импульсной аэродинамической трубы для определения газодинамических параметров потока вблизи гиперзвуковых летательных аппаратов. Труды ВКА имени А.Ф.Можайского, – СПб, вып. № 665, 2018 г.
2. Surzhikov S T, 2018 Computer aerophysics of re-entry space vehicles. 3D models, (in Russian), Fizmatlit.
3. Interaction of a system of supersonic jets from a body with an incoming flow // A V Shevchenko et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1400 077051.
4. M.A. Kotov, I.A. Kryukov, L.B. Ruleva, S.I. Solodovnikov, S.T. Surzhikov. Experimental Investigation Of An Aerodynamic Flow Of Geometrical Models In Hypersonic Aerodynamic Shock Tube // AIAA 2013-2931, AIAA Wind Tunnel and Flight Testing Aero II. 15 p.
5. Liou M. S., Steffen C. J. Jr., A New Flux Splitting Scheme // Journal of Computational Physics, Vol. 107, 1993, pp. 23-39.
6. Raymond Brun. Shock Tubes and Shock Tunnels: Design and Experiments // RTO-EN-AVT-162 lecture series at the von Karman Institute, 2009. 26 p.

Динамический и стационарный расчеты нижегибридного тока увлечения для токамаков ФТ-2 и Глобус-М2

Трошин Г. А.¹, Теплова Н.В., Хавин В.Е., Дьяченко В.В., Гусаков Е.З., Гусев В.К., Коновалов А.Н., Лашкул С.И., Савельев А.Н.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: g.troshin@mail.ioffe.ru

Разработка безындукционных методов генерации тока увлечения является центральной проблемой на пути развития термоядерного реактора в рамках концепции токамака. Нижегибридный (НГ) метод поддержания тока потенциально может быть использован при решении этой проблемы, поскольку он имеет одну из самых высоких эффективностей генерации тока увлечения [1].

В последние годы эксперименты на токамаках ФТ-2 и Глобус-М2 сфокусированы на изучении механизмов, влияющих на эффективность генерации тока увлечения НГ волнами при различных параметрах плазмы. Для интерпретации экспериментальных результатов, указывающих на высокую эффективность НГ токов увлечения, проводилось комплексное моделирование распространения и поглощения НГ волн в плазме ФТ-2 и Глобус-М2. Моделирование НГ токов увлечения на сферическом токамаке Глобус-М2 является более сложной задачей, поскольку волны в традиционном тороидальном замедлении недостаточно проникают в плазму, и требуется поворот антенны в полоидальном направлении. Для расчета спектра параллельного показателя преломления НГ волны, запущенной в плазму двухволноводными антеннами был использован код Grill3D [2]. Величина и направление тока, генерируемого НГ волной, были рассчитаны с использованием кода Fast Ray Tracing Code (FRTC) [3], рассчитанного спектра НГ волны и измеренных профилей параметров плазмы. Магнитное равновесие плазменного шнура обеспечивалось кодом ASTRA [4] с использованием измеренных радиальных профилей плотности и температуры параметров плазмы. В симуляциях выполненных в [5] не учитывалось влияние остаточного индукционного электрического поля на функцию распределения электронов, генерацию надтепловых электронов и, следовательно, на эффективность НГ нагрева.

В настоящей работе представлены результаты расчетов с помощью нового динамического одномерного подхода к моделированию генерации нижегибридного тока увлечения в присутствии индукционного электрического поля, предложенного недавно в [6], а также проведено сравнение со стационарной версией [5]. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными. Данный подход был применен для расчета профиля тока увлечения на основе экспериментальных данных, полученных на токамаках Глобус-М, Глобус-М2 и ФТ-2. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-72-00117.

Список литературы

1. N.J. Fisch, *Mod. Phys. Rev.* 59 1987
2. M.A. Irzak and O.N Shcerbinin, *Nucl. Fusion* 35, 1341 (1995)
3. A.D. Piliya, A.N. Saveliev, *JET Joint Undertaking, Abingdon, Oxfordshire, OX14 3EA*, 1998
4. G.V. Pereverzev and P.N. Yushmanov, *Automated System for Transport Analysis IPP-Report IPP 5/98*, (2002)
5. S.I. Lashkul et al *Nucl. Fusion* 55 (2015) 073019
6. A.N. Saveliev, *EPJ Web of Conferences* 157, 03045 (2017)

Измерение теплового потока в начальной фазе отражения ударной волны от стенки с помощью датчика на анизотропных термоэлементах

Монахов Н. А.¹, Попов П.А.¹, Сахаров В.А.¹, Поняев С.А.¹, Котов М.А.²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²ИПМех РАН

e-mail: nm1988@mail.ru

При высокоскоростном движении летательных аппаратов вблизи их поверхности формируется сложная система ударных волн. В штатных режимах полета это может приводить к существенному увеличению теплового потока к поверхности аппарата и его дальнейшему разрушению. Исследование особенностей теплообмена и возможности управления структурой потока вблизи поверхности летательного аппарата при различных условиях полета остается одной из важнейших задач экспериментальной газодинамики.

В настоящее время, экспериментальные исследования обтекания тел высокоэнthalпийным потоком газа в основном проводятся на импульсных установках с длительностью рабочего цикла $\sim 1-10$ ms. Это предъявляет особые требования к средствам измерения теплового потока. Датчики должны обладать высокой механической прочностью, быстродействием ~ 1 ms, большим динамическим диапазоном, высокой помехоустойчивостью, в том числе в условиях сильных электромагнитных полей. Одним из перспективных инструментов, в полной мере удовлетворяющим данным требованиям, является тепловой датчик на основе анизотропных термоэлементов, разработанный в Санкт-Петербургском Политехническом университете [1].

Чувствительный элемент датчика представляет собой батарею соединенных последовательно анизотропных термоэлементов из монокристалла висмута толщиной 0.2 mm и длиной 2–10 mm. Размеры датчика в плане варьируются от 2×2 mm до 10×10 mm в зависимости от необходимой чувствительности и геометрии исследуемой модели. Принцип действия основан на эффекте Зеебека – генерации термоэдс в направлении, перпендикулярном градиенту температуры в чувствительном элементе, обладающим анизотропией коэффициента термоэдс. У данных датчиков практически отсутствует тепловая инерция, поскольку их сигнал пропорционален градиенту температуры в чувствительном элементе, подтвержденное время отклика составляет 10 ns. Накопленный к настоящему моменту опыт применения позволяет утверждать, что датчик является уникальным инструментом для диагностики тепловых потоков в сложных условиях [2, 3].

В работе [4] предложена методика обработки электрического сигнала датчика на анизотропных термоэлементах, апробированная на ряде модельных задач, характерных для газодинамических экспериментов на ударных трубах с характерным временем процесса ~ 1 ms. В настоящей работе, методика применена для расчета теплового потока при отражении ударной волны от торца ударной трубы с характерным временем ~ 0.1 μ s.

Основной задачей исследования является анализ применимости методики для обработки теплового воздействия малой длительности и плотности, а также низкого отношения сигнал/шум в условиях импульсного газодинамического эксперимента.

В работе использованы экспериментальные данные, полученные при поддержке РФФИ, проект 08-08-00414

Соавторы Котов М. А. и Монахов Н.А. благодарят за поддержку грант Президента Российской Федерации (МК-144.2020.1)

Список литературы

1. Mityakov A.V., Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Y., Snarskii A.A., Zhenirovsky M.I. and Pyrhonen J.J. 2012 Sensor Actuat. A-Phys. 176 1-9
2. Bobashev S. V., Golovachov Yu. P., Chernyshev A. S., Kurbatov G. A., Mende N. P., Sakharov V. A., Schmidt A. A. and Wie D. V. 2008 46th AIAA Aerosp. Sci. Meeting (Reno)
3. Bobashev S. V., Mende N. P., Ponjaev S. A., Popov P. A., Sakharov V. A., Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A. V. and Wie D. V. 2009 Proc. 47th AIAA Aerosp. Sci. Meeting (Orlando)
4. Popov P. A., Bobashev S. V., Reznikov B. I. and Sakharov V. A. 2018 Tech. Phys. Lett. 44 (4) 316-9

Номер проекта РФФИ: 08-08-00414

Моделирование методом Монте-Карло характеристик дрейфа ионов ртути в инертном газе

Халикова З. Р.¹, Курбанисмаилов В.С.¹, Майоров С.А.², Рагимханов Г.Б.¹

¹Дагестанский государственный университет

²ИОФ РАН

e-mail: zairaplazma89@mail.ru

Дрейф ионов применительно к задачам газоразрядной плазмы уже изучался в ряде работ [1-12]. Плазмохимические реакции, идущие с участием ионов в различных видах газового разряда; процессы, протекающие в ионосфере под влиянием солнечного ветра, процессы взаимодействия потоков ионов с поверхностями твердых и жидких веществ во многом определяются функцией распределения ионов по скоростям.

В работе методом Монте-Карло выполнены расчеты дрейфовых характеристик ионов в ртути в инертных газах (He, Ar, Xe) в в постоянном и однородном электрическом поле при $1 < E/N < 1000$ Тд.

Для моделирования ион-атомных столкновений при движении иона в однородном электрическом поле проводилось интегрирование уравнений движения ионов по схеме Рунге-Кутты второго порядка точности. На каждом шаге по времени разыгрывалось столкновение иона с атомом. Алгоритм моделирования ион – атомного столкновения подробно описан в работах [13-16].

Выполнен анализ функции распределения ионов ртути металлов по скорости вдоль и поперек направления поля при дрейфе в инертном газе (He, Ar, Xe) аргоне при различных напряженностях электрического поля. Рассчитаны и про табулированы диффузионно-дрейфовые характеристики ионов ртути железа в инертном газе (He, Ar, Xe) гелии в зависимости от приведенной напряженности электрического поля – средняя энергия ионов, их продольная и поперечная температуры, коэффициенты диффузии вдоль и поперёк направления поля. Исследована функция распределения ионов ртути в инертном газе (He, Ar, Xe) по скоростям и угловая зависимость ионов, бомбардирующих поверхность катода.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-08-00333 и № 19-08-00611.

Список литературы

1. Антипов С. Н., Васильев М. М., Майоров С. А., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. Вып. 2. С. 554.
2. Дзиева Е. С., Ермоленко М. А., Карасев В. Ю., Павлов С. И., Новиков Л. А., Майоров С. А. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100, Вып. 11. С. 801.
3. Антипов С. Н., Асиновский Э. И., Кириллин А. В., Майоров С. А., Марковец В. В., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. Вып. 4. С. 948.
4. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. № 3. С. 46.
5. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 150 с.
6. Эндер А.Я., Эндер И.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 8–17.
7. Эндер А.Я., Эндер И.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. С. 18–28.
8. Else D., Kompaneets R., Vladimirov S.V. // Phys. Plasm. 2009. Vol. 16. P. 062 106.
9. Viehland L/ A., Mason E.A. // Annal. Phys. 1975. Vol. 91. P. 499–533.
10. White R.D., Robson R.E., Dujko S., Nicoletopoulos P., Li B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 194 001.
11. Майоров С. А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. №9.С. 869-880.
12. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2018. № 12. С. 55.
13. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2007. № 7. С. 44.
14. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2009. № 5. С. 15.
15. Майоров С. А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2014. № 3. С. 46.
16. Майоров С. А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. №9.С. 869-880.

Номер проекта РФФИ: 19-08-00333, 19-08-00611

Получение технического углерода в высоковольтном однофазном плазмотроне переменного тока

Герасимова Л. В.¹, Субботин Д.И.¹

¹ИЭЭ РАН

e-mail: liubov.g.v@gmail.com

В настоящее время актуальной задачей является получение углеродных материалов с заданными свойствами. Существует ряд методов получения технического углерода. Основным методом выступает термическое разложение углеводородов в присутствии кислорода – парциальное окисление. Качество получаемого технического углерода, полученного таким способом, относительно не высокое. Это связано с высоким содержанием высокомолекулярных органических соединений кислорода. Другим популярным методом служит пиролиз на нагретой керамической насадке. Этот метод относится к полупериодическим процессам и основной ее проблемой является переменный состав и свойства получаемого углеродного материала.

В докладе рассматривается высоковольтный однофазный плазмотрон переменного тока работающий на смеси метана и азота высокой чистоты. Азот выступает в качестве газа-разбавителя и защитного газа. Особенностью данного плазмотрона является способ его запуска. Запуск плазмотрона обеспечивается высоким напряжением (10 кВ) между стенкой электродугового канала и электродом [1]. Плазмотрон представляет собой два

электродуговых канала с расположенными в них графитовыми стержневыми электродами. В приэлектродную область подается азот, обеспечивающий постоянные условия для его запуска и работы. Отсутствие азота не позволит плазмотрону работать продолжительное время, т.к. образующаяся сажа будет осаждаться на фторопластовых изоляторах и вызывать короткое замыкание. Метан подается непосредственно за электрод в электродуговой канал. Незначительные возвратные течения плазмообразующего газа не вносят существенных проблем в работоспособность устройства. Основные химические процессы протекают в камере смешения, в которую направлены электродуговые каналы.

Полученный технический углерод и газообразные продукты охлаждаются в холодильнике типа "труба в трубе" и фракционируются в малогабаритном циклоне. Технический углерод собирается в приемнике циклона и анализируется физико-химическими методами: рентгенофазовым анализом и динамического светорассеяния.

Список литературы

1. Subbotin D. I., Surov A. V., Popov S. D., Popov V. E., Serba E. O., Lizander V. V., Charykov N. A., Nakonechny Gh. V., Kuchina J. A., Investigation of a high voltage AC plasma torch operating on mixtures of methane and other gases, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1115, 032013, 2018

Плавление золы древесных отходов воздушным высоковольтным трехфазным плазмотроном переменного тока

Кириллова А. А.¹, Субботин Д.И.¹

¹ИЭЭ РАН

e-mail: Kirillovaaa@list.ru

В настоящее время термическая переработка отходов остается наиболее популярной в большинстве стран мира. Однако в ходе таких процессов возникает большое количество технических и научно-технических проблем. Традиционные методы сжигания органосодержащих отходов не способны обеспечить их полную деструкцию органических соединений. Кроме того, образующаяся при сжигании отходов зола содержит в своем составе большое количество тяжелых металлов. Большая часть этих металлов при захоронении золы быстро выносятся дождевыми и грунтовыми водами. Это может значительно осложнить экологическую обстановку на местности, особенно при ее примыкании к жилым районам.

Среди тяжелых металлов наибольшей опасностью для экосистемы обладают кадмий, ртуть, свинец, цинк. Поэтому необходимо либо удалить опасные соединения на этапе переработки, либо обеспечить их надежную сохранность в образующемся твердом остатке. В настоящее время общий объем образующегося осадка сточных вод в России превышает 30 млн т/год.

В докладе рассматривается реактор-плавитель с установленным на него высоковольтным плазмотроном переменного тока. Плазмотрон запитан от высоковольтного источника переменного тока, состоящего из повышающего трансформатора, токоограничивающих реакторов и компенсатора реактивной мощности. Такой тип источника питания позволяет получать коэффициент мощности $\cos\varphi$ близкий к единице. Плазмотрон выполнен в виде цилиндрического корпуса-рубашки охлаждения, внутри которой

располагаются три электродуговых канала с медными стержневыми электродами. Малый зазор между электродами и корпусом плазмотрона обеспечивает самопроизвольное зажигание дуги при приложении к ним напряжения от источника питания. Поторное зажигание дуги происходит в зоне высокой электрической проводимости. Под действием потока плазмообразующего газа дуга в течение нескольких периодов тока (50 Гц) выдувается в сопло плазмотрона. Это обеспечивает высокую температуру на выходе из плазмотрона. Расстояние от сопла плазмотрона до золы древесных отходов составляло 40 см. Для направления потока плазмы на золу общей массы 8 кг применялась направляющая толстостенная металлическая труба. Мощность плазмотрона при расходе плазмообразующего воздуха 10 г/с составляла 70 кВт. С помощью двухлучевого пирометра измерялась температура на поверхности расплава золы (около 1350°C).

Образец расплавленной золы отбирался металлическим ковшом и помещался в холодную воду. Анализ охлажденного образца осуществлялся с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра, порошкового дифрактометра и сканирующей электронной микроскопии.

Оптически-возбуждаемые спиновые волны в системе двух динамически-связанных ферромагнитных слоев

Геревенков П. И.¹, Филатов Я.А.^{1,2}, Rushforth A.W.³, Бессонов В.Д.⁴, Телегин А.В.⁴,
Калашникова А.М.¹, Хохлов Н.Е.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

³University of Nottingham, UK

⁴ИФМ УрО РАН

e-mail: petr.gerevenkov@yandex.ru

Одним из перспективных направлений современного магнетизма является изучение прецессии намагниченности и распространяющихся спиновых волн для применения в устройствах спинтроники [1]. В связи с этим особый интерес представляют физические механизмы, позволяющие управлять параметрами прецессии намагниченности и возбуждаемых спиновых волн. Одним из Перспективных механизмов управления является эффект диссипативной связи в структурах типа псевдоспинового затвора ферромагнетик/немагнитный металл/ферромагнетик [2]. Недавно было показано, что в таких структурах возбуждение фемтосекундным лазерным импульсом приводит к формированию коллективных мод однородной прецессии намагниченности вследствие взаимной спиновой накачки между двумя ферромагнитными слоями [3].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния эффекта динамической связи на параметры оптически-индуцированных распространяющихся спиновых волн в структуре типа псевдоспинового затвора $\text{Fe}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}/\text{Cu}/\text{Fe}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}$. Ранее показано, что эпитаксиальные металлические плёнки ферромагнитного сплава галфенола (FeGa) характеризуются малым затуханием и значительной длиной распространения спиновых волн [4]. Для изучения влияния диссипативной связи между слоями галфенола использовались экспериментальные методики Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света и двухцветной оптической накачки-зондирования с пространственным и временным разрешением. Совмещение данных методик позволило получить информацию о некогерентных тепловых магнонах в отсутствие диссипативной связи и об оптически-возбуждаемых когерентных спиновых волнах, распространяющихся в условиях присутствия связи. Отличительной чертой работы является успешное совмещение данных методик и анализ параметров оптически возбуждаемых спиновых волн с высоким пространственным и временным разрешением.

В работе продемонстрировано, что две моды, наблюдаемые в эксперименте, имеют различный характер зависимости от азимутального угла между внешнем магнитным полем и кристаллографическими осями образца. В экспериментах Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния света без формирования диссипативной связи показано, что данные моды локализируются в отдельных слоях галфенола и азимутальные зависимости их частот хорошо описываются параметрами анизотропии соответствующего слоя галфенола. В экспериментах по оптическому возбуждению спиновых волн продемонстрировано, что при значениях азимутального угла, когда частоты различны, наблюдаются две ветви

дисперсии. При ориентациях образца, когда частоты двух ферромагнитных слоёв совпадают, на дисперсионной зависимости наблюдается одна ветвь во всём диапазоне возбуждаемых волновых векторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 19-52-12065, 20-32-70149).

Список литературы

1. С. А. Никитов, и др., Усп. физ. наук 185 1099 (2015).
2. В. Heinrich, et al., Phys. Rev. Lett. 90 187601 (2003).
3. А. Р. Danilov, et al., Phys. Rev. B 98, 060406(R) (2018).
4. N. E. Khokhlov, et al., Phys. Rev. Appl. 12, 044044 (2019).

Номер проекта РФФИ: 19-52-120652, 20-32-70149

Флексоэлектрический и флексодиэлектрический эффекты в тонких пластинах монокристалла SrTiO_3

Обозова Е. Д.¹, Полушина А.Д.¹, Сырников П.П.¹, Залесский В.Г.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: oed1990@gmail.com

Флексоэлектрический эффект обусловлен взаимной связью между полярным состоянием и неоднородной деформацией в диэлектрических средах. Этот электромеханический эффект в значительной степени проявляется при переходе к объектам микро- и наноскопического масштаба, что представляет интерес в фундаментальном аспекте при изучении физики наноструктур. Также эффект представляет интерес для феноменологической теории сегнетоэлектричества поскольку флексоэлектричество достигает наибольших величин в сегнетоэлектриках и родственных им материалах.

В настоящей работе проведено детальное изучение одновременно прямого и обратного флексоэлектрического эффекта в тонких монокристаллических пластинах SrTiO_3 . При этом акцент сделан на исследовании влияния на эффект: а) геометрического фактора (размерного эффекта) и б) нелинейных, гистерезисных и релаксационных процессов, сопровождающих эффект. Для прямого и обратного флексоэлектрического эффекта отдельно представлены зависимости поляризации от величины неоднородной деформации, при этом показан нелинейный характер этих зависимостей и релаксационные процессы. Показано, что нелинейность и релаксация обусловлены пластичностью монокристаллов SrTiO_3 . Одновременное исследование прямого и обратного эффектов позволило создать более полную картину явления.

В работе также представлены результаты исследования флексодиэлектрического эффекта, который отвечает за связь между диэлектрической проницаемостью и градиентами деформации.

Работа выполнена при частичной поддержке по проекту Президиума РАН «Физика конденсированных сред и материалы нового поколения».

Список литературы

1. Zubko P., Catalan G., Tagantsev A., Flexoelectric Effect in Solids, Rev. Mater. Res., 43, 387-421, 2013,

2. Румянцева Е. Д., Залесский В. Г., Обратный флексоэлектрический эффект в SrTiO_3 , ФТТ, 56, 1301-1303, 2014.

Electroconductivity of the sintered ceramic based on yttrium chromite multiferroic

Malcev D.D.^{1,2}, Sinelshchikova O.Yu.³, Popkov V.I.¹

¹Ioffe Institute, Russia

²Saint-Petersburg Mining University, Russia

³Institute of Silicate Chemistry, Russia

e-mail: dm110297@yandex.ru

YCrO_3 , one of the members of a rare earth orthochromites family, which has been successfully applied in the production of electrical resistance heater, has recently attracted a growing interest as a promising multiferroic material: a material with both coexisting ferroelectric and magnetic properties [1-4]. So far, the traditional solid-phase synthesis route is applied to obtain YCrO_3 ceramics [1, 5, 6]. However, there was a remarkable shift towards "soft chemistry" synthesis methods, among them solution combustion synthesis (SCS), which allows researchers to reduce the synthesis temperature and achieve a smaller particle size of both pre-ceramic powders and ceramic samples [7-9]. In this case, the electrical conductivity of the obtained ceramics strongly depends on the sintering regime and microstructure of the pre-ceramic powder. However, the relationship between the synthesis conditions of YCrO_3 -based powders and the associated electrophysical properties of the resulting ceramics have not been sufficiently uncovered.

The present work aimed to identify the formation mechanism of YCrO_3 by the glycine-nitrate route and to analyze the microstructure and electrical conductivity of the obtained ceramics.

YCrO_3 powder was obtained from a stoichiometric solution of $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ and glycine ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$) mixed with nitrates with a 3:3:10 molar ratios, correspondently. The mixture was then heated to evaporate water and achieve a homogeneous viscous form. Heating was continued until a spontaneous exothermic reaction began with the formation of finely dispersed YCrO_3 . The oxide was collected and grounded into a homogeneous powder, then was preheated to 600°C for 6 hours in the air to remove organic species. The desired perovskite powders were mixed with paraffin-based binding (Produkt KM 5026 from Zschimmer & Schwarz), pressed into pellets and sintered. The sintering of the sample occurred at atmospheric pressure in two stages: at a temperature of 600°C for 2 hours and then, for 20 hours at a temperature of 1500°C.

At all stages, the phase composition was controlled by XRD analysis. The BET method was used to determine the texture characteristics of the powders. The microstructure of the formed ceramics was studied using a scanning electron microscopy (SEM). For analyzing the electrical conductivity, platinum electrodes (PPI-2, manufactured by Elma-Pasta LLC) were applied to the end surfaces of ceramic samples by brazing at 1000°C. The direct current measurements were carried out by the two-contact method using a PM6306 RLC meter (1 V operating voltage) in the temperature range 25–1250°C, and impedance spectroscopy studies were performed using a Z-2000 impedance meter.

Crystallization of YCrO_3 firstly occurs at the combustion stage without the formation of intermediate phases. The specific surface area of the powders was $14.3 \pm 0.1 \text{ m}^2/\text{g}$ and the size of the CSR calculated according to the Scherer formula was 57.4 nm. The SEM of polished

samples shows that the average grain size after final sintering was nearly 1 μm , and shows a predominantly regular multifaceted shape with clear boundaries. The bulk density is about 53% of the theoretical X-ray density. EDX analysis yielded a Y/Cr ratio close to the desired stoichiometry (~ 0.94).

The electrical conductivity of the obtained ceramics in a low-temperature region (up to 350°C) is lower than the published data ($\sigma_{\text{dc}} = 4 \cdot 10^{-7}$ S/cm at 200°C) which is probably due to its high porosity. The temperature dependence of the conductivity is characterized by the presence of three intervals with different activation energies. Up to the temperature of the ferroelectric phase transition (200°C), $E_a \approx 0.48$ eV, then increases to 0.94 eV and keeping this value up to 350°C. For the high-temperature region, $E_a \approx 0.74$ eV. At 1000°C, $\sigma_{\text{dc}} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ S/cm.

Based on the results, we concluded that considered ceramics can be potentially used as a permeable high-temperature electrically conductive material.

Список литературы

1. Mall A.K., Garg A., Gupta R. Dielectric Relaxation and ac Conductivity in Magnetolectric YCrO_3 Ceramics: A Temperature Dependent Impedance Spectroscopy Analysis // Journal of the European Ceramic Society. 2018, V.38, N16, P.5359-5366 <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.08.024>
2. Judin V.M., Sherman A.B. Weak ferromagnetism of YCrO_3 // Solid State Communications, 1966. V. 4, p. 661-663
3. Санина В.А., Ханнанов Б.Х., Головенчиц Е.И., Щеглов М.П. Электрическая поляризация в YCrO_3 , индуцированная локальными полярными областями магнитной и структурной природы // Физика твердого тела, 2019, Т.61, В.1 С.95-103. DOI: 10.21883/FTT.2019.01.46899.213
4. Oliveira G.N.P., Machado P., Pires A.L., Pereira A.M., Araújo J.P., Lopes A.M.L. Magnetocaloric effect and refrigerant capacity in polycrystalline YCrO_3 // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2016. V.91, P.182-188 <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2015.12.012>
5. Su Y., Guo J., Cheng X., Feng Sh., Yang Y. Intrinsic anharmonicity effect in YCrO_3 : Pressure and temperature dependent Raman spectra studies // Journal of Alloys and Compounds. 2019. V.805, P.489-495 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.087>
6. Гордон В.Г., Реков А.И., Спиридонов Э.Г., Тимофеева Н.И. Электросопротивление LaCrO_3 , NdCrO_3 , SmCrO_3 и YCrO_3 при высоких температурах // Неорганические материалы. 1971. Т.7, №6. С.1084-1085
7. Oliveira G.N.P., Machado P., Pires A.L., Pereira A.M., Araújo J.P., Lopes A.M.L. Magnetocaloric effect and refrigerant capacity in polycrystalline YCrO_3 // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2016. V.91, P.182-188 <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2015.12.012>
8. Durán A., Meza F.C., Arizaga G.G.C. Hydroxide precursors to produce nanometric YCrO_3 : Characterization and conductivity analysis // Materials Research Bulletin, 2012. V.47. N.6, P.1442–1447. doi:10.1016/j.materresbull.2012.02.043
9. Durán A., Arévalo-López A.M., Castillo-Martínez E., García-Guaderrama M., Moran E., Cruz M.P., Fernández F., Alario-Franco M.A. Magneto-thermal and dielectric properties of biferroic YCrO_3 prepared by combustion synthesis // Journal of Solid State Chemistry. 2010. V.183, N8, P.1863-1871 <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2010.06.001>

Исследование проводимости, диэлектрической проницаемости и поляризации в монокристаллах $\text{PbCo}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$

Полушина А. Д.¹, Обозова Е.Д., Петрова Н.С., Щеглов М.П., Лушников С.Г.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: nasa96@yandex.ru

Семейство сложных перовскитов с общей формулой $\text{AB}'\text{B}''\text{O}_3$ и твердых растворов на их основе насчитывает более 1500 соединений, которые демонстрируют широкий спектр физических состояний: сегнетоэлектрики, релаксорные сегнетоэлектрики, антисегнетоэлектрики и т.д. [1]. Особый интерес вызывают составы, в которых один из ионов в В-позиции обладает переменной валентностью и является магнитоактивным. Некоторые соединения из этой группы являются мультиферроиками, в некоторых наблюдается фазовое расслоение [2].

В данной работе представлены результаты исследования физических свойств малоизученных монокристаллов $\text{PbCo}_{1/3}\text{Ta}_{2/3}\text{O}_3$ (РСТ). Согласно первым исследованиям [3] в РСТ обнаружены широкие максимумы в температурной зависимости диэлектрической проницаемости, в окрестности температуры 133 К. Это дало основание включить РСТ в семейство релаксорных сегнетоэлектриков. При этом данные о зависимости температурного смещения максимумов от частоты электрического поля не приведены, а исследования поляризационного отклика на внешнее электрическое поле оказалось невозможным из-за малой ширины петель гистерезиса. Поэтому температурное поведение диэлектрического отклика и поляризации требуют детальных исследований.

В работе представлены результаты исследований кристаллической структуры РСТ с помощью рентгеноструктурного анализа, температурных зависимостей диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 12 Гц до 100 кГц и АС- и DC -проводимости интервале температур 77-700 К. Полярное состояние кристалла РСТ исследовалось методом термостимулированной деполяризации (ТСД).

Проведенные исследования показали, что структура кристалла РСТ в окрестности комнатных температур является кубической. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости демонстрирует два широких максимума: со слабой частотой зависимостью в области 175 К и со значительной частотной дисперсией в окрестности 350 К. Результаты анализа данных по АС- и DC- проводимости показали, что энергия активации носителей заряда составляет 0.45 eV. Исследования кристалла РСТ с помощью ТСД показывают, что в области температуры 230 К имеется максимум тока деполяризации, связанный с остаточной поляризацией, существующей при температуре ниже 240 К. Результаты исследований обсуждаются в рамках модели фазового расслоения, предложенной для кристаллов PCN [2]. Можно предположить, что в области низких температур, в результате фазового расслоения возникают полярные области с преимущественным содержанием Co^{2+} и Co^{3+} . Эти области разрушаются при увеличении температуры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18 -502-51050).

Список литературы

1. Smolensky G.A., *Ferroelectrics and Related Materials*, NY: Academic Press; 1981.
2. Ханнанов Б.Х., Залесский В.Г., Головенчиц Е.И., Санина В.А., Смирнова Т.А., Щеглов М.П., Боков В.А., Лушников С.Г. Разделение фаз и зарядовые состояния в релаксорном сегнетоэлектрике $\text{PbCo}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ ЖЭТФ, т.157, стр. 523-531, 2020.
3. В.А.Боков, И.Е.Мыльникова, ФТТ, т.2, с. 2718, 1960

Изменения параметров лазерно-индуцированных магнитостатических волн, распространяющихся в неоднородно нагретой пленке галфенола

Филатов Я. А.^{1,2}, П.И. Геревенков¹, А. W. Rushforth³, А.М. Калашникова¹, Н.Е. Хохлов¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²Университет ИТМО

³University of Nottingham, UK

e-mail: yaroslav.filatov@metalab.ifmo.ru

В современном мире вопрос усовершенствования способов передачи, обработки и хранения информации является широко обсуждаемым, в связи с чем бурно развивается магнотроника как альтернатива электронике. Предметом изучения магнотроники являются физические процессы, лежащие в основе распространения спиновых волн в магнитных структурах [1]. Кроме того, развиваются новые подходы к управлению характеристиками сверхбыстрой магнитной динамики на фемтосекундных временных масштабах с помощью лазерных импульсов, применяемых в том числе и при исследовании спиновых волн [2].

В представляемой работе, являющейся развитием исследования [3], изучается влияние градиента температуры на параметры распространяющихся спиновых волн в тонких пленках ферромагнитного металлического сплава галфенола ($\text{Fe}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}$). Данный материал выбран по причине существования в нем долгоживущих прецессии намагниченности и спиновых волн, параметры которых зависят от ориентации внешнего магнитного по отношению к осям магнитокристаллической анизотропии. Также, параметры анизотропии имеют температурную зависимость, что приводит к изменению характеристик спиновых волн за пределами области возбуждения.

Для возбуждения и детектирования поверхностных магнитостатических волн в пленке галфенола толщиной 20 нм применялась методика двухцветной накачки-зондирования с временным и пространственным разрешением. На образец, помещенный в магнитное поле, направленное в плоскости пленки, с использованием микрообъективов фокусировались импульсы накачки и зондирования с центральными длинами волн 750 и 1050 нм, соответственно, и длительностью 120 фс. Пространственное сканирование образца реализовано за счет размещения одного из микрообъективов на пьезотрансляторе. Временное разрешение достигнуто за счет размещения уголкового отражателя в оптическом пути импульса накачки на моторизованном линейном трансляторе, изменяющего временную задержку между импульсами накачки и зондирования. Регистрация распространяющихся спиновых волн проходила за счет измерения магнитооптического полярного эффекта Керра

В результате проведенных экспериментов показано, что при распространении волн за пределы области возбуждения их спектр становится уже. Это происходит из-за того, что разогрев образца в области возбуждения приводит к смещению дисперсионной кривой спиновых волн в область более высоких частот при ориентации внешнего магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания и в область низких частот при ориентации поля

вдоль оси легкого намагничивания. Таким образом, при удалении спиновых волн от нагретой области возбуждения их спектр становится уже за счет уменьшения диапазона частот, соответствующих волновым векторам, возбуждаемым ограниченным в пространстве импульсом накачки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-02-00824) и фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Список литературы

1. С. А. Никитов, и др., Усп. физ. наук 185, 1099 (2015).
2. T. Satoh, et al. Nat. Photon. 6, 662 (2012).
3. N.E. Khokhlov et al. Phys. Rev. Appl. 12, 044044 (2019)

Номер проекта РФФИ: 18-02-00824

Структурные и диэлектрические свойства керамических и плёночных мультиферроиков на основе $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$

Мыльников И. Л.¹, Буровихин А.П.¹, Еськов А.В.², Дедык А.И.¹, Павлова Ю.В.¹, Белявский П.Ю.¹, Семёнов А.А.¹

¹СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

²Университет ИТМО

e-mail: mylnikov.il@gmail.com

Композитные керамики и плёночные структуры на основе твёрдого раствора $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ (BST), легированные 5, 10 и 15 ат.% Mn считаются жизнеспособными мультиферроиками [1, 2]. Они имеют большой потенциал для развития магнитоэлектрических [3], магнитооптических [4] и мультикалорических [2] устройств для твердотельных систем. охлаждения.

Керамики на основе титана бария-стронция изготавливались с помощью твердофазного термического синтеза в атмосфере воздуха [5]. Синтез керамик проводился при температурах 1350°C, 1400°C и 1450°C. Изготовленные керамики BST имели высокую относительную плотность (до 98%). Толщина керамики варьировалась от 0,35 мм до 0,9 мм. Пленки BST наносились методом ВЧ магнетронного распыления и имели толщину $h = 0,5 - 1,5$ мкм. При изготовлении плёнок использовались различные подложки: сапфир ($\alpha-Al_2O_3$), алюминат лантана (LAO), поликор, гадолиний-галлиевый гранат (GGG). На образцы наносились медные электроды для формирования конденсаторных структур и измерения диэлектрических свойств.

Проведены рентгеноструктурные и рентгенофотоэлектронные исследования образцов. Для плёночных образцов проведён анализ деформационных напряжений.

Проведено сравнение диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, температуры фазового перехода и проводимости для пленок и керамик, построены температурные зависимости диэлектрической проницаемости. Температурные измерения диэлектрической проницаемости проводились с помощью прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A. Образец закреплялся в специальном держателе, помещенном в климатическую камеру. Измерения проводились в температурном диапазоне от -170 до 140 градусов Цельсия. Данные зависимости измерены в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц. Исследовано влияние температуры спекания на диэлектрические свойства и

кристаллическую структуру керамик. Сделаны выводы относительно влияния подложки на диэлектрические характеристики пленок BST.

Было обнаружено, что фазовый переход в нелегированной керамике BST относится к фазовым переходам первого рода, что было подтверждено дополнительными измерениями теплоемкости. Легирование Mn приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости, уширению и сдвигу кубического тетрагонального фазового перехода в сторону более низких температур по сравнению с образцами чистого BST.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда: грант № 19-79-10074.

Список литературы

1. Cheong, S.-W.; Mostovoy, M. Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity. *Nat. Mater.* 2007, 6, 13–20, doi:10.1038/nmat1804
2. Y. Hou, J. Li, J. Ding, T. Ye, and R. Liang, “Giant electrocaloric response in compositional manipulated BaTiO₃ relaxor–ferroelectric system”, *J. Appl. Phys.*, vol. 127, p. 064103, 2020.
3. Nan, C.-W.; Bichurin, M.I.; Dong, S.; Viehland, D.; Srinivasan, G. Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics* 2008, 103, 031101, doi: 10.1063/1.2836410
4. *Integrated Multiferroic Heterostructures and Applications*; Liu, M., Zhou, Z., Eds.; John Wiley & Sons, 2019, ISBN 978-352-734-177-1.
5. Czernuszewicz, A.; Kaleta, J.; Lewandowski, D. Multicaloric effect: Toward a breakthrough in cooling technology. *Energy Conversion and Management* 2018, 178, 335–342, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.025.

Исследование временных и частотных характеристик электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах

Анохин А. С.¹, Еськов А. В.¹, Пахомов О. В.¹, Семенов А. А.²

¹Университет ИТМО

²СПбГЭТУ ЛЭТИ

e-mail: asanokhin@itmo.ru

Научно-техническое направление, связанное с разработкой и широким внедрением в практику компактных, экологически безопасных, экономичных и высоконадежных тепловых насосов, и охладителей, работающих как в комнатных условиях, так и в области криогенных температур, чрезвычайно актуально для современного общества. Особый интерес представляет разработка твердотельных охлаждающих и термостабилизирующих устройств [1].

Одной из наиболее перспективных технологий твердотельного преобразования тепла является использования электрокалорического эффекта в твердотельных структурах. Во многих лабораториях мира ведутся исследования, направленные на разработку электрокалорических охладителей и преобразователей, новых материалов с большими величинами электрокалорического эффекта, эффективного термодинамического цикла работы теплового электрокалорического преобразователя [2-3].

В большинстве работ исследование электрокалорического эффекта выполняется или с помощью прямых измерений в квазиadiaбатических условиях, или с помощью косвенных методов, основанных на расчете электрокалорического эффекта из температурных зависимостей электрической поляризации [4]. Однако, во всех известных авторам работах не учитываются временные процессы, происходящие в электрокалорическом материале в процессе измерений. В данной работе показано, что при разработке новых перспективных электрокалорических преобразователей тепловой энергии и циклов их работы необходимо учитывать временные и частотные характеристики электрокалорического эффекта в электрокалорических материалах. В работе исследуются влияние частоты и скважности управляющего сигнала на величину электрокалорического отклика в активных электрокалорических элементах. Экспериментальные исследования временных и частотных характеристик величины электрокалорического отклика были проведены в керамических образцах титаната бария и в образцах на основе твердых растворов магнониобата свинца – титаната свинца и титаната бария-стронция. Показано влияние периода управляющего сигнала на величину электрокалорического отклика. Проведено исследование влияние скважности управляющего сигнала на величину электрокалорического отклика при поляризации и деполяризации сегнетоэлектрического емкостной структуры. Показана возможность оптимизации термодинамического цикла и режимов работы твердотельного электрокалорического преобразователя энергии при учете временных и частотных характеристик электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах.

Список литературы

1. Ozbolt M., Kitanovski A., Tusek J., Poredos A. // International journal of refrigeration. 2014. V. 40. P. 174-188.
2. Valant M. // Progress in Materials Science. 2012. V. 57(6). P. 980-1009.
3. Karmanenko S., Semenov A., Dedyk A., Es'kov A., Ivanov A., Beliaevskiy P., Pakhomov O. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling. In *Electrocaloric Materials*. // Berlin Heidelberg, Springer. 2014. P. 183-223.
4. Moya, X., Sohini Kar-Narayan, and Neil David Mathur. Caloric materials near ferroic phase transitions // *Nature materials*. 2014. V. 13(5). P. 439-450.

АТОМНАЯ ФИЗИКА И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Способ и устройство динамического управления характеристиками преобразования спектрометрических трактов многоканальных систем регистрации заряженных частиц

Тубольцев Ю. В.¹, Богданов А. А.¹, Чичагов Ю. В.¹, Ерёмин В. К.¹, Ерёмин И. В.¹, Вербицкая Е. М.¹

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе

e-mail: tuboltsev@mail.ioffe.ru

В ядерной физике, астрофизике и физике высоких энергий в настоящее время широко используются позиционно-чувствительные системы для регистрации траекторий и энергий заряженных частиц. Разработки в этом направлении ведутся и ФТИ им. А.Ф.Иоффе. В работах [1-3] описаны многоканальные системы регистрации заряженных частиц, основу которых составляют спектрометрические тракты, использующие стриповые детекторы и специализированные микросхемы большой степени интеграции ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) фирмы IDE типа VA140 и IDE1140 [4].

Как показал анализ таких систем, проведённый в работе [2], спектрометрические тракты имеют разные характеристики преобразования. Это обусловлено тем, что амплитудный диапазон сигналов, поступающих со спектрометрических трактов на вход ADC с одной стороны определяется разными пьедесталами, на которых находятся сигналы, с другой стороны – их разными коэффициентами преобразования.

В данной работе предложен способ и устройство динамического управления характеристиками преобразования спектрометрических трактов многоканальных систем регистрации заряженных частиц, построенных на базе специализированных микросхем большой степени интеграции, по структуре совпадающих с IDE1140. Управление характеристиками преобразования осуществляется в процессе работы устройства путём авторегулирования напряжения смещения и коэффициента усиления масштабирующего усилителя.

В работе приводится схема устройства. Показано, что переходной процесс корректировки характеристик канала регистрации составляет не более 30 ns, что позволяет производить считывание его выходного сигнала как с максимальной скоростью для IDE1140, – в течение 100 ns, так и с оптимальной – в течение 300 – 500 ns.

Предложенный способ и устройство позволяют использовать весь динамический диапазон аналого-цифрового преобразователя, корректировать температурный дрейф для каждого канала на аппаратном уровне в процессе работы устройства и, при необходимости, осуществлять измерение отдельных участков амплитудного диапазона выбранных спектрометрических трактов с более высокой точностью.

Список литературы

1. Zhang Fei, Fan Rui-Rui, Peng Wen-Xi, Dong Yi-Fa, Gong Ke, Liang Xiao-Hua, Liu Ya-Qing and Wang Huan-Yu. Readout electronics of silicon detectors used in space cosmic-ray charges measurement. // Chinese Physics C, 2013
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1307/1307.3041.pdf>
2. Da-Li Zhang, Hong Lu, Huan-Yu Wang, Xin-Qiao Li, Yan-Bing Xu, Zheng-Hua An, Xiaoxia Yu, Hui Wang, Feng Shi, Ping Wang, Xiao-Yun Zhao. Beam test of CSES silicon strip detector module. <https://arxiv.org/pdf/1609.00444>
3. Тубольцев Ю.В., Богданов А.А., Ерёмин И.В., Чичагов Ю.В., Фомичев А.С., Киселёв О.А., Костылева Д.А., Безбах А.А. Многоканальная спектрометрическая система регистрации сигналов со стриповых полупроводниковых детекторов // ПТЭ. 2019. Вып. 6, С. 39-45. <https://doi.org/10.1134/S0032816219060168>
4. IDE1140: 64 Channel sample-and-hold and multiplexer output; <https://ideas.no/products/ide1140/>

Определение электронной плотности образцов с использованием данных двухэнергетической компьютерной томографии

Григорьева А.А.¹, Булавская А.А.¹, Милойчикова И.А.^{1,2}, Черепенников Ю.М.¹, Стучебров С.Г.¹

¹ТПУ

²НИИ онкологии Томского НИМЦ РАН

e-mail: anngrigorievabr@gmail.com

В современной медицинской практике планирование сеансов облучения является важной задачей, обеспечивающей качество проведения процедур лучевой терапии. При проведении дозиметрического планирования радиотерапевтических сеансов одним из основных процессов, определяющих точность расчета дозы, является преобразование индексов Хаунсфилда тканей пациента в электронную плотность. Индексы Хаунсфилда могут отличаться при работе на разных томографах и даже изменяться при разных режимах работы одной установки, а электронная плотность является физической характеристикой вещества. Такое преобразование обычно выполняется с использованием калибровочных кривых, полученных с помощью специальных фантомов, имеющих вставки с заданной электронной плотностью. Однако, индексы Хаунсфилда и электронная плотность вещества не связаны определенным соотношением, что не редко приводит к значительному различию получаемых калибровочных кривых. В работе [1] показана возможность определения электронной плотности образцов на основе данных двухэнергетической компьютерной томографии.

Ранее авторами была показана возможность использования технологий трехмерной печати для создания изделий для формирования полей облучения при проведении процедур лучевой терапии [2]. Продолжением этой работы является определение электронной плотности образцов, изготовленных методами трехмерной печати. В представленной работе с использованием калибровочного фантома будут получены данные, позволяющие преобразовать индексы Хаунсфилда в электронную плотность, с использованием результатов, полученных при помощи двухэнергетической компьютерной томографии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

Список литературы

1. Saito M., Sagara S. A simple formulation for deriving effective atomic numbers via electron density calibration from dual-energy CT data in the human body // *Medical physics*. – 2017. – V. 44. – №. 6. – P. 2293-2303.
2. Miloichikova I. et al. Feasibility of clinical electron beam formation using polymer materials produced by fused deposition modeling // *Physica Medica*. – 2019. – V. 64. – P. 188-194.

Production and reconstruction of short-lived $\rho(770)$, $K^*(892)0$, $\phi(1020)$ and $\Lambda(1520)$ resonances as a function of centrality and energy in Au+Au collisions at NICA

Kotov D.O.¹, Ivanishchev D.A.¹, Malaev M.V.¹, Riabov V.G.^{1,2}, Riabov Yu.G.¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

²National Research Nuclear University MEPhI

e-mail: kotov_do@npni.nrcki.ru

The short-lived resonances have proved to be very useful in the study of heavy-ion collisions at SPS, RHIC, and the LHC. Properties of these particles measured in dominant hadronic decay channels carry a wealth of information about the hadron chemistry and reaction dynamics. Resonances containing one or two strange quarks contribute in the study of the strangeness enhancement phenomenon predicted as a signature of the phase transition to quark-gluon plasma in heavy-ion collisions. Resonance integrated and differential yields are sensitive to the hadron rescattering and regeneration in the hadronic phase.

The resonance production has never been studied in detail in heavy-ion collisions at NICA energies. In this presentation, we review the expected properties of the resonances and their sensitivity to different stages of Au+Au collisions in the range of energies $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ GeV. Furthermore, we present results of feasibility studies for reconstruction of $\rho(770)$, $K^*(892)0$, $\phi(1020)$ и $\Lambda(1520)$ resonances in the MPD experimental setup. The results are presented as a function of collision centrality.

This work was funded by RFBR according to the research project №18-02-40038.

Номер проекта РФФИ: 18-02-40038

K*(892) meson measurements in Cu+Au collisions at 200 GeV and U+U collisions at 192 GeV

Борисов В. С.¹, Бердников А.Я.¹, Бердников Я.А.¹, Котов Д.О.¹, Митранков Ю.М.¹

¹СПбПУ

e-mail: vl-borisof@yandex.ru

Quark-Gluon plasma (QGP) is the state of matter in which partons are no longer confined to the boundaries of a hadron, but rather act as free particles [1]. Studying the properties and evolution of the QGP is one of the main goals in modern heavy ion physics.

One of the first proposed signatures of the QGP formation in heavy ion collisions was strangeness enhancement [2], which consists in enhanced yields of particles with strange quarks comparing to yields of particles with first generation (u, d) quarks. Due to strange quark content K* meson is a good probe for the study of QGP formed in heavy-ion collisions. K*-meson production was previously measured by PHENIX [3] in symmetric Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV [4]. To continue the study of the QGP properties, K*-meson production in asymmetric Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and spherically asymmetric uranium nuclei at $\sqrt{s_{NN}} = 192$ GeV was performed.

This report presents invariant transverse momentum spectra and nuclear modification factors of K*-mesons measured in Cu+Au collisions at the energy of 200 GeV and U+U collisions at the energy of 192 GeV.

In central Cu+Au and U+U collisions in the intermediate transverse momentum range, K*-meson yields are less suppressed than the yields of non-strange mesons such as π^0 , η , ω and [5], which might indicate that additional particle production mechanisms are involved in K*-meson production. Comparison with previously obtained PHENIX data on K*-meson production in symmetric Cu+Cu systems at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV has been carried out. Production of K*-mesons in Cu+Cu, Cu+Au, and U+U collisions scales with number of participants and seems to depend on nuclear overlap size, but not on its geometry.

Список литературы

1. Adcox, K. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration. Nuclear Physics A. 2005. Volume 757, Issue 1-2, Pages 184-28
2. A. Adare et al., Nuclear modification factors of phi mesons in d+Au, Cu+Cu and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, Physical Review C 83(2) (2011) 024909
3. A. Adare et al, Measurement of K_S^0 and K^{*0} in p+p, d+Au, and Cu + Cu collisions at $s_{NN} = 200$ GeV, Phys. Rev. C 90, 054905 (2014)
4. K. Adcox et al, PHENIX detector overview, Nucl. Instrum. Meth. A 499 (2003)
5. I. Mitrانков, Scaling properties of high-pT light hadrons from small to large systems by PHENIX. Proceedings of Science, 2018, Volume 345

Разработка численной модели терапевтического электронного пучка клинического линейного ускорителя

Булавская А. А.¹, Григорьева А.А.¹, Милойчикова И.А.^{1,2}, Черепенников Ю.М.¹, Стучебров С.Г.¹

¹НИТПУ

²НИИ онкологии Томского НИМЦ РАН

e-mail: bulavskaya@tpu.ru

Электронные пучки широко используются при проведении лучевой терапии поверхностных и неглубоко залегающих новообразований. Особенности взаимодействия электронов с веществом обеспечивают высокий градиент падения дозы на глубине, что позволяет уменьшить воздействие на здоровые ткани, лежащие за опухолью. Однако, с повышением требований к точности доставки дозы необходимо применять дополнительные устройства формирования поля облучения, такие как болусы, компенсаторы и коллиматоры. Авторами [1] предложено использовать возможности современных технологий трехмерной печати для изготовления этих элементов. Для разработки геометрии таких объектов и оценки сформированного поля облучения необходимо проводить предварительное численное моделирование. Метод Монте-Карло широко признан как наиболее точный при расчете дозных распределений электронных пучков клинических линейных ускорителей [2].

В данной работе представлены результаты разработки численной модели электронного пучка клинического линейного ускорителя. Расчет проводится с использованием инструментария Geant4. Электронный пучок с номинальной энергией 6 МэВ проходит через схему формирования поля ускорителя и падает на водный фантом. Геометрия терапевтической головки аппарата представляет собой систему двух фольг, применяющуюся для уширения электронного пучка, и набор коллиматоров, позволяющий формировать необходимые размеры полей. Дополнительно в моделировании присутствует металлический аппликатор, позволяющий снизить вклад рассеяния электронов на воздухе при выводе пучка из головки аппарата.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

Список литературы

1. Красных А. А. и др. Сравнение рассеяния электронного пучка на краях коллиматоров из пластика и металла //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2019. – Т. 46. – №. 7. – С. 15-20.
2. Antolak J. A., Bieda M. R., Hogstrom K. R. Using Monte Carlo methods to commission electron beams: A feasibility study //Medical physics. – 2002. – V. 29. – №. 5. – P. 771-786.

Comparative analysis of proton production as a function of quark content and collision geometry

Ларионова Д. М.¹, Бердников А.Я.¹, Бердников Я.А.¹, Котов Д.О.¹, Митранков Ю.М.¹

¹СПбПУ

e-mail: dashalario@gmail.com

Quark gluon plasma (QGP) is one of the most discussable object in modern particle physics [1]. One of the ways to study QGP is to measure production of different particles in various relativistic ion collisions.

Nuclear modification factors (R_{AB}) for protons were previously measured in symmetric Au+Au [2] collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Asymmetric Cu+Au system in comparison with Au+Au results allows to study the influence of collision geometry on proton production.

This report presents invariant transverse momentum (p_T) spectra, R_{AB} values of protons obtained in Cu+Au collisions at the energy of $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and the results of comparative analysis of proton (three valence quarks) and φ , π^0 -mesons (quark antiquark pairs) [3] production as a function of quark content and collision geometry (Cu+Au and Au+Au [2]).

The report shows: – that for Cu+Au and Au+Au collisions R_{AB} values for protons are consistent at similar number of participants. It seems that proton production scales with the average size of the nuclear overlap region and do not depends on the details of its shape. – for the most central Cu+Au collisions proton yields are enhanced ($R_{AB} > 1$) at $p_T > 2$ GeV/c, while φ -mesons yields are suppressed. Observed difference in R_{AB} values for protons, φ and π^0 -mesons disappears from central to peripheral collisions.

Список литературы

1. Adcox K et al 2005 Nucl. Phys. A 757 184-283;
2. Adare A. 2013 Phys. Rev. C 88 024906
3. Adare A. et al 2011 Phys. Rev. C. 83 024909

Фрактальные границы песчаных лавин

Бузыкин А. Г.¹, Кузнецов И.А.², Ипатов А.Н.³, Паршин Д.А.³

¹СПбПУ Петра Великого

²Лицей «ФТШ» им. Ж.И. Алфёрова Академического университета

³СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

e-mail: Buzykin7@gmail.com

В 1977 году Бенуа Мандельброт выдвинул свою основополагающую идею о том, что многие природные структуры по сути являются фракталами с присущими им свойствами самоподобия или масштабной инвариантности [1]. Это объясняло широкую распространенность в природе степенных закономерностей, описывающих временные и пространственные корреляции между различными параметрами фрактальных структур. Однако замечательное наблюдение Мандельброта не объясняло саму причину появления в окружающем нас мире многочисленных фрактальных форм. Почему природа часто предпочитает именно фрактальную геометрию оставалось загадкой. Ситуация прояснилась через 10 лет в 1987 году после появления на свет известной работы Bak, Tang и Wiesenfeld [2]. Согласно этой работе во многих открытых (незамкнутых) диссипативных системах возможно образование самоорганизованного критического состояния (self organized criticality) в широком диапазоне значений внешних параметров. Его создание не требует тонкой настройки, как, например, при фазовом переходе 2-го рода, который происходит только тогда, когда температура равна критической. При наличии медленного притока энергии и (или) частиц, система самостоятельно дрейфует в это состояние и остается там иногда довольно длительное время. Но поскольку это критическое состояние находится на пороге устойчивости, оно (при продолжающемся непрерывном воздействии на систему) время от времени теряет свою устойчивость, образуется "лавиная" (большая или маленькая) и система возвращается назад в более устойчивое состояние. Затем она опять медленно дрейфует в сторону неустойчивого критического состояния и ситуация повторяется снова и снова. Простейшей моделью такой системы является куча песка, в которую медленно добавляются песчинки (sandpile model). При критическом угле наклона, добавление в кучу одной песчинки может вызвать лавину из небольшого числа песчинок, или гигантскую лавину из многих десятков и сотен песчинок. Распределение лавин по размерам имеет степенной характер (закон Гутенберга-Рихтера), а пространственные границы лавин не являются гладкими и имеют сильно изрезанную фрактальную структуру. Идея самоорганизованной 2 критичности оказалась чрезвычайно плодотворной. Она позволила объяснить не только причину существования фракталов и степенных закономерностей в окружающем нас мире, но и многие другие ранее неизученные природные явления [3, 4], а также разнообразные эффекты в физике твердого тела, в частности в высокотемпературной сверхпроводимости [5, 6], теории прочности [7], и многие другие. В настоящей работе в рамках модели песчаных лавин, предложенной в [2], мы вычисляем фрактальную размерность их границ в двумерном и трехмерном случаях, на разных типах решеток, а также обсуждаем некоторые другие их временные и пространственные характеристики.

Проводится сопоставление полученных результатов с имеющимися теоретическими и численными расчетами [8, 9].

Список литературы

1. B.B. Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance and Dimension*, Freeman, San Fransisco, 1977.
2. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., *Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise*, *Phys. Rev. Lett.*, 59, 381-384, 1987.
3. Armin Bunde, Shlomo Havlin, *Fractals in Science*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1994. [4] Didier Sornette, *Critical Phenomena in Natural Sciences, Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder: Concepts and Tools*, Springer, Heidelberg, 2006.
4. S. Field, J. Witt, F. Nori, X. Ling, *Superconducting Vortex Avalanches*, *Phys.Rev.Lett.*, 74, 1206- 1209, (1995).
5. С.М. Ишикаев, Э.В. Матизен, В.В. Рязанов, В.А. Обознов, А.В. Веретенников, *Магнитные свойства двумерных джозефсоновских сеток. Самоорганизованная критичность в динамике магнитного потока, Письма в ЖЭТФ* 72 (2000) 39-43.
6. В.Л. Гиляров, ФТТ 808 *Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов*, (2005).
7. A.A.Saberi, S.Moghimi-Araghi, H. Dashti-Naserabadi, and S. Rouhani, *Direct evidence for conformal invariance of avalanche frontiers in sandpile models*, *PHYSICAL REVIEW E* 79, 031121 (2009).
8. H. Dashti-Naserabadi, and M. N. Najafi, *Statistical investigation of the cross sections of wave clusters in the three-dimensional Bak-Tang-Wiesenfeld model*, *PHYSICAL REVIEW E* 91, 052145 (2015).

Изучение структурных переходов в расплавах Fe-Mn на основе расчета их электросопротивления и вязкости

Синицин Н. И.¹, Чикова О.А.^{1,2}

¹УрФУ

²УрГПУ

e-mail: n.i.sinitsin@urfu.ru

Сплавы Fe-Mn нашли широкое практическое применение в качестве высокопрочных конструкционных материалов [1]. Марганец – легирующий элемент для TWIP и TRIP-сталей, обеспечивающий упрочнение [2]. Уникальное сочетание прочности и пластичности марганцовистых сталей объясняется конкуренцией между различными механизмами упрочнения: появлением мартенсита деформации $\gamma(\text{fcc}) \rightarrow \varepsilon(\text{hcp}) \rightarrow \alpha'(\text{bcc})$ и образованием двойников [3]. Выяснение физической природы упрочнения сплавов Fe-Mn предполагает изучение условий их кристаллизации и кинетических свойств в жидком состоянии. Известно, что жидкие многокомпонентные металлические сплавы в определенном интервале температур и концентраций являются многофазными системами и представляют собой химически и структурно микронеоднородные среды. Экспериментальное и теоретическое изучение эффективных значений кинетических свойств металлических расплавов (вязкости, электросопротивления) позволяет определить температуру, при нагреве до которой происходит структурный переход от гетерогенного расплава к расплаву со статистическим распределением атомов [4]. Представления о физической природе аномалий

температурных зависимостей кинетических свойств металлических расплавов (вязкости, электросопротивления) также основаны на том, что они вызваны изменением структуры расплава – структурными переходами – разрушением микронеоднородностей [5-8]. Теоретическое изучение температурных зависимостей удельного электросопротивления и кинематической вязкости жидких сплавов Fe-Mn являлось задачей нашей работы.

Проведен расчет эффективных значений электрического сопротивления и вязкости расплава Fe-50ат.%Mn при температурах от 1720 до 2770К. Расплав Fe-50ат.%Mn понимался как гетерогенная двухфазная система, в которой кластеры атомов железа случайным образом распределены в среде атомов марганца. В качестве метода моделирования структуры гетерогенного расплава применялся метод элементарной ячейки, использовались геометрические модели изолированных и взаимопроникающих включений [9-13]. Обнаружен структурный переход от гетерогенного расплава к расплаву со статистическим распределением атомов железа и марганца при 1860 К (по результатам расчета электросопротивления) и при 2040 К (по результатам расчета вязкости). Теоретически изучена возможность перколяционного перехода [14] в гетерогенных расплавах Fe-Mn. Установлено предельное значение отношения электросопротивлений среды и включения, при котором возможен перколяционный переход. Обнаружено также наличие порога протекания как отношения вязкостных сопротивлений среды и включения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90198

Список литературы

1. Власов В.И., Комолова Е.Ф. Литая высокомарганцовистая сталь Г13Л. Свойстваипроизводство. – М.: Машгиз. 1963. – 195С.
2. Idrissi H., Renard K., Ryelandt L., Schryvers D., Jacques P.J. On the mechanism of twin formation in Fe-Mn-C TWIP steels. *Acta Materialia*, Vol. 58, 2010. pp. 2464 – 2476.
3. So K.H., Kim J.S., Chun Y.S., Park K.-T., Lee Y.-K., Lee C.S. Hydrogen delayed fracture properties and internal hydrogen behavior of a Fe-18Mn-1.5Al-0.6C TWIP steel. *ISIJ International*, Vol. 49, No. 12, 2009. pp. 1952 – 1959.
4. Вилсон Д. П. Структура жидких металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 247 с.
5. Li M.Y., Zhang Y.X., Wu C., Geng H.R. Effect of liquid-liquid structure transition on solidification of Sn57Bi43 alloy. *Appl. Phys. A. Mater. Sci. Process.* 2016, Vol.122. – P.171.
6. Zu F.-Q. Temperature-Induced Liquid-Liquid Transition in Metallic Melts: A Brief Review on the New Physical Phenomenon. *Metals*. 2015, Vol.5, P.395-417.
7. Xiaolin Z., Xiufang B., Changchun W., YunfangL. The evolution of coordination structure in liquid GaSn alloy. *Chinese Journal of Physics*. 2018, Vol.56, pp.2684-2688.
8. Jia P., Geng H., Ding Y., Li M., Wang M., Zhang S. Liquid structure feature of Zn-Bi alloys with resistivity and viscosity methods. *JournalofMolecularLiquids*. 2016, Vol. 214, pp. 70-76.
9. ДульневГ.Н., НовиковВ.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1991. 248 с.
10. Dul'nev G.N., Novikov V.V. Theory of the flow and conduction of inhomogeneous media – I. Basic model of an inhomogeneous medium. *Journal of Engineering Physics*. 1983. Vol. 45. No. 3. P. 1030-1037.
11. Dul'nev G.N., Novikov V.V. Methods for the analytic determination of the effective conductivities of heterogeneous systems. *Journal of Engineering Physics*. 1981. Vol. 41. No.1. P. 801-811.

12. Zarichnyak Yu.P., Novikov V.V. Effective conductivity of heterogeneous systems with disordered structure. *Journal of Engineering Physics*. 1978. Vol. 34. No. 4. P. 435-441.
13. Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P., Novikov V.V. Coefficients of generalized conductivity of heterogeneous systems with chaotic structure. *Journal of Engineering Physics*. 1976. Vol. 31. No. 1. P. 856-869.
14. Snarskii A.A. Did Maxwell know about the percolation threshold? (on the fiftieth anniversary of percolation theory). *Physics-Uspokhi*. 2007. Vol. 50. No. 12. P. 1239-1242.

Номер проекта РФФИ: 19-33-90198

Security of subcarrier wave continuous variable quantum key distribution

Гончаров Р. К.¹, Самсонов Э.О.¹, Сантьев А.О.¹.

¹Университет ИТМО

e-mail: 243673@niuitmo.ru

A continuous-variable quantum key distribution protocol using multimode coherent states generated on subcarrier frequencies of the optical spectrum is reported. A defining property of subcarrier wave is the method for quantum state encoding. In it, a strong monochromatic wave emitted by a laser is modulated in an electro-optical phase modulator to produce weak sidebands, whose phase with respect to the strong (carrier) wave encodes quantum information (for more details, see [1]).

To detect the quadrature components of bosonic field we propose a coherent detection scheme where power from a carrier wave is used as a local oscillator. We avoid mentioning the words "homodyne" and "heterodyne" purposely because this work does not consider a classical scheme, but its analog, corresponding to the more general definition of "coherent detection".

We compose a mathematical model of the proposed scheme. Then we estimate the secure key generation rate using the Devetak-Winter approach [2] and perform its security analysis with post-selection in the asymptotic and in the finite-size regime using fully quantum asymptotic equipartition property technique [3]. We calculate a lower bound on the secret key rate [4] for the system under the assumption that the quantum channel noise is negligible compared to detector dark counts, and an eavesdropper is restricted to collective attacks. Our calculation shows that the system allows to provide a secret key for channel losses up to 9 dB in a realistic system implementation. It is important to note that our scheme also allows to implement CV-QKD with Gaussian modulation and the presented security analysis can be adopted there. Subsequent works will focus on a full security proof, as well as the experimental implementation of the proposed protocol.

This work was financially supported by Government of Russian Federation (grant МК-777.2020.8).

Список литературы

1. Gleim, A. V., et al., Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference, *Optics express*, Vol. 24., pp. 2619-2633, (2016);

2. Devetak, I., and Winter A., Distillation of secret key and entanglement from quantum states, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and engineering sciences*, Vol. 461, pp. 207-235, (2005);
3. Kozubov, A., Gaidash A., and Miroshnichenko G., Finite-key security for quantum key distribution systems utilizing weak coherent states; *arXiv preprint arXiv:1903.04371*, (2019);
4. Holevo, A.S., Bounds for the quantity of information transmitted by a quantum communication channel, *Problemy Peredachi Informatsii*, Vol. 9, pp. 3-11, (1973).

Исследование термостойких волокон, полученных из расплава термопластичного кристаллизуемого полиимида

Ваганов Г. В.¹, Иванькова Е.М.¹, Диденко А.Л.¹, Попова Е.Н.¹, Елоховский В.Ю.¹, Юдин В.Е.¹

¹ИВС РАН

e-mail: glebvaganov@mail.ru

Одной из приоритетных задач полимерного материаловедения является разработка новых волокнистых композиционных материалов, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях, таких как высокие температуры (> 200 °C), воздействие агрессивных жидкостей и радиации. Все этим требования полностью соответствуют класс полиимиды (ПИ). ПИ нашли применение для изготовления различного рода материалов: пленок, покрытий, связующих для композиционных материалов [1]. Ряд полимеров данного класса обладает способностью образовывать волокна с хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами.

На сегодняшний день практически все ПИ волокна получают формированием из раствора в высококипящих растворителях с дальнейшей обработкой при температуре или действию химических реагентов. Данное обстоятельство приводит к значительным сложностям их производства технологического и экологического характера. Одним из возможных путей решения этой проблемы может быть формирование полиимидных волокон на основе термопластичных ароматических полиимидов из расплава. Наиболее интересным для формирования волокна из расплава является использование кристаллизуемых термопластичных полиимидов. Основным преимуществом кристаллизуемых полиимидов является повышение предельной температуры их эксплуатации, которая в таком случае будет определяться не температурой стеклования T_g (как в аморфных полиимидах), а температурой плавления, которая существенно выше T_g . Однако такого рода полиимидов практически нет. Таким образом целью данной работы являлось получение и исследование термостойких волокон, сформированных из расплава термопластичного кристаллизуемого полиимида.

В работе был синтезирован частично кристаллический полиимид (ПИ) гомологического ряда (Р-ОДФО)ФИ – поли{[4,4'-бис(4"-N-феноксидифенил)имид 1,3-бис(3',4-дикарбоксифеноксидифенил)бензола] терминированный фталальимидом, или поли{[4,4'-бис(4"-N-феноксидифенил)имид 1,3-бис(3',4-дикарбоксифеноксидифенил)бензола] дифталальимид}. Молекулярную массу каждого получаемого форполимера регулировали нарушением стехиометрического соотношения исходных мономеров в ходе образования полиамидокислоты.

При этом, чем ближе молярное соотношение диангирида к диамину, тем выше молекулярная масса. Данное соотношение меняли от 0.97 до 0.93.

Для формирования волокон использовался двухшнековый микроэкструдер фирмы DSM Xplore (Нидерланды) со специальной установкой для получения волокон или пленок. Экструзия волокна проводили при температуре 360°C. С целью повышения механических свойств, полиимидные волокна подвергали ориентационному термическому вытягиванию до различных степеней вытяжки (DR) с использованием установки, разработанной в ИВС РАН. Ориентацию полиимидных волокон (Р-ОДФО)ФИ проводили ступенчато в диапазоне температур от 208°C до 215°C.

Выбор технологических параметров получения образцов был тесно связан с изучением реологических, теплофизических и структурных свойств данных волокон.

Исследование вязкости расплава синтезированного полиимидного порошка и механических свойств ПИ волокна с различным соотношением исходных мономеров показало, что оптимальным соотношением диангирида к диамину является 0,95. Именно при таком соотношении достигается вязкость, позволяющая получить бездефектное волокно. За счет ориентационной термовытяжки удается повысить механические свойства полиимидных волокон почти в 4 раза.

Анализ внутренней структуры закристаллизованного ПИ волокна показал, что до ориентационной вытяжки закристаллизованное волокно из чистого полиимида Р-ОДФО состоит из радиально ориентированных ламелей, образующих так называемые вырожденные сферолиты, в то время как после прохождения стадии высокотемпературной ориентационной вытяжки частично-кристаллические ламели ориентированы перпендикулярно оси волокна (и, соответственно, нормально к направлению вытяжки).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований грант № 18-03-00963_a.

Список литературы

1. Liaw D.J., Wang K.L., Huang Y.C., Lee K.R., Lai J.Y., Ha C.S. Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties and applications, Prog. Polym. Sci., V. 37, 907-974, 2012.

Номер проекта РФФИ: 18-03-00963_a

Фононы и изгибные волны в кристаллическом графене

Райков И. О.¹, Колюх Д.А.², Ипатов А.Н.¹, Паршин Д.А.¹

¹СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: IORaikov@gmail.com

В настоящее время одним из важных разделов современной теории конденсированных сред является изучение такого интересного материала, как кристаллический графен. Он представляет собой моноатомный плоский слой атомов углерода, в котором каждый атом связан валентной sp^2 связью с тремя своими ближайшими соседями в двумерной, гексагональной решетке [1]. Благодаря уникальным особенностям зонной структуры, кристаллический графен обладает исключительными свойствами, которые находят

применения в различных областях науки [2]. Также можно отметить его рекордно большую теплопроводность [3].

Обычно в диэлектриках и полупроводниках за транспорт тепла ответственны фононы, которые распространяются по кристаллу с постоянной скоростью звука v_s и обладают линейным законом дисперсии $\omega = v_s q$. Из-за наличия двух атомов в элементарной ячейке, фононный спектр графена состоит из двух акустических мод (LA, TA) и двух оптических мод (LO, TO) поляризованных в плоскости листа графена. Однако у графена есть и другой тип колебательных возбуждений в направлении, перпендикулярном плоскости листа графена — так называемые *изгибные* моды. Как показывают численные расчеты и соображения вращательной симметрии листа графена вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в плоскости листа, ZA и ZO изгибные моды обладают квадратичным законом дисперсии $\omega \propto q^2$ (как у обычных электронов или магнонов). В силу симметрии изгибные моды не взаимодействуют с фононными модами [4]. Стоит отметить, что в точках Дирака, расположенных на границе зоны Бриллюэна, при больших q изгибные моды снова становятся фононами. Большой интерес представляет изучение характера этих мод в графене и их вклада в перенос тепла.

В настоящей работе в рамках скалярной модели мы находим динамическую матрицу \widehat{M}_0 кристаллического графена, которая описывает плоскостные фононные моды в приближении ближайших связей в первой координационной окружности. Поскольку в макроскопическом пределе движение атомов описывается волновым уравнением, то динамическая матрица \widehat{M}_0 представляет собой дискретный лапласиан на решетке графена. Нами показано, что изгибным модам, которые макроскопически описываются уравнением теории упругости [5], соответствует динамическая матрица \widehat{M}_0^2 . Такой подход позволяет найти закон дисперсии изгибных мод в аналитическом виде и позволяет рассчитать плотность колебательных состояний $g(\omega)$. При этом макроскопический модуль Юнга такой системы равен нулю. Это означает, что спектр изгибных мод очень чувствителен к добавлению в систему случайных гармонических сил, которые способны перевести эти колебания в разряд фононных мод. Поэтому одним из важных направлений работы является рассмотрение влияния беспорядка на изгибные моды.

Список литературы

1. J. Kotakoski, A. V. Krasheninnikov, U. Kaiser, J. C. Meyer, Phys. Rev. Lett., 106, 105505 (2011).
2. А. В. Елецкий, И. М. Искандарова, А. А. Книжник, Д. Н. Красиков, УФН, 181, 233 (2011).
3. A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C., N. Lau, Nano Letters, 8, 902 (2008).
4. Л. А. Фальковский, ЖЭТФ, 142, 560 (2012).
5. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, том. 7, Теория упругости. Москва, Наука (1987).

Точная оценка кинетического скоростного фактора кристаллизации переохлажденных жидкостей

Яруллин Д. Т.¹, Галимзянов Б.Н., Мокшин А.В.

¹КФУ

e-mail: YarullinDT@gmail.com

Одной из наиболее фундаментальных величин в теории зародышеобразования является кинетический фактор кристаллизации g^+ . Корректная оценка значения этой величины необходима для определения скорости зародышеобразования и скорости роста кристаллических зародышей в системе, претерпевающей структурно-фазовые трансформации [1, 2]. Вместе с тем, для оценки значения величины g^+ необходимо иметь возможность отслеживать динамику отдельных атомов на пикосекундных временных масштабах, что крайне сложно осуществить экспериментальными методами. В настоящее время, решение данной задачи является возможным только при использовании методов моделирования атомарной/молекулярной динамики.

В настоящей работе исследуется процесс кристаллизации переохлажденной системы Леннард-Джонса, состоящей из 13500 частиц. Уровень переохлаждения системы составляет 40%. Идентификация частиц, участвующих в формировании упорядоченных структур, производится через кластерный анализ, основанный на расчете параметров локального ориентационного порядка и на условии тен-Волде [3]. Точная оценка кинетического скоростного фактора g^+ производится с помощью развитого нами оригинального алгоритма идентификации частиц, локально-перестраивающихся вблизи кристаллического зародыша. Полученные результаты сопоставляются с доступными данными моделирования, полученными для кристаллизующегося переохлажденного Ni и для переохлажденного сплава NiAl [4]. Было обнаружено, что для зародышей сверхкритического размера зависимость величины g^+ от размера зародыша следует по степенному закону с показателем степени 0.9. Этот результат указывает на смешивание различных режимов роста кристаллических зародышей в рассматриваемых системах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта No. 19-12-00022.

Список литературы

1. D. Kashchiev, Nucleation: Basic Theory with Applications (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000);
2. B. N. Galimzyanov, D. T. Yarullin, A. V. Mokshin, Acta Materialia 169, 184-192, 2019;
3. ten Wolde P.R., Ruiz-Montero M. J., Frenkel D, Phys. Rev. Lett. 75, 2714, 1995;
4. H. Song, Y. Sun, F. Zhang, C. Z. Wang, K. M. Ho, and M. I. Mendeleev, Phys. Rev. Materials 2, 023401, 2018.

Экспериментальная демонстрация влияния механических напряжений на лазерную генерацию акустических колебаний в различных материалах

Глазов А. Л.¹, Муратиков К.Л.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: glazov.holo@mail.ioffe.ru

Лазерные оптоакустические методы успешно используются для получения информации о механических, термоупругих и теплофизических свойствах объемных материалов, твердотельных структур и тонких пленок. Особый интерес представляет применение методов лазерной оптоакустической микроскопии для оценки остаточных напряжений в различных материалах.

В настоящее время детально разработаны теоретические методы расчета процессов формирования ФА сигналов в газовой среде, находящейся в контакте с исследуемым объектом, упругих колебаний и волн, возбуждаемых в твердотельных объектах и структурах. Их теоретические выводы неоднократно подтверждены результатами многочисленных экспериментов, выполненных на твердотельных объектах и жидкостях.

Экспериментально показано, что внутренние и внешние механические напряжения в областях со сложной реологической структурой существенно влияют на характеристики оптоакустических сигналов. Сравнение экспериментальных данных с существующими моделями термоупругой генерации упругих колебаний показало, что обычный подход, учитывающий только тепловое расширение, не позволяет правильно описать зависимость оптоакустического сигнала от внутренних напряжений.

В данной работе мы изучили взаимосвязь оптоакустических сигналов и напряжений в различных материалах на примере модельной задачи, для которой распределение напряжений хорошо известно. Объектом исследования были прямоугольные пластины из металла и керамики с отверстием. Распределение напряжений вблизи отверстия при одноосном нагружении известно и определяется решением задачи Кирша.

Методами лазерной сканирующей оптоакустической микроскопии получены изображения областей, исследуемых образцов вокруг малых отверстий при приложении внешней одноосной нагрузки. Для адекватного описания поведения оптоакустических сигналов в зависимости от нагрузки было предложено учитывать квазиравновесные возбуждения в таких объектах дефектных состояний с их последующей постепенной релаксацией в исходные состояния. В рамках данной работы предполагается, что дополнительная генерация дефектов в материале происходит за счет модуляции температуры при поглощении лазерного излучения.

Указанные переходы сопровождаются соответствующими изменениями свободной энергии [1] и объема кристаллической решетки. В соответствии с работой [1] присутствие в материале дефектов вызывает изменение его свободной энергии пропорционально концентрации дефектов, дилатационному параметру, характеризующему изменение объема кристалла при образовании в нем дефекта, и модулю всестороннего сжатия.

Для расчета смещения поверхности объекта в соответствии с предложенной моделью в уравнения движения следует добавить переменную компоненту градиента свободной энергии, вызванную наличием дефектов. Динамика концентрации дефектов в металле может быть описана с помощью уравнения баланса частиц с функцией источника в виде закона Аррениуса.

Теоретическое поведение оптоакустического сигнала зависит от дилатационного параметра. При определенных условиях сигнал может увеличиваться с напряжениями сжатия в соответствии с экспериментальными данными.

Таким образом, учет формирования динамических дефектных состояний при лазерном облучении позволяет достаточно хорошо описать экспериментальные данные по возбуждению акустических колебаний. Теоретические и экспериментальные результаты показывают, что оптоакустический метод в сочетании с методом сверления отверстий может быть использован для оценки механических напряжений в различных материалах.

Список литературы

1. Косевич А.М. Физическая механика реальных кристаллов. Киев: Наукова думка, 1981. 328 с.

Номер проекта РФФИ: 18-03-00038

Описание диффузии колебаний в аморфных твердых телах с помощью теории случайных матриц

Конюх Д. А.^{1,2}, Бельтюков Я.М.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе

²СПбПУ

e-mail: conyuh.dmitrij@yandex.ru

Нахождение общих колебательных свойств аморфных диэлектриков (стекло) является одной из ключевых задач физики неупорядоченных систем. Ближний порядок в стеклах напоминает ближний порядок в соответствующих кристаллах, однако дальний порядок отсутствует. Это существенно влияет на многие макроскопические свойства стекол, например, теплопроводность. Известно, что доминирующую часть спектра аморфных систем занимают делокализованные колебания, распространяющиеся посредством диффузионной передачи энергии от атома к атому [1]. Эти колебания, *диффузоны*, определяют теплопроводность аморфных стекол в диапазоне частот свыше 0.4 ТГц (20 К). Однако микроскопический механизм переноса тепла посредством диффузонов до сих пор остается малоизученным. Для изучения такого диффузионного процесса колебаний нами построена модель, описывающая основные колебательные свойства неупорядоченной системы. При этом мы применяем методы, основанные на использовании теории случайных матриц.

Рассматриваемая модель описывает гармонические колебания атомов вблизи положений равновесия без диссипации энергии. При этом из-за флуктуации связей динамическая матрица \hat{M} до некоторой степени случайна [2]. С учетом симметричных свойств системы, динамическая матрица может быть представлена в виде коррелированного ансамбля Вишарта случайных матриц $\hat{M} = \hat{A}\hat{A}^T$, в котором \hat{A} – некоторая случайная коррелированная матрица размером $N \times K$. Параметр $\kappa = K / N - 1$ определяет соотношение числа связей и числа степеней свободы системы.

В рамках такого подхода нами получено, что усредненное по ансамблю смещение атомов $u(x, t)$ испытывает релаксацию, а соответствующее уравнение движения может быть записано через динамический модуль Юнга $E(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega)$ в виде

$$\omega^2 u(x, \omega) + E(\omega) \Delta u(x, \omega) = 0. \quad (1)$$

В случае простой кубической решетки динамический модуль Юнга имеет следующий аналитический вид:

$$E(\omega) = \frac{\kappa}{2} + \sqrt{\kappa^2 / 4 - a^2 \omega^2 + \frac{i\omega^3}{4\pi\sqrt{\kappa/2 + \sqrt{\kappa^2 / 4 - a^2 \omega^2}}}}, \quad (2)$$

где константа $a \approx 0.502724$ имеет характерное для простой кубической решетки значение.

Данному уравнению движения (1) соответствует динамический структурный фактор в виде

$$S(\mathbf{q}, \omega) = \frac{2\omega}{\pi} \frac{q^2 E''(\omega)}{(\omega^2 - q^2 E'(\omega))^2 + q^4 E''(\omega)^2}. \quad (3)$$

Мнимая часть комплексного модуля Юнга $E''(\omega)$ определяет затухание $\Gamma(\mathbf{q}, \omega) = q^2 E''(\omega) / \omega$.

Анализ структурного фактора (3) показывает, что при высоких частотах затухание в системе $\Gamma \propto q^2$. Этот результат согласуется с данными экспериментов по неупругому рентгеновскому рассеянию в стеклах [3] и с результатами метода молекулярной динамики для аморфного кремния [4]. Это необычное поведение, до сих пор не имеющее полноценного объяснения, может быть связано с диффузией скорости атомов.

Авторы благодарят Совет по грантам Президента Российской Федерации за финансовую поддержку (грант № МК-3052.2019.2).

Список литературы

1. P.B. Allen, J.L. Feldman et al., *Phil. Mag.* В 79, 1715 (1999)
2. Y.M. Beltukov, V.I. Kozub, D.A. Parshin, *Phys. Rev.* В 87, 134203 (2013)
3. G. Ruocco, F. Sette, *J. Phys.: Cond. Mat.* 13, 9141 (2001)
4. J.K. Christie, S.N. Taraskin, S.R. Elliott, *J. Non-Cryst. Solids* 353, 2272 (2007)

Кооперативное размораживание орбитальных моментов при упорядочении орбиталей в ян-теллеровских кристаллах

Борлаков Х. Ш.¹, Эдиев Д.М.¹, Борлакова А.Х.¹,

¹СКГА

e-mail: borlakov@mail.ru

В теории магнетизма есть теорема о "замораживании" орбитального момента L : среднее значение оператора L для невырожденных состояний равно нулю. Это означает, что и орбитальный вклад в магнитный момент иона в узле решетки будет равным нулю. В кристаллах, содержащих ионы с орбитально-вырожденными состояниями 3d-электронов,

возможен фазовый переход, связанный с эффектом снятия орбитального вырождения – орбитальное упорядочение или кооперативный эффект Яна-Теллера (ЯТ). В "правильной" теории орбитального упорядочения обнаруживается следующий замечательный эффект: если ЯТ-ионами являются ионы с трехкратным вырождением орбитальных состояний (T_{2g} -ионы), то в орбитально-упорядоченной фазе на каждом из ЯТ-узлов появляется орбитальный магнитный момент, пропорциональный модулю критического параметра порядка (ПП) и возрастающий вместе с ростом модуля ПП. При этом, в орбитально-неупорядоченной фазе кратность вырождения максимальна и равна трем, а в упорядоченных фазах она может равняться двум и единице. Таким образом, при рассмотрении упорядочения T_{2g} -орбиталей в ЯТ-кристаллах, мы получаем явное противоречие с теоремой о "замораживании" орбитального момента – по мере снятия вырождения орбитальный магнитный момент возрастает, а вместо эффекта "замораживания" орбиталей, мы имеем противоположный эффект их кооперативного "размораживания".

"Правильно" построенная феноменологическая теория – это термодинамическая теория Ландау, в которую непротиворечивым образом включены квантовые состояния и операторы, описывающие $3d$ - электрон на узле, занятом ЯТ-ионом. Адекватный сути задачи метод включения квантовых состояний и операторов в схему теории Ландау впервые был предложен в работе [1] – с помощью локальной матрицы плотности. Для трехкратно вырожденных орбитальных состояний матрица плотности имеет размерность 3×3 и как всякая эрмитова матрица может быть разложена по линейно-независимому набору эрмитовых матриц, коих оказывается восемь (матрицы Гелл-Мана). Коэффициенты разложения порождают восьмимерный ПП, который приводим и разлагается на неприводимые ПП – два трехмерных и один двумерный. Вычисление средних значений операторов плотностей заряда и тока позволяет выяснить физический смысл отдельных степеней свободы исходного ПП – один из трехмерных ПП отвечает за появление ненулевого стационарного тока на ЯТ-узле, а два других – за зарядовое упорядочение на ЯТ-узле. Трехмерный ПП, отвечающий за появление атомных токов, является, таким образом, магнитным ПП и должен служить критическим ПП во всякой теории орбитального упорядочения. ЯТ-кристаллы в большинстве своем, имеют высокосимметричной фазой кубическую фазу, с группой симметрии O_h . Поэтому, исходя из парамагнитной шубниковской группы $O_h 1'$, мы нашли все возможные орбитально-упорядоченные ферромагнитные фазы и их магнитные группы симметрии. Используя одноэлектронный базис действительных волновых функций $f_1 \sim yz$, $f_2 \sim zx$, $f_3 \sim xy$ мы вычислили базисные атомные токи и соответствующие им базисные магнитные моменты. Структура каждого из базисных токов оказалась в точности совпадающей со структурой электронного тока водородоподобного атома в состоянии с квантовыми числами $n=3$, $l=2$, $m=1$. Очевидным образом, каждому из базисных магнитных моментов соответствует механический момент. Отношение модулей магнитного и механического моментов в точности равно гиромангнитному отношению орбитального магнитного момента к механическому. Примером кристалла, в котором могут происходить описанные эффекты, является шпинель $CuCr_2O_4$ (хромит меди), с точкой орбитального упорядочения $T_{JT}=310K$. Спиновое упорядочение, происходящее в точке Кюри $T_c=70$ непротиворечивым образом включается в единую схему теории Ландау. Из нашего рассмотрения следует, что кооперативное упорядочение орбиталей происходит по суперобменному механизму Кугеля-Хомского, а первоначальный механизм, предложенный Яном и Теллером не имеет места.

Список литературы

1. Гурин О. В., Будрина Г.Л., Сыромятников В. Н. ЖЭТФ, Т 95, № 4. С. 770-775, 1989.

2. Борлаков Х.Ш., Эдиев Д.М., Борлакова А.Х. О возможности существования орбитального ферромагнетизма в ян-теллеровских кристаллах, содержащих T2g-ионы//Известия КБГУ. Т. 9, № 4.С. 66-68,2019.

Энергия Дзялошинского-Мории в диамагнитно-разбавленных монокристаллах на основе бората железа

Могиленец Ю. А.¹, Селезнева К.А.¹, Ягупов С.В.¹, Стругацкий М.Б.¹, Клява Янис²

¹КФУ им. В. И. Вернадского

²LOMA, UMR 5798 Université de Bordeaux-CNRS, Talence, France

e-mail: mogilenecya@cfuv.ru

Борат железа, FeBO_3 – кристалл, обладающий уникальным сочетанием физических свойств [1]. Он является двухподрешеточным антиферромагнетиком со слабым ферромагнетизмом и температурой Нееля 348 К, прозрачен при комнатной температуре. Кристаллическая структура FeBO_3 описывается пространственной группой симметрии D_{3d}^6 . Недавно нами были синтезированы диамагнитно-разбавленные монокристаллы на основе бората железа – железо-галлиевые бораты $\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{BO}_3$ [2]. Метод диамагнитного разбавления позволяет модифицировать магнитные свойства кристаллов с целью их практического применения, а также детально изучать трансформацию магнитных свойств при переходе из магнитоупорядоченного в парамагнитное состояние при увеличении степени диамагнитного разбавления. Увеличение содержания диамагнитной примеси приводит в существенному снижению температуры Нееля и поля Дзялошинского-Мории, ответственного за появление слабого ферромагнетизма.

Цель настоящей работы – расчет макроскопической константы Дзялошинского-Мории D_{mix} при $T=0\text{K}$ для железо-галлиевых боратов $\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{BO}_3$.

Запишем плотность энергии Дзялошинского-Мории в монокристаллах $\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{BO}_3$ с учетом только соседних парамагнитных ионов:

$$E_D^{\text{mix}} = \frac{1}{2V} d_{\text{ex}} \sum_i^N Z_i [\mu_1 \times \mu_2], \quad (1)$$

где $\mu_{1,2}$ – магнитные моменты ионов железа первой и второй подрешеток ($\mu_1=\mu_2=\mu$), $[\mu_1 \times \mu_2]_z$ - проекция соответствующего векторного произведения на ось C_3 кристалла [1], d_{ex} – микроскопическая константа антисимметричного обмена для пары ближайших магнитных ионов, Z_i – количество ближайших магнитных соседей для i -того иона ($Z = 6$ для чистого FeBO_3). Суммирование ведется по всем магнитным ионам в объеме V .

Выражая в (1) магнитные моменты ионов железа через приведенные ферромагнитный m и антиферромагнитный l векторы [3], получаем:

$$E_D^{\text{mix}} = D_{\text{mix}} [l \times m]_z, \quad (2)$$

где искомая константа Дзялошинского-Мории имеет вид:

$$D_{\text{mix}} = d_{\text{ex}} \frac{\mu^2}{V} \sum_i^N Z_i. \quad (3)$$

В предположении, что d_{ex} для пары ближайших магнитных ионов не зависит от степени диамагнитного разбавления бората железа, был разработан компьютерный код,

позволяющий рассчитать макроскопическую константу Дзялошинского-Мории для разбавленных кристаллов в соответствии с (3). В результате численных расчетов установлено, что зависимость $D_{\text{mix}}(x)$ является параболической.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 19-32-90054 и 18-32-00210 «мол_а» (разработка компьютерного кода для моделирования диамагнитно-разбавленной матрицы), а также Программы Развития Крымского Федерального Университета им. В.И.Вернадского на 2015-2024 годы, грант № VG04/2019.

Список литературы

1. Diehl R., Jantz W., Nolang B.I. and Wettling W., Growth and properties of iron borate, FeBO_3 , in: Current Topics in Materials Science, E. Kaldis, ed., Elsevier: New-York, 1984, vol.11, pp. 241-387.
2. Yagupov S., Strugatsky M., Seleznyova K., Maksimova E., Nauhatsky I., Yagupov V., Milyukova E., Kliava J., $\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{BO}_3$ single crystals: synthesis and characterization, Appl.Phys.A, 2015, v.121, pp.179-185.
3. Seleznyova K., Thesis, Université de Bordeaux, 2016.

Номер проекта РФФИ: №19-32-90054, №18-32-00210

In-situ БУР исследования кристаллической структуры олигоимида в процессе нагревания

Иванькова Е. М.¹, Касаткин И. А.², Попова Е. Н.¹, Диденко А.¹, Юдин В. Е.¹, Комаров П. В.³

¹ИВС РАН

²СПбГУ

³ТвГУ

e-mail: ivelen@mail.ru

Из исследований ДСК [1] известно появление двойного пика плавления у термопластичных полимеров, подвергающихся нагреву и охлаждению. Предполагается, что эти двойные пики плавления развиваются из двух различных механизмов роста кристаллов. Эти механизмы соответствуют росту и плавлению сферолитных и эпитаксиальных кристаллитов. Не менее важным для изучения роста кристаллитов в полимерах является плавление кристаллитов, которое может непосредственно влиять на конечную кристалличность.

В настоящей работе двойное эндотермическое поведение, т.е. появление двойных пиков плавления, и соответствующая морфология кристаллитов олигоимида (Р-ОДФО)ФТ изучалось с помощью методов СЭМ, ДСК и БУР.

Синтез частично-кристаллического олигоимида на основе резорцин-диангирида Р (1,3-бис-(3,3', 4,4'-дикарбоксифенокси)бензола) и тетрациклического диамина ОДФО (4,4'-бис(4''-аминофенокси)бифенила) был проведен путем химической имидизации. Процесс синтеза олигоимида Р-ОДФО подробно описан в [2].

Исследования реакторного порошка Р-ОДФО проводились на сканирующем электронном микроскопе SUPRA 55VP (Carl Zeiss, Германия). Образцы были покрыты тонким слоем Pt.

Исследование теплофизических свойств полученных порошков олигоимида Р-ОДФО проводилось методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью

прибора NETZSCH (Германия), а именно DSC 204 F1. Испытания проводились на порошках в интервале температур от 30 до 380°C при скорости нагревания 10°C/мин в инертной атмосфере (аргон). На основании полученных данных рассчитывались энтальпии плавления ΔH_m , температуры плавления T_m .

Тонкая кристаллическая структура реакторного порошка олигоимида Р-ОДФО была исследована методом БУР с использованием дифрактометра Rigaku Ultima IV (CoK α), снабженного термо-камерой. Рентгенограммы регистрировали в диапазоне от 150 до 320°C с шагом 5°C.

СЭМ исследования частиц порошка олигоимида Р-ОДФО выявили, что эти частицы состоят из многочисленных пластин. Предполагается, что данные ламели имеют частично-кристаллическую структуру и кристаллизуются, вероятнее всего, во время синтеза. Чтобы подтвердить это предположение, методом ДСК регистрировали термограмму порошка олигоимида Р-ОДФО.

Основной особенностью порошковой термограммы олигоимида Р-ОДФО является наличие двух эндопиков при 281.1°C и 306.4°C. Кроме того, площади под этими двумя эндопиками не одинаковы, а именно первый (низкотемпературный) пик значительно выше второго (высокотемпературного). Можно сделать вывод, что ламели олигоимида состоят из кристаллитов, которые плавятся довольно специфическим образом. Таким образом, следует предположить, что исходный реакторный порошок олигоимида имеет две фазы, которые плавятся при разных температурах (эта разница составляет более 20°C). Исходя из этого, можно выдвинуть две следующие гипотезы: 1) ламели олигоимида Р-ОДФО состоят из двух типов кристаллитов, имеющих различные кристаллические ячейки; 2) или кристаллиты идентичны с точки зрения кристаллографии, но их размеры очень сильно различаются.

Таким образом, в исследуемом материале было обнаружено очень интересное явление. Чтобы понять природу наблюдаемого термодинамического поведения, кривые дифракции рентгеновских лучей были записаны онлайн (in-situ) при нагревании реакторного порошка. Никакого существенного различия в профилях рентгеновских лучей не наблюдается на всем протяжении нагрева образца, за исключением того, что БУР-рефлексы становятся уже и лучше разрешаются. Стоит отметить, что вплоть до самого плавления порошка олигоимида не происходит никакой трансформации кристаллической ячейки. Следовательно, эти результаты дают нам возможность утверждать, что наша вторая гипотеза была верна.

Были рассчитаны размеры кристаллических областей и степень кристалличности при каждой температуре. Оказалось, что нагрев образца ведет к двойному увеличению размеров кристаллитов и плавному снижению степени кристалличности (т.е. аморфизации) в процессе нагрева.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-03-00963.

Транзисторное усиление фототока в МДП-структурах на высокоомном кремнии р-типа с туннельным диэлектриком из нитрида алюминия

Котина И. М.¹, Базлов Н.В.², Данишевский А.М.³, Драчнёв И.С.¹, Коньков О.И.³, Кузьмичёв А.М.¹, Трушин М.В.¹, Унжаков Е.В.¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт», ПИЯФ

²СПбГУ

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе

e-mail: kotina_im@pnpi.nrcki.ru

Процесс усиления фототока в МДП структурах с туннельно-тонким диэлектриком получил название транзисторного усиления фототока [1]. Этот эффект интенсивно (теоретически и экспериментально) изучался и изучается на структурах из низкоомного кремния [2-4]. В то же время, много меньше внимания уделяется исследованию фотоэлектрических свойств туннельных МДП структур на высокоомном кремнии. Тем не менее, на основе теории транзисторного эффекта [1] можно ожидать наличие эффекта существенного увеличения фототока в таких структурах.

В настоящей работе представлены результаты исследования фотоэлектрических свойств МДП-структур на р-кремнии (111) с удельным сопротивлением 4-6 кОм·см. Туннельно-тонкий диэлектрик из нитрида алюминия (AlN) был синтезирован методом магнетронного распыления на постоянном токе. Источником осаждаемого материала служила алюминиевая мишень. В качестве металлического затвора использовались Pd и Al. Омическим контактом с обратной стороны подложки служил Pd. Исследовались темновые и световые вольт-амперные характеристики. Источником света служила вольфрамовая лампочка мощностью 40 Вт, максимум излучения которой приходится на длину волны $\lambda=950$ мкм. С целью определения состояния границы раздела полупроводник/диэлектрик измерялись вольт-емкостные характеристики при различных частотах в области 1-10 кГц. На всех исследуемых МДП-структурах наблюдалась сильная зависимость фототока от обратного смещения. При этом величина фототока в максимуме при обратном смещении значительно превышала величину фототока при прямом смещении. Характерно, что на структуре без диэлектрика (Al/p-Si) фототок практически не зависел от обратного смещения. Коэффициент усиления фототока K_d определялся толщиной AlN пленки, материала металлического затвора, и для различных структур его величина изменялась от 50 до 1000.

Наблюдаемые особенности фото-ВАХ позволяют предположить, что в туннельных структурах на высокоомном р-Si с диэлектриком из нитрида алюминия реализуется эффект транзисторного усиления фототока.

Список литературы

1. *Грехов И.В. и др.*, Физика и техника полупроводников, том 32, выпуск 9, стр. 1145, 1998 г.
2. *Вуль А.Я. и др.*, Физика и техника полупроводников, том 15, выпуск 1, стр. 142, 1981 г.
3. *Рожков В.А., Шалимова М.Б.*, Физика и техника полупроводников, том 33, выпуск 7, стр. 795, 1999 г.
4. *Векслер М.И. и др.*, Физика и техника полупроводников, том 49, выпуск 2, стр. 266, 2015 г.

Влияние условий имидизации на структуру и свойства волокон из частично-кристаллического полиимида

Ваганов Г.В.¹, Диденко А.Л.¹, Иванькова Е.М.¹, Иванов А.Г.¹, Попова Е.Н.¹, Юдин В.Е.¹, Борисов И.Л.², Волков А.В.²

¹ИВС РАН

²ИНХС РАН

e-mail: vanilin72@yandex.ru

Полиимидные волокна помимо высоких показателей прочности и модуля упругости обладают хорошей устойчивостью к воздействию повышенных температур, радиационному облучению, имеют низкий коэффициент линейного термического расширения, а также высокую химическую стойкость. Столь благоприятное сочетание вышеперечисленных свойств позволяет использовать полиимидные волокна как перспективные материалы для решения ряда технических задач в различных отраслях промышленности. Определенный интерес представляет использование полиимидных материалов в качестве термостойких первопарационных и газоразделительных мембран для промышленных фильтрующих элементов. Поэтому полиимидные волокна перспективны для получения полволоконных пористых мембран для процессов газоразделения и фильтрации жидкостей [1, 2]. Наиболее широко для получения полиимидных (ПИ) волокон применяется двухстадийный метод мокрого формования (коагуляционный метод). При этом методе получения полиимидного волокна велика вероятность сформировать пористую структуру как в процессе формования волокна, так и при последующем удалении воды из полиаминокислотного волокна в процессе его циклизации в полиимид методом химической или термической имидизации. Однако исследований о влиянии условий имидизации на пористость, структуру и свойства полиимидных волокон на основе кристаллизующихся полиимидов в литературе практически отсутствуют. Дополнительная новизна и актуальность работы заключается в проведении исследований на синтезированной, способным к кристаллизации, полиимиде на основе диамина 4,4'-бис(4-аминофенокси)дифенила (диамин ОДФО) и диангидрида 1,3-бис(3',4-дикарбоксо-фенокси)бензола (Р). Особенностью полиимида Р-ОДФО в управляемой кристаллизации и рекристаллизации при переработке в конечный материал.

В этой работе использовался двухстадийный процесс получения полиимидного волокна из полиаминокислоты (ПАК) методом мокрого формования. Полиимидные волокна были получены методом термической и химической имидизации. Волокна получали с различной фильерной вытяжкой. Была исследована корреляция влияния различных условий имидизации на морфологию, химическую структуру, термическую стабильность и механические свойства полиимидных волокон. В работе применяли ряд методов исследования, такие как инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием (FT-IR), сканирующая электронная микроскопия (SEM), дифференциально-сканирующая калометрия (ДСК) термогравиметрический анализ (TGA) и определение прочностных характеристик.

Исследования химической структуры ПИ волокон позволяет говорить о том, что полностью процесс имидизации характерен только для термически заимидизованным волокнам и завершается при температуре 280- 300 °С. В случае химически имидизованных волокон степень имидизации близка к термически имидизованным аналогам, однако окончательно не достигает ее вследствие более низкой скорости конверсии полиаминокислоты в полиимид.

Изучение термических свойств показали, что в зависимости от условий имидизации ПАК волокон существует отличие в степени кристалличности ПИ волокон. При термической имидизации ПАК волокна образуются более высокую степень кристалличности ПИ волокна по сравнению с химически имидизованным аналогом. Кроме того, при химически имидизованном волокне образуется более рыхлая пористая структура. Такая разница в структуре ПИ волокна приводит к изменению механического поведения ПИ волокон. ПИ волокна, полученные методом химической имидизации, имеют более низкие прочностные характеристики и обладают меньшей деформацией до разрушения по сравнению с термически имидизованными аналогами. Однако их более пористая структура возможно будет иметь важное значения для первопарационных характеристик конечных мембран на их основе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований грант № 18-29-17040 мк.

Номер проекта РФФИ: № 18-29-17040 мк

СОКРАЩЁННЫЕ НАИМЕНОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ

ВГСПУ

Волгоградский государственный
социально-педагогический
университет

ВМедА

Военно-медицинская академия
имени С.М. Кирова» МО РФ

ВНИИФ

Всероссийский научно-
исследовательский институт
фитопатологии

ВолгГТУ

Волгоградский государственный
технический университет

ИвГУ

Ивановский государственный
университет

ИВС РАН

Институт высокомолекулярных
соединений РАН

ИГЕМ РАН

Институт геологии рудных
месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии Российской
академии наук

ИАП РАН

Институт аналитического
приборостроения Российской
академии наук,

ИМЕТ РАН

Институт металлургии и
материаловедения имени А.А.
Байкова Российской академии наук

ИОФ РАН

Институт общей физики имени А.М.
Прохорова Российской академии
наук

ИПМаш РАН

Институт проблем машиноведения
РАН

ИПМех

Институт проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского РАН

ИПТМУ РАН

Институт проблем точной механики
и управления РАН

ИПФ РАН

Институт прикладной физики РАН

ИРННТУ

Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

ИСОИ

Институт систем обработки
изображений – филиал ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН

ИФМ УрО РАН

Институт физики металлов имени М.
Н. Михеева УрО РАН

ИФП СО РАН

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН

ИЭЭ РАН

Институт электрофизики и
электроэнергетики РАН

ИЯФ СО РАН

Институт ядерной физики имени
Г. И. Будкера СО РАН

КазНИТУ

Казахский национальный
исследовательский технический
университет имени К. И. Сатпаева,
Казахстан

КазНУ

Казахский национальный
университет имени аль-Фараби,
Казахстан

КубГУ

Кубанский государственный
университет

КубГМУ

Кубанский государственный
медицинский университет

КубГАУ

Кубанский государственный
аграрный университет имени
И. Т. Трубилина

КФУ

Казанский федеральный университет

КФУ им. В. И. Вернадского

Крымский федеральный университет
им. В. И. Вернадского

КГЭУ

Казанский государственный
энергетический университет

ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н. И. Лобачевского

НИФХИ им. Л.Я.Карпова

Научно-исследовательский физико-
химический институт
им. Л. Я. Карпова

РНХИ им. проф. А. Л. Поленова

Российский нейрохирургический
институт им. проф. А. Л. Поленова

РТУ МИРЭА

МИРЭА – Российский
технологический университет

СГУ им. Питирима Сорокина

Сыктывкарский государственный
университет им. Питирима Сорокина

СГУ

Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени
Н. Г. Чернышевского

СКГА

Северо-Кавказская государственная
академия (СКГА)

СПБАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

Санкт-Петербургский национальный
исследовательский Академический
университет имени Ж. И. Алфёрова
Российской академии наук

СПбГТИ (ТУ)

Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)

СПбГУ

Санкт-Петербургский
государственный университет

СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Санкт-Петербургский
государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова

СПбПУ

Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого

ТвГУ

Тверской государственный
университет

ТИСНУМ

Технологический институт
сверхтвёрдых и новых углеродных
материалов

ТУСУР

Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники

УлГТУ

Ульяновский государственный
технический университет

УрГПУ

Уральский государственный
педагогический университет

УрФУ

Уральский федеральный
университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Ульяновский филиал института
радиотехники и электроники им.
В.А. Котельникова РАН

ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Федеральный исследовательский
центр «Коми научный центр
Уральского отделения Российской
академии наук»

ФТИАН им. К.А. Валиева РАН

Физико-технологический институт
РАН

ЦАГИ

Центральный
аэрогидродинамический институт
имени профессора Н. Е. Жуковского

ЧГУ

Череповецкий государственный
университет

ЧувГУ

Чувашский государственный
университет имени И. Н. Ульянова

СОДЕРЖАНИЕ

Астрономия и астрофизика	3
Изучение моделей космической селенофизики с использованием многопараметрического анализа и фрактальной геометрии <i>Чуркин К. О., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А., Демина Н.Ю.</i>	3
Создание теоретической имитационной модели орбитальной привязки оптических наблюдений лунных объектов, выполненных с борта космического окололунного спутника, к селеноцентрической системе координат <i>Андреев А. О., Нефедьев Л.А., Демина Н.Ю., Нефедьев Ю.А., Гудец Р., Багров А.В., Петрова Н.К., Загидуллин А.А.</i>	4
Исследование околоземных объектов и метеорных потоков <i>Сергиенко М. В., Соколова М.Г., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А.,</i>	6
Анализ аналитических и численных динамических лунных эфемерид <i>Загидуллин А. А., Усанин В.С., Петрова Н.К., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А.</i>	7
Исследование эффектов синхронизации во взаимной динамике ежедневных чисел Вольфа и корональных выбросов солнечной массы <i>Демин С.А., Панищев О.Ю., Тимашев С.Ф.</i>	8
Анализ наблюдений лазерной локации Луны с использованием аддитивного регрессионного моделирования <i>Демина Н. Ю., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А., Багров А.В., Гудец Р.</i>	9
Разработка метода проективных метрик для анализа звездных положений <i>Костина Е. Ю., Андреев А.О.</i>	11
Анализ магнитогидродинамической солнечной активности с использованием адаптивного регрессионного моделирования <i>Шарафутдинова А. А., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А.</i>	12
Анализ аномальной астрономической рефракции при позиционных наблюдениях небесных тел <i>Сабитова Э. И., Андреев А.О., Демина Н.Ю., Нефедьев Ю.А.</i>	13
Сигнатура геомагнитной супербури в скорости вращения земли <i>Трофимов Д. А., Петров С.Д.</i>	14
Поверхностная энергия ядерной материи до и после точки нейтронизации с эффективным взаимодействием типа Скирма <i>Щечилин Н. Н., Чугунов А. И.</i>	15
Оценка физических параметров в молекулярных HD/H ₂ облаках <i>Косенко Д. Н., Балашев С.А.</i>	16
О возможном влиянии солнечных и астрономических факторов на климат северной Фенноскандии <i>Огурцов М. Г., Хелама С., Линдхольм М., Ялканен Р.</i>	17

Содержание

Измерение эффективности пофотонной регистрации ультрафиолетового излучения на длине волны 277 nm с помощью кремниевого фотоумножителя <i>Богданов А. А., Тубольцев Ю.В., Чичагов Ю.В., Лосев С.Н., Соколовский Г.С.</i>	17
Рентгеновский поляриметр солнечных вспышек для миссии «Интергелио-Зонд»: экспериментальное определение отклика физического макета на поляризованное рентгеновское излучение <i>Савченко М. И., Круглов Е.М., Лазутков В.П., Скородумов Д.В., Шишов И.И.....</i>	18
Создание регрессионной модели движения полюса Земли с возможностью динамического прогнозирования <i>Хайрутдинова А. Н., Мубаракшина Р.Р., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А.</i>	19
Исследование влияния законов межзвездного поглощения на параметры фотометрических систем с использованием астрофизических наблюдений АОЭ <i>Куандыкова Д. М., Андреев А.О., Нефедьев Ю.А., Гудец Р.</i>	20
Анализ физической поверхности Венеры с использованием методов фрактальной геометрии <i>De La Morena C., Нефедьев Ю.А., Андреев А.О., Ахмедшина Е.Н.</i>	22
Мониторинг ПЭС ионосферы вблизи Южного геомагнитного полюса по ГНСС-наблюдениям <i>Желтова К. В., Петров С.Д., Трофимов Д.А., Чекунов И.В., Серов Ю.А., Трошичев А.А.</i>	23
Солнечная активность, реконструированная на основе радиоуглеродных данных, и климатические изменения с 17000 до 5000 лет до нашей эры <i>Кудрявцев И. В., Дергачёв В.А.</i>	24
Сравнение различных источников гамма-излучения, доступных в лабораторных условиях <i>Рачков К. И., Попов А. Н., Бобашёв С. В., Безверхний Н. О., Сорокин А. А.</i>	25
Влияние изменения энтропии на первичный нуклеосинтез <i>Юрченко В. Ю., Иванчик А.В.</i>	26
Явные изометрические вложения геометрий черных дыр с несингулярным распределением материи <i>Капустин А. Д., Пастон С.А.</i>	27
Pulse pile-up corrections for energy spectra in Konus-Wind experiment <i>Лысенко А. Л., Фредерикс Д. Д.</i>	28
Влияние темпа фотоионизации позитрониев на нагрев полярной шапки радиопульсара J0250+5854 <i>Барсуков Д. П., Воронцов М.В., Морозов И.К.</i>	29
Природы штормовой активности на северо-западе Атлантики во время голоцена и ее возможная связь с вариациями магнитного поля Земли <i>Васильев С. С., Дергачев В. А.</i>	29
Powerful Solar Proton Events of January 2005 and their impact on intensity of the stratospheric polar vortex <i>Веретененко С. В.</i>	30

Диффузия как диссипативный механизм в вырожденном <i>pre</i> -веществе <i>Краав К. Ю., Гусаков М. Е.</i>	30
The Sobolev approximation for radiative transfer with line overlap and continuous opacity <i>Нестерёнок А. В.</i>	31
Солнечная активность и глубинный ход изотопа ^{14}C в лунном грунте <i>Фролов Д. А., Дергачев В.А., Константинов А.Н., Кудрявцев И.В., Остряков В.М., Павлов А.К., Васильев Г.И.</i>	31
Entrainment matrix for Brussels-Montreal BSk24 energy-density functional <i>Кантор Е. М., Гусаков М.Е.</i>	32
Quasi-periodic oscillations of the gamma-ray burst GRB190114C light curve <i>Драневич В. А., Соавтор Дмитриев П.Б.</i>	33
Аналитическое описание двухзонной диффузии позитронов и электронов при распространении от пульсаров <i>Оситов С. М., Быков А. М., Петров А. Е., Романский В. И.</i>	33
Структура кристаллической коры нейтронной звезды при учёте поляризации электронного фона <i>Кожберов А. А.</i>	35
Поиск гамма-излучения от гравитационно-волновых событий по данным Конус-Винд <i>Ридная А. В., Свинкин Д. С., Фредерикс Д. Д.</i>	35
Сцинтилляционные установки Tunka-Grande и TAIGA-Muon – статус и перспективы <i>Монхоев Р. Д. от коллаборации TAIGA</i>	36
Анализ временной структуры потока мягкого рентгеновского излучения Солнца на протяжении 24-го цикла солнечной активности <i>Дмитриев П. Б.</i>	37
Субсекундные пульсации в жёстком рентгеновском излучении солнечных вспышек по данным КОНУС-ВИНД и BATSE <i>Глобина В. И., Складорова Е.М., Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н.</i>	38
Особенности спектров и поляризации тормозного излучения электронов, ускоренных во время солнечных вспышек электронов, при развитии пучковой неустойчивости <i>Чариков Ю. Е., Кудрявцев И.В.</i>	39
Изотопы углерода в космических лучах из данных космического эксперимента PAMELA 2006-2014 гг. <i>Богомолов Э. А., Васильев Г.И., Менн В.,</i>	40
Динамика распространяющихся во вспышечной плазме быстрых электронов с учетом их взаимодействия с плазменной турбулентностью <i>Ватагин П. В., Кудрявцев И.В.</i>	41
Межзвёздное вещество в галактиках на больших красных смещениях <i>Теликова К. Н., Балашев С.А., Нотердам П., Крогагер Д.К., Ранжан А.</i>	42

Субсекундные пульсации в жёстком рентгеновском излучении солнечных вспышек по данным КОНУС-ВИНД и BATSE <i>Шувалова В. И., Складорова Е.М., Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н.</i>	42
Остывание нейтронных звёзд со сверхтекучими недрами: универсальные характеристики и их приложения <i>Оффенгейм Д. Д., Штернин П. С.</i>	43
On the possibility of the measurement of CMBR temperature at high redshift with the use of populations of rotational levels of H ₂ and fine-structure levels of CI <i>Клименко В. В., Ivanchik A.V.</i>	44
Моделирование структуры течений и ускорения частиц в пульсарной туманности с головной ударной волной <i>Петров А. Е., Быков А. М., Осипов С. М.</i>	44
О стабильности тороидальных структур в пульсарных туманностях <i>Пономарёв Г. А., Левенфиш К.П., Петров А.Е.</i>	45
Спектральная эволюция длинных гамма-всплесков по наблюдениям в эксперименте Конус-Винд <i>Свинкин Д. С., Уланов М.В., Темираев Ю.Р., Фредерикс Д.Д., Цветкова А.Е., Дёмин А.Г.</i>	45
Modelling of electron acceleration in relativistic turbulent plasma flow <i>Романский В. И., Быков А.М., Осипов С. М.,</i>	46

Биофизика **48**

Механизмы нейтронного взаимодействия стабильных изотопов, имеющих ковалентную связь <i>Джимак С. С., Басов А.А., Моисеев А.В.</i>	48
Рэлеевское и мандельштам-бриллюэновское рассеяние света в растворах бычьего сывороточного альбумина при различных концентрациях в окрестности тепловой денатурации <i>Дмитриев А. В., Федосеев А.И., Лушников С.Г.</i>	50
Модель генерации флуоресцентного сигнала интеркаляционным красителем в ходе полимеразной цепной реакции <i>Федоров А. А.</i>	51
Разработка методов количественного описания гистологических образцов на основе их фазовых изображений, полученных с помощью цифровой голографической микроскопии <i>Белашов А. В., Жихорева А. А.</i>	53
Исследование динамики накопления протопорфирина IX в клеточных линиях A549, HeLa и 3T3 <i>Горбенко Д. А., Белашов А.В., Семёнова И.В., Васютинский О.С., Литвинов И.К., Беляева Т.Н, Корнилова Е.С.</i>	54

Численное исследование движения створок и структуры течения в модели венозного клапана с упругими створками <i>Тихомолова Л. Г., Я.А. Гатаулин, А.Д. Юхнев, Росуховский Д.А.</i>	56
Масс-спектрометрическое определение изотопного состава углерода в листьях растений при газификации пробы окислением дрожжами <i>Кулешова Т. Э., Павлова Е.С., Титов Ю.А., Кузьмин А.Г., Галль Н.Р.</i>	57
Исследование влияния времени нагрева и мощности микроволнового излучения на микроструктуру формируемого гидроксипатита кальция <i>Мараева Е. В., Халугарова К. Н., Заикина А. В.</i>	59
Моделирование процессов образования солей кальция в микроразмерных каналах (капиллярах) в режиме непрерывного потока <i>Афоничева П. К., Буляница А.Л., Евстрапов А.А.</i>	60
Голографическое исследование отклика клеток рака почки, саркомы и меланомы пациентов на фотодинамическое воздействие <i>Жихорева А. А., Белашов А. В., Авдонкина Н.А., Балдуева И. А., Данилова А. Б., Гельфонд М. Л., Нехаева Т. Л., Семенова И.В. , Васютинский О. С.</i>	62
Комплексная оптическая оценка раннего обнаружения периодонтита <i>Черный-Ткач К. Б., Тимченко Е.В., Тимченко П.Е., Фролов О.О., Зыбин М.А., Долгушов Г.Г.</i>	63
Планарное устройство из эластомерного материала для выделения нуклеиновых кислот <i>Гермаш Н. Н., Есикова Н.А., Афоничева П.К., Антифеев И.Е., Петров Д.Г., Евстрапов А.А.</i>	65
Изменение структуры и стабильности двойной спирали ДНК при образовании платиновых аддуктов <i>Солдатова А. А., Тымченко Е.Е., Глова В.И., Чихиржина Е.В., Поляничко А.М.</i>	66
Исследование влияния гидрохлоридных форм аминокислот на формирование биомиметических композитов в присутствии нанокристаллического гидроксипатита <i>Голощупов Д. Л., В.М. Кашкаров, К.А. Никитков, В.Н. Бартенева, Ю.А. Ипполитов, И.Ю. Ипполитов, П.В. Середин</i>	67
Прецизионное исследование начальных изменений биогенного апатита эмали в случае патологии флюороза методом спектроскопии комбинационного рассеяния <i>Никитков К. А., Д.Л. Голощупов, В.М. Кашкаров, В.Н. Бартенева, Ю.А. Ипполитов, И.Ю. Ипполитов, М. Савватеев, А.В. Вахтель, П.В. Середин</i>	68
Особенности взаимодействия НМГВ-доменных белков из дифференцированных клеток с ДНК, модифицированной цисплатином <i>Старкова Т. Ю., Поляничко А.М., Чихиржина Е.В.</i>	70
Исследование модификаций коллагена I типа методом ИК-спектроскопии <i>Старостина А. А., Павлов С.И., Лихачев А.И., Нащеккина Ю.А., Трусова Н.А., Сироткина М.Ю. , Нащеккин А.В.</i>	71

Применение мегагерцового ультразвука для выделения нуклеиновых кислот <i>Петров Д. Г., Антифеев И.Е., Гермаш Н.Н., Макарова Е.Д.</i>	72
Воздействие низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления в смеси воздуха и аргона на оптические свойства биотканей <i>Ашурбеков Н.А., Шахсинов Г. Ш., Гираев К.М., Исрапов Э.Х. , Исаева З.М., Муртазаева А.А., Рабаданов К.М.</i>	73
Визуализация внутриклеточных структур бактерий при помощи экспансионной микроскопии <i>Румянцева Н. А., А.Д. Ведяйкин, И.Е. Вишняков, М.А. Ходорковский</i>	75
Контроль кислородного обеспечения тканей человека с использованием неинвазивной системы на основе многоканального интегрального анализатора оптических спектров <i>Мазинг М. С., Зайцева А.Ю., Кисляков Ю.Я., Давыдов В.В., Кондаков Н.С., Авдюшенко С.А.</i>	76
Фотоимпедансный эффект в контакте металл/электролит/клетка <i>Ступин Д. Д., Абелит А.А.</i>	78
Неинвазивная оценка функционального состояния человека с использованием мультисенсорной обучаемой диагностической системы на основе полиселективных электрохимических сенсоров и математических методов многомерного анализа <i>Созинова О. Ю., Зайцева А.Ю., Кислякова Л.П., Кисляков Ю.Я.</i>	79
Patient-specific kidney phantoms for an LED-based photoacoustic imaging. <i>Nikitichev D. I.</i>	81
Исследование воздействия гипохлорита натрия на структуру нуклеиновых кислот методом инфракрасной спектроскопии <i>Осинникова Д. Н., Морошкина Е.Б., Поляничко А.М.;</i>	82
Математическая модель механического возмущения мембраны нейрона под действием электрического импульса <i>Котикова М. Р., Чижов А.В.</i>	83
Частотно-фазовая синхронизация зрительно индуцированных МЭГ-сигналов коры головного мозга человека <i>Исаева А. Г., Панищев О.Ю., Демин С.А., Ильдирякова А.Р.</i>	84

Матфизика и численные методы 86

Каноническая формулировка теоретико-полевого варианта теории вложения с Эйнштейновскими связями <i>Семенова Е. Н., Пастон С.А.</i>	86
Исследование системы уравнений диффузии с реакцией, связанной с формированием сетчатки глаза Дрозофилы <i>Руколайне С. А., Варш С. Е.</i>	87

Начально-краевая задача для системы уравнений одномерной неньютоновской гемодинамики <i>Кривовичев Г. В.</i>	88
Моделирование физических процессов при распространении ультразвуковой волны в металлических средах <i>Можайко А. А., Давыдов В.В., Рудь В.Ю.</i>	89
Квантовые эффекты при образовании шнура тока в халькогенидном стеклообразном полупроводнике <i>Совтус Н. В., Мынбаев К.Д.</i>	91
Regular black holes and self-gravitating solitons replacing naked singularities <i>Dutnikova I.</i>	92
Форма вертикального трехмерного жидкого моста между произвольными выпуклыми поверхностями <i>Галактионов Е. В., Галактионова Н.Е., Тропп Э.А.</i>	93
Взаимодействие уединенной волны с нанопорами в кристалле стехиометрии A_3B <i>Захаров П. В., Старостенков М. Д., Луценко И. С., Кочкин А. С.</i>	94
Разработка модели для определения дефектов по отраженной ультразвуковой волне с использованием нейронных сетей <i>Грецева А. С., Давыдов В.В., Рудь В.Ю.</i>	95
Обратная задача о колебании стержня с переменным сечением <i>Утяшев И. М.</i>	96
Компьютерное моделирование трехслойных ферромагнитных наносистем в магнитном поле <i>Белим С. В., Белим С.С.</i>	98
Нелинейные волны уравнения синус-Гордона в модели с тремя примесными модами <i>Самсонов К. Ю., Кудрявцев Р.В., Гумеров А.М., Екомасов Е.Г.</i>	99
Верификация интегральной модели парогравитационного дренажа с использованием данных по месторождению Синьцзян и численного решения методом Эйлера <i>Гильманов А. Я., Фёдоров К. М., Шевелёв А. П.</i>	101
Моделирование дифференцированной закалки железнодорожных рельсов сжатым воздухом <i>Невский С. А., Сарычев В.Д., Кормышев В.Е., Полевой Е.В.</i>	102
Модификация метода двойного слоя для решения краевых задач магнитостатики <i>Филиппов Д. М., Шуйский А. А.</i>	103
Математическое моделирование усталостного масштабного-структурного разрушения металлов при сложном напряженном состоянии <i>Завойчинская Э. Б.</i>	105

Требования к сетке при проведении численного моделирования методом моделирования крупных вихрей с пристеночными функциями <i>Колмогоров Д. К., Гарбарук А. В.</i>	107
Исследование эффекта неустойчивости роста толстостенных трубок из сапфира способом Степанова <i>Васильев М.Г., Бахолдин С.И., Крымов В.М.</i>	108
Явные изометрические вложения псевдоримановых пространств: методы и приложения <i>Шейкин А. А., Марков М.В., Федулов Я.А., Пастон С.А.</i>	109
The limit shape of the height function in the six-vertex model with domain-wall boundary conditions <i>Belov P. A., Reshetikhin N. Yu.</i>	110

Наноструктурированные и тонкопленочные материалы 111

Optically driven terahertz waves polarization modulation by single-wall carbon nanotube thin film <i>Kvitsinskiy A., Demchenko P., Novoselov M., Anoshkin I., Bogdanov K., Baranov A., Khodzitsky M.</i>	111
Влияние эффекта чётности n-алканов на структурные фазовые переходы <i>Гурьева С. А., Марихин В.А., Волчек Б.З., Медведева Д.А.</i>	113
Изменение дираковского конуса поверхностных топологических состояний при нанесении ферромагнетиков на BiSbTeSe_2 <i>Кавеев А. К., Терпицкий А.Н., Терещенко О.Е., Голяшов В.А., Естюнин Д.А., Шикин А.М., Schwier E.F.</i>	114
Спектральные свойства новых прозрачных стеклокерамик на основе наноразмерных кристаллов $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ <i>Еремеев К. Н., Дымшиц О.С., Алексеева И.П., Хубецов А.А., Запалова С.С., Центр М.Я., Басырова Л.Р., Лойко П.А., Жилин А.А., Попков В.И.</i>	116
Особенности диффузии водорода через мембрану из аморфного сплава $\text{Fe}_{92}\text{Si}_6\text{B}_2$ <i>Плужникова Т. Н., Федоров В.А., Балыбин Д.В., Яковлев А.В., Плужников С.Н.</i>	118
Исследование влияния габитуса нанозародышей на специфику фазовых переходов в длинноцепочечных молекулярных кристаллах и полимерах <i>Борисов А. К., Егоров В. М., Марихин В. А.</i>	119
Crystal growth and coalescence mechanisms in crystallizing liquid metal film <i>Galimzyanov B.N., Yarullin D.T., Mokshin A.V.</i>	120
Рентгендифракционное исследование материала на основе вольфрама для первой стенки термоядерного реактора ИТЭР <i>Козушкина А. И., С. И. Павлов, А. А. Левин</i>	121
Исследование особенностей призмного ввода узкополосного излучения в диффузионный волновод методом синхронного детектирования <i>Васильева М. В., Лихачев А.И., Нащекин А.В., Соколов Р.В.</i>	123

Особенности структуры нитевидных нанокристаллов оксида меди по данным электронной микроскопии <i>Берминова М.С., Мясоедов А.В., Калмыков А.Е., Сорокин Л.М.</i>	124
Расчет электропроводности тонкого проводящего слоя с учетом граничных условий Соффера и анизотропии изоэнергетической поверхности проводника <i>Савенко О.В., Кузнецов П.А., Кузнецова И.А.</i>	125
Взаимодействие электромагнитной Е-волны с тонкой проводящей пленкой с учетом анизотропии изоэнергетической поверхности проводника и постоянной длины свободного пробега <i>Романов Д. Н., Кузнецова И. А., Юшканов А. А.</i>	127
Атомно-силовая микроскопия пористых сегнетоэлектрических пленок PZT <i>Гущина Е. В., Зайцева Н.В., Делимова Л.А., Орлов Г.А., Серегин Д.С., Воротилов К.А.</i>	127
Фурье-анализ растрескивания тонких пленок гексагональных полупроводников <i>Компан М. Е., Бессолов В.Н., Грузинов Н.Д.</i>	129
Эффект модуляции состава при спинодальном распаде твердых растворов $Zn_xCd_{1-x}Te$ в условиях энергетического резонанса <i>Кузнецов В.В., Москвин П.П., Скуратовский С.И.</i>	130
Расчет спектра комбинационного рассеяния графеновой наноленты <i>Шарин Е. П., Понамарев В.В.</i>	132
Дифракция света на многослойных голографических дифракционных структурах на основе фотополимерного материала <i>Дудник Д. И., Шарангович С.Н.</i>	133
Зарождение гексагональной и кубической фаз GaN на наноструктурированной подложке Si(100) <i>Коненкова Е. В., Бессолов В.Н., Коненков С.Д., Родин С.Н., Середова Н.В.</i>	134
Synthesis of composite single crystal structures on the basis of iron borate for fundamental studies and practical applications <i>Mogilenec Yu. A., Seleznyova K.A., Seleznev K.A., Strugatsky M.B., Yagupov S.V.</i> .	136
Деформация ленточных аморфных металлических сплавов при синергическом действии нагрузки и импульсного электрического тока <i>Яковлев А.В., Федотов Д.Ю., Федоров В.А., Плужникова Т.Н.</i>	137
Исследование влияния условий роста на толщину переходных слоев в напряженных сверхрешетках InAs/GaSb <i>Николаев А. А., Левин Р.В., Неведомский В.Н., Пушный Б.В.</i>	138
Анизотропные плазмоны в структурах Au/GaAs(001) с нанокластерами золота <i>Берковиц В. Л., Кособукин В.А., Улин В.П., Солдатенков Ф.Ю. Левицкий В.А.</i> ...	139
Диэлектрические свойства сегнетоэлектрика бромида диизопропиламмония внедренного в пористые стекла <i>Милинский А. Ю., Барышников С.В., Чарная Е.В., Ускова Н.И.</i>	141

Содержание

Электродокаталитическая активность наноструктурированных пленок на основе палладия <i>Петриев И. С., Пушанкина П.Д., Луценко И.С., Глазкова Ю.С., Мальков Т.И.</i>	142
Определение состава в переменных слоях методом ПЭМ <i>Снигирев Л. А., Кириленко Д.А., Берт Н.А.</i>	144
Углеродные наноструктуры на базе SiC для устройств микро- и нанoeлектроники <i>Резван А. А., Климин В.С., Коц И.Н., Морозова Ю.В., Прокофьева В.В.</i>	145
Получение тонких плёнок сплавов кремний-вольфрам совместным магнетронным распылением однокомпонентных мишеней <i>Сердобинцев А. А., Стародубов А.В., Кожевников И.О., Павлов А.М., Галушка В.В., Рыскин Н.М.</i>	146
Высокотемпературная ползучесть титана в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях <i>Нарыкова М. В., Кадомцев А.Г., Бетехтин В.И., Токмачева-Колобова А.Ю.</i>	148
Исследования режимов формирования нанокристаллических плёнок ZnO:Ga методом магнетронного распыления <i>Гелдаш А.А., Левенец Л.Э., Гусев Е.Ю., Джуплин В.Н., Агеев О.А.</i>	149
Исследование спектров комбинационного рассеяния света в нанougлеродном материале, полученном методом импульсного лазерного осаждения <i>Елисеев И. А., Смирнов А.Н., Давыдов В.Ю., Платонов А.В., Явсин Д.А., Гуревич С.А.</i>	150
Формирование КНН в зависимости от топологии плёнки металла-катализатора в процессе металл-стимулированного химического травления с-Si <i>Ермина А. А., Жарова Ю.А., Большаков В. О., Толмачёв В.А.</i>	152
Численное моделирование текстурированного электрода из углеродных нанотрубок <i>Митин Д.М., Воробьев А.А., Раудик С.А., Можаров А.М., Мухин И.С.</i>	153
Исследование влияния модуля Юнга поликристаллического кремния на статические и динамические характеристики элементов микромеханических акселерометров <i>Житяева Ю. Ю., Гусев Е.Ю., Агеев О.А.</i>	155
Рост нанопроволок Ga (In) AsP с помощью Sn из паровой фазы в квазизамкнутом объеме <i>Карлина Л. Б., Vlasov A.S., Soshnikov I.P., Smirnova I.P., Levin A.A. Boiko M.E.</i>	156
Эпитаксиальный рост GaAs на Si(001) с аморфизированными участками <i>Ерёменко М. М., Балакирев С.В., Солодовник М.С., Черненко Н.Е., Агеев О.А.</i> ...	157
Интеркалирование графена, выращенного на карбиде кремния, атомами железа и кобальта <i>Гребенюк Г.С., Лобанова Е.Ю., Пронин И.И.</i>	158

Получение углеродных наностенок методом магнетронного высокочастотного распыления графитовой мишени в атмосфере аргона <i>Грудинкин С.А.,</i> Виноградов А.Я.	160
Исследование оптических свойств массивов ННК GaP _{1-x} N _x в гибкой полимерной матрице <i>Коваль О. Ю.,</i> Сапунов Г.А., Фёдоров В.В.	161
Особенности процесса формирования самокаталитических GaP ННК на Si (111) <i>Федина С. В.,</i> Сапунов Г. А., Фёдоров В. В.	162
Исследование влияния изменения показателя преломления внешней среды на оптический отклик серебряных наночастиц <i>Невойт В. И.,</i> А.И. Лихачев, А.В. Нащекин.	163
Микроструктура полуполярных слоёв GaN(<i>h0-hl</i>), синтезированных на нанопофилированных подложках Si(001) <i>Мясоедов А.В.,</i> Берт А.Н., Бессолов В.Н.	164
Оптимизация технологии роста 3С-SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме <i>Лебедев А.А.,</i> Никитина И.П., Шахов Л.В.	166
Разработка установки фотоэлектрохимического травления для получения пористого кремния с латеральноградиентной пористой текстурой <i>Мирошниченко О. В.,</i> Спивак Ю.М.	168
Исследование параметров микропористой структуры цеолитных композиций сравнительными сорбционными методами анализа <i>Мараева Е.В.,</i> Кононова И.Е., Скорникова С.А., Мошников В.А.	169
Морфологические, оптические и оптоэлектронные свойства InGaN наноструктур развитой морфологии, синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии <i>Гридин В. О.,</i> Котляр К.П. , Резник Р.Р., Бородин Б.Б., Крыжановская Н.В., Алексеев П.А., Цырлин Г.Э.	170
Исследование оптических свойств и эпитаксиального формирования фотовольтаических гетероструктур GaP(NAs)/Si <i>Сапунов Г. А.,</i> Коваль О.Ю., Федоров В.В., Большаков А.Д.	171
Механизмы токопереноса в пленках поливинилового спирта с включениями многостенных углеродных нанотрубок <i>Васин С. В.,</i> Ефимов М.С., Сергеев В.А., Фролов В.И.	172
Исследования режимов формирования нанокристаллических пленок ZnO:In методом импульсного лазерного осаждения <i>Вакулов З.Е.,</i> Гелдаш А.А., Джуплин В.Н., Агеев О.А.	174
Теплопроводность объемных наноструктурированных образцов твердого раствора Bi ₈₅ Sb ₁₅ <i>Taghiyev M.M.,</i> Абдинова Г. Д., Абдуллаева И.А.	175

Содержание

Создание композиционного материала алюминий-ГНП с высокой твёрдостью и низкой теплопроводностью <i>Заваринский В. И., Возняковский А.А., Кидалов С.В.</i>	176
Исследование коллоидных нанокристаллов сульфида серебра-индия <i>Мазинг Д.С., Шугабаев Т.М., Александрова О.А., Мошников В.А.</i>	178
Получение композита с магнитооптическими свойствами методом золь-гель <i>Снежная Ж.Г., Апанасевич А.В., Сокура Л.А., Латыпова К.Н., Романов А.Е.</i>	179
Расчет и формирование мембран из монокристаллического кремния методом анизотропного жидкостного травления <i>Малохатко С. В., Житяева Ю.Ю., Гусев Е.Ю., Агеев О.А.</i>	180
High-frequency monolayer graphene conductivity equivalent circuit and Zitterbewegung <i>Ктиторов С. А., Фирсова Н.Е.</i>	181
Влияние времени электрохимического анодного травления на морфологию поверхности окисленного фосфида индия <i>Спивак Ю. М., Гребенщикова Е.А., Чернов Е.А., Самсонов В.А.</i>	182
Магнитокалорический эффект в сплавах на основе Ni-Mn-In, подвергнутых термобарической обработке <i>Емельянова С. М., Дьячкова Т.В.Тютюнник А.П.Зайнулин Ю.Г.Марченков В.В.</i>	183
Технологические аспекты получения функциональных материалов, армированных нановолокнами <i>Скворцова А.Н., Марков М.А., Быкова А.Д., Красиков А.В., Перевислов С.Н., Беляков А.Н.</i>	184
Диэлектрическая релаксация в тонких слоях диоксида ванадия <i>Смирнова Л.М., Кастро Р.А.</i>	185
Анизотропия локального анодного окисления в тонких слоях MoSe ₂ <i>Бородин Б.Р., Дунаевский М.С., Бенимецкий Ф.А., Алексеев П.А.</i>	186
Микроструктура и морфология двумерных массивов квантовых точек Ge в матрице Si/Al ₂ O ₃ <i>Сокура Л. А., В.Н. Неведомский, М.В. Байдакова, А.А. Левин, А.В. Белолипецкий, И.Н. Ясиевич, А.В. Ершов, Н.А. Берт</i>	188
Создание виртуального прибора для обработки результатов сорбционных измерений при исследовании наностержней оксида цинка <i>Мараева Е. В., Пермяков Н.В., Кедрук Е.Ю., Гриценко Л.В., Абдуллин Х.А.</i>	189
Первая экспериментальная формула ширины запрещенной зоны AlGaAs, обладающего вюрцитной кристаллографической фазой <i>Резник Р.Р.</i>	191
Сравнительный анализ оптических и физических свойств InAs и InGaAs квантовых точек <i>Салий Р. А., Минтаиров М.А., Минтаиров С.А., Надточий А.М, Калюжный Н.А.</i>	192

Исследование оптических и структурных свойств трехмерных островков InGaPAs, сформированных методом замещения элементов пятой группы <i>Андрюшкин В.В., Гладышев А.Г., Бабичев А.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Егоров А.Ю.</i>	193
Особенности комбинационного рассеяния света и низкочастотного шума в чипах, изготовленных на основе пленок графена на подложках 4H-SiC <i>Елисеев И. А., Усиков А.С., Лебедев С.П., Роенков А.Д., Пузык М.В., Зубов А.В., Макаров Ю.Н., Лебедев А.А., Шабунина Е.И., Дементьев П.А., Смирнов А.Н., Шмидт Н.М.</i>	195
Не требующие формовки мемристорные структуры на основе нанокристаллических пленок оксида цинка <i>Смирнов В.А., Авакян А.А., Томинов Р.В.</i>	196
Исследование закономерностей влияния управляющих параметров локального анодного окисления на резистивное переключение оксидных наноструктур титана для изготовления нейроморфных систем <i>Шарапов Н. А., Авилов В.И., Смирнов В.А.</i>	198
Исследование газочувствительных свойств наностержней оксида цинка при комнатной температуре <i>Бобков А. А.</i>	199
Методы измерения локальных эмиссионных характеристик многоострийных эмиттеров на основе УНТ <i>Колосько А.Г., Попов Е.О., Филиппов С.В., Поняев С.А.</i>	201
Влияние углерода в sp^1 гибридизированном состоянии на структуру тонких пленок PbSe <i>Разина А. Г., Казаков В.А., Кочаков В.Д.</i>	202
Использование электростатического энергоанализатора с плоскостью симметрии для исследования многоострийных полевых эмиттеров на основе углеродных нанотрубок <i>Филиппов С. В., Бондаренко В.Б., Гнучев Н.М., Давыдов С.Н., Колосько А.Г., Попов Е.О.</i>	203
Намагничность и электронный спиновый резонанс углерод/полимерного композита <i>Ионов А.Н., Волков М.П., Семенихин П.В., Николаева М.Н.</i>	204
Исследование фотоактивации газочувствительных слоев на основе наностержней оксида цинка <i>Налимова С. С., Рябко А.А., Максимов А.И., Мошников В.А.</i>	205
Синтез и исследование газочувствительных свойств тонких пленок оксида меди <i>Смирнов А. В., Платонов П.С., Царева Е.Р., Столбов Д.О., Тюнтеров Е.С.</i>	207
Bipolar switching properties of titanium dioxide thin films deposited by different techniques <i>Gerasimova M. I., Andreeva N., Chigirev D., Mazing D., Ivanov A.</i>	208

Численное моделирование поверхности полевого эмиттера на основе АСМ-профилограмм Чумак М.А., Никифоров К.А.	209
Влияние заряженного интерфейса на электрический транспорт в транзисторах на основе графена Бутко А.В., Бутко В.Ю., Лебедев С.П., Елисеев И.А., Смирнов А.Н., Давыдов В.Ю., Лебедев А.А., Кумзеров Ю.А.	210

Оптика и спектроскопия 212

Связанные состояния в континууме в диэлектрических волноводах конечной длины Кутузова А.А.	212
Электролюминесценция и нанопористая структура анодного оксида алюминия, гальваностатически сформированного в дистиллированной воде Овеченко Д.С., Бойченко А.П., Механошин И.С.	214
Анизотропная флуоресценция производных флуоресцеина MitoFluo и C ₈ -Fl в растворе при взаимодействии с липосомами Бельтюкова Д.М., Белик В.П., Богданов А.А., Васютинский О.С., Семенова И.В., Смолин А.Г.	215
Исследование формирования и фокусировки поверхностного плазмон-поляритона с помощью серебряного нано-кольца Козлова Е. С., Котляр В.В.:.....	217
A photoelectron wave function nodes as centers of quantum vortices in the case of ultrashort pulsed ionization of an atom Ларионов Н.В., Смирновский А.А.:.....	219
Спектр мод Лагерра-Гаусса при дифракции на круговой апертуре Брецько М.В., Акимова Я.Е., Егоров Ю.А., Милюков В.В.	220
Люминесценция кристаллов кремния и кварца при механическом разрушении Мамалимов Р.И., Щербаков И.П., Кулик В.Б., Пономарев А.В., Веттегрень В. И.:.....	221
Исследование спектров высокого разрешения нижних деформационных колебательных состояний ³² D ₂ S, ³³ D ₂ S, ³⁴ D ₂ S Ерсин Т.Е., Чжан Фанцэ, Елена С. Бехтерева.....	222
Разработка преобразователя оптических сигналов на основе градиентно-активированного ниобата лития Строганова Е.В., Кузора В.Ф., Галуцкий В.В., Гуляев Е.Н., Шмаргилов С.А.....	223
Сверхбыстрая спектроскопия переходного поглощения для изучения процессов анизотропной релаксации биологических молекул в растворе Горбунова И. А., Сасин М.Э., Бельтюков Я.М., Семенов А. А., Васютинский О.С.	225

Исследование микрокристаллов h-BN выращиваемых на подложках карбида кремния <i>Бреев И. Д., Бараш А.С., Роенков А.Д., Мохов Е.Н., Анисимов А.Н.</i>	226
Исследование особенностей преобразования черно-белых и цветных видеоизображений объекта в специальные звуковые сигналы <i>Чжан Ц. , В.В.Давыдов, В.Ю. Рудь</i>	227
Влияние импульсного УФ излучения на экситонную люминесценцию нанокристаллов CuCl в боратных стеклах <i>Бабкина А. Н., Зырянова К.С., Егорова Я.Б., Нурыев Р.К.</i>	228
Цифровая голографическая визуализация микрообъектов, удерживаемых оптической пространственной ловушкой <i>Соколенко Б. В., Шостка Н.В., Полетаев Д.А.</i>	230
High resolution study of $4v_2$ band of H_2S <i>Zhang F., Ersin T.E.</i>	231
Влияние геометрии области связи на характеристики передачи оптических кольцевых резонаторов <i>Зарецкая Г. А., Дроздовский А.В.</i>	232
Устойчивость связанных состояний в континууме в низкоконтрастных фотонных структурах <i>Маслова Е. Э., Рыбин М.В.</i>	234
Исследование оптических свойств образцов твердых растворов $Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te$, изготовленных различными методами <i>Ружевиц М. С., Баженов Н.Л., Мынбаев К.Д., Ремесник В.Г.</i>	235
Поляризационные особенности несимметричных ТЕ и ТМ вихревых мод <i>Егоров Ю. А., Брецко М.В., Акимова Я.Е., Милоков В.В.</i>	236
Люминесцентные свойства рентгеноаморфного зольгель материала на основе SiO_2 со структурой кристаллита, активированного Eu^{3+} <i>Кравец В. А., Иванова Е.В., Заморянская М.В.</i>	237
Управление топологической структурой солитонов в лазере с насыщающимся поглощением <i>Розанов Н.Н., Федоров С.В., Веретенев Н.А.</i>	239
Рентгеноспектральные исследования титанатов кальция-меди <i>Некипелов С. В., Жук Н.А., Мингалева А.Е. , Петрова О.В., Сивков Д.В., Сивков</i>	240
Frequency shifts of the magnetic resonance of Rb and K atoms in the Rb-K tandem magnetometer <i>Картошкин В. А.</i>	241
Поляризованная флуоресценция молекул ФАД в растворах при возбуждении лазерным излучением <i>Краснопевцева М.К., Белик В.П., Семенова И.В., Смолин А.Г., Васютинский О.С.</i>	242

Оптическая стеклокерамика на основе наноразмерных кристаллов алюмомагниевого шпинели, допированной железом <i>Букина В.С., Дымшиц О.С., Алексеева И.П., Хубецов А.А., Запалова С.С., Центр М.Я., Басырова Л.Р., Волокитина А.А., Лойко П.А., Жилин А.А.</i>	242
Спектральный анализ плечевых тканей крыс после экспериментального моделирования стероиндуцированной остеорезорбции <i>Ягофарова Е. Ф., Тимченко Е. В., Тимченко П. Е., Писарева Е. В., Власов М. Ю., Волова Л. Т., Фролов О. О., Федорова Я. В., Тихомирова Г. П., Романова Д. А., Даниэль М. А.</i>	244
Голографическое формирование дифракционных структур в фотополимерном материале двумерными бесселеподобными световыми пучками с учетом двухпучковых взаимодействий <i>Долгирев В.О., Шаррангович С.Н., Семкин А.О.</i>	245
Моделирование фокусировки лазерного света полиэстровым микроцилиндром с металлическим покрытием <i>Савельева А. А., Козлова Е.С.</i>	246
Технологические аспекты роста и оптические свойства кристалла оксида галлия <i>Дмитрий П. Ю., Спиридонов В.А., Закгейм Д.А., Бауман Д.А., Романов А.Е., Бугров В.Е.</i>	248
Распространение оптических вихрей с топологическим зарядом ≥ 1 в скрученных анизотропных оптических волокнах <i>Баршак Е.В., Алексеев К.Н., Викулин Д.В., Лапин Б.П., Яворский М.А.</i>	250
Особенности рассеяния света на димере вблизи исключительной точки <i>Дмитриев А. А., Рыбин М.В.</i>	251
Исследование устойчивости пространственных мод в четверть-дисковых резонаторах <i>Дунаевский М. С., Алексеев П.А.</i>	252
Polarized spectroscopy of Europium (III) ions in C_2 sites: A case study of monoclinic $KY(WO_4)_2$ <i>Volokitina A. A., Loiko P., Dunina E., Kornienko A., Serres J. M. , Aguiló M., Díaz F., Pavlyuk A., and Mateos X.</i>	253
Униполярные электромагнитные импульсы: существование, способы получения и особенности взаимодействия с веществом <i>Архипов Р. М., Архипов М.В., Розанов Н.Н.</i>	255
Анизотропные центры окраски в гексагональном нитриде бора <i>Алтынбаев Л. А., Л.В. Котова, И.А. Елисеев, В.Ю. Давыдов, М.О. Жукова, В.Т. Hogan, А. Baldycheva, В.П. Кочерешко</i>	257
Исследование тантало-ниобата гадолиния $(Gd(Nb_xTa_{1-x})O_4)$ методом локальной катодолюминесценции <i>Гусев Г. А., Маслובהва С.М., Заморянская М.В.</i>	258

Нестационарные оптические спектры пропускания неоднородной плазмы наносекундного электрического разряда с щелевым катодом в неоне вблизи узких резонансов поглощения <i>Аиурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Курбангаджиева М.Б., Закарьяева М.З.</i>	259
О возможности управления скоростью релаксации центров окраски в оптических волокнах <i>Дмитриева Д. С., Пилипова В.М., Давыдов В.В., Рудь В.Ю.</i>	260
Моделирование формирования массива фотонных наноструй диэлектрическими микроступеньками <i>Зайцев В. Д., Стафеев С.С.</i>	262
Исследование взаимодействия пары оптических светлых пространственных пирозлектрических солитонов при их синфазном распространении в нелегированном кристалле ниобата лития на длине волны света 532 нм <i>Перин А.С., Гаппарова М.Н., Романенко Д.К., Сокольников А.В., Окунев Д.В.</i>	264
Рассеяние пространственно ограниченных пучков рентгеновских волн в латеральных периодических структурах <i>Казаков Д. В., Пунегов В.И.</i>	265
Структурные и динамические свойства короткопериодных сверхрешеток GaN/AlN, выращенных методом субмонослойной цифровой эпитаксии <i>Давыдов В. Ю., Рогинский Е.М., Китаев Ю.Э., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Яговкина М.А., Нечаев Д.В., Жмерик В.Н.</i>	266
Катодолюминесцентные исследования синтетических алмазов, синтезированных методом НРНТ <i>Орехова К. Н., Загорянская М.В.</i>	267
Исследование влияния мощного СВЧ-пучка на оптические характеристики кристаллов ZnSe:Fe <i>Артемов К. В., А.М. Давыдов, С.Ю. Казанцев, С.В. Подлесных</i>	269
Исследование механических напряжений на границе SiC/AlN методом спектроскопии КРС <i>Лихачев К. В., Бреев И.Д., Мохов Е.Н., Анисимов А.Н.</i>	270
Исследование распределения NV-центров в природном алмазе методами ФЛ и ОДМР <i>Яковлева В.В., Бреев И.Д., Анисимов А.Н., Титков С.В., Баранов П.Г.</i>	271
Спектроскопические исследования низкочастотных фононов в короткопериодных СР GaN/AlN как способ диагностики структуры <i>Давыдов В. Ю., Рогинский Е.М., Китаев, Ю.Э., Смирнов А.Н., Елисеев, И.А., Нечаев Д.В., Жмерик В.Н., Смирнов М.Б.</i>	272
Оптические спектры силикатных стекол, окрашенных ионами меди (Cu^+ , Cu^{2+}) и хрома (Cr^{3+} , Cr^{6+}) <i>Русан В.В.</i>	274

Оптоэлектронные приборы 276

Градиентный фазочувствительный усилитель на основе PPLN <i>Галуцкий В. В., Ивашко С.С., Строганова Е.В.,</i>	276
Влияние протонного облучения на оптические и спектральные характеристики фотоприемников 4H-SiC <i>Калинина Е.В., Каташев А., Забродский В., Никитина И., Иванова Е.</i>	277
Генерация «капельного» пучка Бесселя на основе полупроводникового лазера <i>Абдулразак С. Х., Чистяков Д.В., Мыльников В.Ю., Когнивицкая Е.А., Задиранов Ю.М., Дерягин Н.Г., Дюделев В.В., Кучинский В.И., Лосев С.Н., Соколовский Г.С.</i>	278
Light-emitting diodes with InGaN/GaN quantum wells and modulation of injected current by designed electrode <i>Khmyrova I., Nishidate Y., Kovalchuk A., Tsatsulnikov A., Maximov I. and Shapoval S.</i>	279
Формирование омических контактов к <i>n</i> -легированным слоям Al _x Ga _{1-x} N:Si с высоким содержанием алюминия (<i>x</i> >0.5) <i>Буренина Д. С., Семенов А.Н., Гусева Ю.А., Кулагина М.М., Смирнова И.П., Задиранов Ю.М., Нечаев Д.В., Кошелев О.А., Трошков С.И., Жмерик В.Н.</i>	281
Механизм токопрохождения в GaAs фотопреобразователях лазерного излучения ($\lambda=809$ нм) при температурах 100-420 К <i>Минтаиров М. А., Евстропов В.В., Минтаиров С.А. , Нахимович М.Н. , Шварц М.З. , Калюжный Н.А.</i>	282
Исследование применения высокочастотной модуляции оптического излучения лазера для улучшения точностных характеристик ВОГ <i>Востриков Е.В., Смирнов Д.С., Никифоровский Д.А., Погорелая Д.А., Алейник А.С.,</i>	283
Моделирование спектральных и мощностных характеристик светодиодных структур среднего инфракрасного диапазона на основе InAs(Sb) <i>Липницкая С.Н., Семакова А.А., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л.</i>	285
Влияние температуры на оптические и электрические свойства длинноволновых светодиодных гетероструктур на основе InAsSb <i>Семакова А. А., Мынбаев К. Д., Баженов Н. Л., Романов В. В., Моисеев К. Д.</i>	286
Исследование поглощения в волноводных InGaAs гетероструктурах «квантовые яма-точки» <i>Харченко А.А. , Надточий А.М. , Минтаиров С.А., Максимов М.В.</i>	287
Двухспектральные фотодиоды на основе ГС с фоточувствительными слоями из твердых растворов InAsSb для средней ИК области спектра ($l=3-5$ мкм) <i>Климов А. А., Кунков Р.Э. , Лебедева Н.М. , Лухмырина Т.С. , Матвеев Б.А., Ременный М.А.</i>	289

Быстродействующие фотодиоды для регистрации инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 0.9 – 1.85 мкм <i>Пивоварова А.А., Куницына Е.В., Андреев И.А, Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П., Коновалов Г.Г., Иванов Э.В.</i>	290
Реализация магнитного резонанса с использованием вертикально-излучающих лазеров с внутррезонаторными контактами и ромбовидной токовой апертурой для магнитоэнцефалографических систем <i>Бобров М. А., Блохин С.А., Малеев Н.А., Блохин А.А., Васильев А.П., Кузьменков А.Г., Пазгалев А.С., Петренко М.В., Дмитриев С.П., Вершовский А.К., Устинов В.М., Новиков И.И. , Карачинский Л.Я.</i>	292
Гибкие мембраны n-/р-GaP нитевидных нанокристаллов в матрице модифицированных силоксанов с прозрачным электродом из одностенных углеродных нанотрубок <i>Кочетков Ф.М., Неплох В.В. , Федоров В.В. , Большаков А.Д., Цырлин Г.Э. , Исламова Р.М. , Мухин И.С.</i>	293
Система визуального контроля и передача данных по технологии Li-Fi для пациентов в вегетативном состоянии и состоянии минимального сознания <i>Дегтярева С.А., Бугров В.Е., Смирнова И.Г., Полухин И.С., Андреев Ю.С., Кондратьева Е.А.</i>	294
Изменение профиля распределения концентрации дефектов по площади светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур в процессе токовых испытаний <i>Фролов И.В., Радаев О.А., Сергеев В.А.</i>	296
Низкоплотные InAs квантовые точки для применения в источниках однофотонного излучения спектрального диапазона 1.3 мкм <i>Блохин С.А., Блохин А.А., Бобров М.А., Малеев Н.А., Васильев А.П., Кузьменков А.Г., Устинов В.М.</i>	297
Вертикально-излучающий лазер спектрального диапазона 1.55 мкм, изготовленный методом спекания пластин, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии <i>Рочас С.С., Блохин С.А., Бобров М.А., Блохин А.А. , Малеев Н.А. , Гладышев А.Г. , Новиков И.И. , Карачинский Л.Я. , Егоров А.Ю.</i>	298
Исследование хаотической динамики спин-волнового оптоэлектронного генератора <i>Кондрашов А.В., Устинов А.Б.</i>	300
Инжекционный источник однофотонного излучения спектрального диапазона 1.3 мкм на основе вертикального микрорезонатора с пассивным диэлектрическим резонатором <i>Кузьменков А.Г., Блохин С.А. , Бобров М.А. , Малеев Н.А. , Блохин А.А. , Васильев А.П. , Shchukin V.A. , Ledentsov N.N. , Reitzenstein S., Устинов В.М.</i>	301
Природа температурного падения эффективности мощных синих InGaN/GaN светодиодов <i>Шабунина Е.И., Шмидт Н.М., Карташова А.П., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Тальнишних Н.А., Иванов А.Е.</i>	303

Влияние облучения на вольт-амперные характеристики диодов Шоттки на основе нитрида галлия <i>Стрельчук А.М., Роенков А.Д., Козловский В.В., Лебедев А.А.</i>	304
Исследование перестройки частоты малошумящего многокольцевого спин-волнового оптоэлектронного генератора <i>Устинов А.Б., Никитин А.А., Кондрашов А.В., Лебедев В.В., Петров А.Н., Шамрай А.В., Калиникос Б.А.</i>	305
Исследование влияния температуры на концентрирующую способность линзы Френеля <i>Филимонов Е.Д., Левина С.А., Шварц М.З.</i>	307
Особенности спектров усиления гетероструктур с активной областью переходной размерности <i>Корнышов Г.О., Гордеев Н.Ю., Паюсов А.С., Серин А.А., Шерняков Ю.М., Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Максимов М.В., Жуков А.Е.</i>	308
Метод низкокогерентной рефлектометрии для исследования микрокольцевых оптических резонаторов <i>Рябцев И.А., Никитин А.А., Кондрашов А.В., Витько В.В., Конкин Д.А., Коколов А.А., Бабак Л.И., Устинов А.Б., Калиникос Б.А.</i>	309
Частотно-временной анализ акустических волн в интегральном акустооптическом модуляторе на кристалле LiNbO_3 <i>Варламов А.В., Иванов С.И., Лавров А.П., Шамрай А.В.</i>	311
Двухступенчатое сжатие и нагрев плазмы многозарядных ионов, создаваемой в малоиндуктивном сильноточном Z-разряде капиллярного типа, как метод накачки активной среды коротковолновых лазеров <i>Калинин Н.В., Тимшина М.В., Бурцев В.А.</i>	312
Поверхностные явления	314
Алгоритм калибровки полупроводниковых газовых сенсоров и определение концентраций летучих углеводородов в атмосферном воздухе с применением преобразований Фурье <i>Казаков С.А., Гревцев М.А., Хавров Г.Д.</i>	314
Кардинальные изменения электронной структуры и формирование углеродной наноструктуры на поверхности $\text{SiC}(111)\text{-}4^\circ$ при адсорбции металлов <i>Тимошнев С.Н., Бенеманская Г.В., Кукушкин С.А.</i>	315
Электронно-стимулированная десорбция атомов калия из слоя калия, адсорбированного на вольфраме, покрытым плёнкой золота <i>Лапушкин М.Н., Громов И.А., Кулешова Т.А., Кузнецов Ю.А., Самсонова Н.С.</i>	316
Создание графенового и графитового покрытия на металлических полевых электронных эмиттерах для улучшения их характеристик <i>Павлов В.Г., Бернацкий Д.П.</i>	318

Формирование клатратных структур в приповерхностных слоях сильно разбавленных водных растворов <i>Шостка В.И., Шостка Н.В., Вершицкий В.И.,</i>	319
Оптические свойства щелочно-галлоидных кристаллов <i>Каплунов И.А., Кропотов Г.И., Роголин В.Е.</i>	321
Рецептурно-технологические приемы повышения эффективности минерализации древесной матрицы <i>Килюшева Н. В., Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Беляев А.О.</i>	322
Воздействие мощного ультрафиолетового лазерного импульса на полированные металлы и полупроводники <i>Каплунов И. А., Хомич Ю.В., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Роголин В.Е., Ямщиков В.А., Иванова А.И.</i>	323
Парамагнетизм на температурной зависимости намагниченности в сверхпроводящем полупроводниковом твердом растворе $(Pb_zSn_{1-z})_{1-x}In_xTe$ <i>Денисов Д. В., Михайлин Н. Ю., Шамшур Д. В., Парфеньев Р. В.</i>	324
Релаксационные переходы в приповерхностных нанослоях СВМПЭ, обнаруживаемые методом плазмоиндуцированной термолюминесценции <i>Myasnikova L., Marikhin V., Gladkov A., Radovanova E., Solovieva O.</i>	326
Изучение надмолекулярной структуры поверхности текстурированного полимерного покрытия металлопроката <i>Смирнов В.В., Максимова О.Г., Осипов С.В., Осипова Н.А., Байджанов А.Р., Меньшиков Е.В., Максимов А.В., Осипов Е.Б.</i>	327
Создание композиционного материала Ag/por-Si методами электрохимии за один технологический этап <i>Гагарина А.Ю., Спивак Ю.М., Портнова М.О., Заикина А.В., Мошников В.А.</i>	328
Исследование влияния температуры субфазы на эффективный дипольный момент молекул жидкого кристалла 8CB <i>Беглецова Н.Н., Миронюк В.Н., Смирнова А.И., Усольцева Н.В., Глуховской Е.Г.</i>	329
Особенности самоорганизации лангмюровских монослоев производных порфирина на границе раздела фаз жидкость-газ <i>Беглецова Н.Н., Миронюк В.Н., Смирнова А.И., Усольцева Н.В., Глуховской Е.Г.</i>	331
Технология нанопланарной подготовки поверхности подложек GaSb и InP <i>Жирнов А.М., Маричев А.Е., Эполетов В.С., Прасолов Н.Д., Левин Р.В., Пушный Б.В.</i>	332
Покрывтия с регулируемой степенью гидрофобности на основе порошковых полимерных композиций <i>Ваганов Г.В.; Радченко И.Л., Ваганов В.В. Ильина И.А.</i>	333
Особенности функционализации наночастиц пористого кремния разного типа проводимости лекарственными веществами <i>Сатторов М.Ш., Спивак Ю.М., Гавазюк Н.О.</i>	334

Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона 336

- Повышение эффективности терагерцового излучения короткого электронного сгустка за счет стабилизации его длины низкочастотным излучением в волноводе
Orarina Yu.S., Bratman V., Lurie Yu. 336
- Поглощение и трансформация СВЧ – электромагнитных волн в кварцосодержащих гетерогенных материалах
Махмудов Х. Ф. 337
- Вклад лучистой компоненты в тепловую проводимость среды
Шамтаров Е.Ю., Бугримов А.Л., Родэ С.В., Жагина И.Н. 338
- Разработка методики и волоконно-оптической системы для проверки в безэховой камере диаграммы направленности активной фазированной антенной решетки в дальней зоне
Мороз А. В., В.В. Давыдов, В.Ю. Рудь 339
- Исследование вакуумных автоэмиссионных ячеек с катодом, сформированным методом локального ионно-стимулированного осаждения
Шандыба Н.А., Панченко И.В., Коломийцев А. С., Житяев И.Л. 341
- Оптический отклик плазменного кристалла: от рассеяния к усилению
Горбенко И.В., Качоровский В.Ю., Кнап В. 342
- «Волновая механика» импульсов в коаксиальном тракте при пикосекундном переключении диодного обострителя
Иванов М.С., Брылевский В.И., Родин П.Б. 343
- Электронные мазеры с селективным возбуждением супермоды типа Тальбо
Orarina Yu.S., Peskov N.Yu., Savilov A.V., Schegolkov D.Yu. 344
- Особенности построения волоконно-оптической линии связи для передачи сигналов в радиолокационных станциях в диапазоне частот от 0.135 до 40 ГГц
Пчелкин Г.А., Давыдов В.В., Рудь В.Ю. 345
- Плазменная радиофотоника для управления потоком излучения миллиметрового и субмиллиметрового спектрального диапазона
Богачев Н.Н., Алексеев Е.Е., Артемьев К.В., Гусейн-заде Н.Г., Казанцев С.Ю., Подлесных С.В., Шохрин Д.В. 347
- Исследование радиационного образования (плазмоида) в воздушной среде радиолокационным методом
Фадееенко В.Б., Фадееенко И.В., Васильев Д.А., Давыдов В.В., Рудь В. Ю. 348

Примеси и дефекты в твердом теле 350

- First-principles calculation of possible carbon positions over cementite (Fe_3C) lattice
Okishev K.Yu., Verkhovykh A.V., Mirzayev D.A., Mirzoev A.A. 350
- Формирование, структура и электрофизические свойства термомиграционных легированных галлием кремниевых каналов
Ломов А. А., Середин Б. М., Мартюшов С. Ю., Заиченко А. Н., Шульпина И. Л. .. 351

Прочность входных и выходных камер, коллекторов, теплообменных трубок аппаратов воздушного охлаждения газа и определения продления ресурса <i>Савельев В.Н., Махмудов Х.Ф.</i>	353
Термоэдс горячих носителей тока в нелегированных легированных кристаллах слоистого полупроводника n-InSe <i>Бабаева Р. Ф., Абдинов А.Ш.</i>	354
Сегнетоэлектрик триглицинсульфат с примесью кроконовой кислоты <i>Свинарев Ф. Б., Балашова Е.В., Левин А.А., Золотарев А.А., Старухин А.Н., Павлов С.И., Кулаченков Н.К., Панкова Г.А., Кричевцов Б.Б.</i>	355
Эволюция дефектной структуры в процессе релаксации системы Pd-Y-N <i>Акимова О.В., Велигжанин А.А., Светлогоров Р.Д., Бурханов С. Г., Горбунов С.В., Рошан Н.Р.</i>	357
Влияние сульфидной пассивации на оптические и электронные свойства n-InP <i>Иванова Е.В., Дементьев П.А., Львова Т.В., Лебедев М.В.</i>	358
Эмиссионные свойства текстурированного нитрида галлия с высокой плотностью дефектов упаковки <i>Мынбаева М. Г., Ситникова А.А., Кириленко Д.А., Мынбаев К.Д.</i>	359
Аномально низкая энергия эмиссии электронов с энергетических уровней фосфора в электрическом поле кремниевых p-n переходов при температуре 10-20 К <i>Шепелев А. С., Еремин В.К., Вербицкая Е.М.</i>	361
Дефектообразование при электронном и протонном облучении приборов на основе 4H-SiC, GaN и Si <i>Давыдовская К.С., Лебедев А.А., Козловский В.В.</i>	362
Электрические свойства кристаллов $\text{Sn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ и их контактов со сплавом Bi-Sn <i>Алиева Т.Д., Багиева Г.З., Абдинова Г.Д., Мустафаев Н.Б., Абдинов Д.Ш.</i>	363
DLTS-спектры радиационных дефектов кремниевых детекторов в области пика Брэгга <i>Митина Д. Д., Еремин В.К., Вербицкая Е.М., Еремин И.В.</i>	364
Исследование радиационных дефектов, создаваемых тяжелыми ионами, в кремниевых детекторах ядерных излучений <i>Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Вербицкая Е.М., Еремин И.В., Митина Д.Д., Еремин В.К.</i>	365
Исследование дефектов в массиве вертикально-ориентированных кремниевых нановолокон, полученных методом криогенного плазмохимического травления <i>Баранов А. И., Морозов И.А., Кудряшов Д.А., Уваров А.В., Шугуров К.Ю., Гудоских А.С.</i>	367
Исследование радиационного воздействия на эпитаксиальные структуры на основе GaN <i>Лебедев А.А., Давыдов В.Ю., Смирнов А.Н., Елисеев И.А., Давыдовская К.С., Заварин Е.Е., Закгейм Д.А., Лундин В.В., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Козловский В.В.</i>	368

Физика и технология преобразования энергии 370

Тепловые процессы в гетероструктурах $\text{SmS}/\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x\text{S}$ при термовольтаическом эффекте <i>Соловьев С. М., Шаренкова Н.В., Казанин М.М.</i>	370
Кинетические закономерности термовольтаического эффекта в полупроводниковых структурах на основе сульфида самария SmS <i>Гревецев М.А., Казаков С.А., Хавров Г.Д., Казанин М.М., Шаренкова Н.В., Соловьев С.М., Шульман С.Г.</i>	371
Прочностные характеристики тонких кремниевых пластин, применяемых в солнечных фотоэлектрических преобразователях <i>Шнейцман В. В., С.Е. Никитин, А.О. Поздняков, В.И. Николаев, А.В. Бобыль</i>	372
Исследование характеристик <i>p-i-n GaAs/AlGaAs</i> соединительных туннельных диодов <i>Контрош Е.В., Лебедев В.В., Клишко Г.В., Калиновский В.С., Андреев В.М.</i>	373
Механизмы транспорта заряда в мультиструктурных фотоэлектродах для перовскитных солнечных элементов <i>Вильданова М. Ф., Никольская А.Б., Козлов С.С., Шевалеевский О.И.</i>	375
Efficiency enhancement in planar perovskite solar cells under low-light illumination and ambient lighting <i>Kozlov S.S., Alexeeva O.V., Nikolskaia A.B., Vildanova M.F., Shevaleevskiy O.I.</i>	376
Фотоэлектрические преобразователи с квантовыми объектами в условиях интенсивного узкополосного облучения подзонными фотонами <i>Паньчак А.Н., Минтаиров С.А, Минтаиров М.А., Салий Р.А, Калужный Н.А., Нахимович М.В., Шварц М. З.</i>	377
Моделирование процессов разделения заряда в фотопреобразователях мощного модулированного высокой частотой лазерного излучения <i>Емельянов В.М., Покровский П.В., Шварц М.З.</i>	379
Application of different gas mixtures types in p-doped layers of silicon heterojunction solar cells in the rear emitter configuration <i>Terukov E.I., Abramov A., Andronikov D., Emtsev K., Ivanov G., Semenov A., Shakhrai I.</i>	380
Исследование травления полистирольных сфер в кислородной плазме для формирования маски травления кремниевых вертикально упорядоченных структур <i>Морозов И.А., Вячеславова Е.А., Кудряшов Д.А., Баранов А.И., Уваров А.В., Гудовских А.С.</i>	381
Управление люминесцентным рециклированием в многопереходных солнечных элементах с Брэгговскими отражателями <i>Левина С. А., Филимонов Е.Д., Шварц М.З.</i>	382

Увеличения плотности энергии аккумуляторов для электропривода легких транспортных средств путем управления поляризованностью сегнетоэлектриков <i>Зубцов В.И., Тромбицкий Е. А.</i>	383
Effect of the height of aligned carbon nanotubes on their piezoelectric response <i>O.I. Osotova, M.V. Il'ina, A.V. Guryanov, N.N. Rudyk, O.I. Il'in</i>	384
A comparative study of the performance features of heterojunction and diffusion SI modules in humid continental and subarctic climates <i>Titov A., Emtsev K., Andronikov D., Abramov A., Bulygin B., Dubrovskiy A., Orekhov D., Terukov E., Shakhray I.</i>	386
Малоугловые и дифракционные рентгеновские исследования порошков на примере LiFePO_4 <i>Бойко А. М., Шарков М.Д. Бойко М.Е. Касаткин И.А. Бобыль А.В.</i>	387
Температурная подстройка выходных фотоэлектрических параметров преобразователей лазерного излучения <i>Шварц М. З., Емельянов В.М., Мингаиров С.А., Мингаиров М. А., Нахимович М.В., Калюжный Н. А.</i>	388
Исследование особенностей формирования твердой маски SiO_2 с использованием плазмохимического травления и наносферной литографии <i>Вячеславова Е.А., Морозов И.А., Кудряшов Д.А., Гудовских А.С.</i>	390
Исследование температурных зависимостей ВАХ селективных контактов р-Si/MoO _x и n-Si/LiF/Ta <i>Максимова А. А., Баранов А.И., Кудряшов Д.А., Гудовских А.С.</i>	391
Физика квантовых структур	392
Поле необратимости и анизотропный пиннинг в сверхпроводящих Nb-Ti лентах <i>Гурьев В. В., Шавкин С.В., Круглов В.С.</i>	392
Квазирезонансное возбуждение экситонных комплексов в одиночных квантовых точках InAs/AlGaAs <i>Галимов А. И., Рахлин М.В., Серов Ю.М., Клишко Г.В., Торопов А.А.</i>	393
Магнитная циркулярная поляризация фотолюминесценции неоднородного ансамбля коллоидных нанокристаллов <i>Смирнова О.О., Головатенко А.А., Родина А.В.</i>	394
Тонкая структура спектра и долинная динамика экситонов <i>Праздничных А. И., Глазов М. М.</i>	396
Критический режим фотонного эха от экситонов в квантовой яме InGaAs/GaAs в слабом магнитном поле <i>Янибеков И.И., Соловьев И.А., Югова И.А., Ефимов Ю.П., Елисеев С.А., Ловцюс В.А., Капитонов Ю.В.</i>	397
The spin-filtering properties in two coupled Rashba quantum rings <i>Smolkina M. O., Popov I.Yu., Blinova I.V.</i>	398

Методика анализа электронного спектра полупроводниковых квантовых точек методом нормированных туннельных дифференциальных ВАХ <i>Гавриков М.В., Михайлов А.И., Кабанов В.Ф.</i>	400
Спектры оптического отражения резонансных фотонных структур на основе системы из 100 квантовых ям InGaN <i>Иванов А. А., Чалдышев В.В.</i>	401
Влияние постоянного поля на циркулярный фотогальванический эффект в двумерных сверхрешетках <i>Мячкова А. А., Завьялов Д.В.</i>	403
Свободные экситоны в низкоразмерных галогенидных перовскитах <i>Самсонова А.Ю., Капитонов Ю.В., Селиванов Н.И., Емелин А.В.</i>	405
Влияние профиля легирования буферных слоёв GaN:Fe на свойства гетероструктур для полевых транзисторов <i>Артеев Д.С., Сахаров А.В., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Закгейм Д.А., Цацульников А.Ф., Гиндина М.И., Брунков П.Н.</i>	406
Энергия и импульс отдачи фотона в диспергирующей среде: теория и сравнение с экспериментом <i>Аветисян Ю.А., Малышев В.А., Трифонов Е.Д.</i>	407
Локализованные и делокализованные состояния в цепочке асимметрично взаимодействующих атомов с беспорядком <i>Федорович Г. А., Корнован Д.Ф., Петров М.И.</i>	409
Переходы в континуум для квантовых точек в нанопроволоках и топологических изоляторах в режиме электрического дипольного спинового резонанса <i>Хомичский Д. В., Лаврухина Е.А.</i>	410
Эффект насыщающегося поглотителя в вертикально-излучающих лазерах спектрального диапазона 1.55 мкм, изготовленных методом спекания пластин <i>Блохин А. А., Блохин С.А., Бобров М.А., Малеев Н.А., Рочас С.С., Егоров А.Ю.</i> ..	411
Микро-фотолюминесценция структур квантовых точек InP/GaInP ₂ для топологических квантовых вентилях <i>Афанасьев К.М. , Власов А.С. , Калужный Н.А. , Лебедев Д.В. , Минтаиров С.А., Салий Р., Задиранов Ю. М. , А. М. Минтаиров</i>	413
Особенности ионизации примесей в квазиклассически сильных постоянном и переменном электрических полях в щелевых модификациях графена <i>Глазов С. Ю., Сыродоев Г.А.</i>	414
Гауссовы примесные зоны в GaN и ослабление конфайнмента носителей в квантовых ямах InGaN/GaN <i>Бочкарева Н. И., Иванов А.М., Клочков А.В., Шретер Ю.Г.</i>	415
Релаксация горячих экситонов в связанной асимметричной структуре двойных квантовых ям CdTe/ZnTe <i>Резницкий А.Н., Агекян В., Будкин Г., Karczewski G., Серов А. , Философов Н., Чукуев М.</i>	416

Молекулярно-пучковая эпитаксия, структурные и оптические свойства полупроводниковых 2D-слоев GaTe/GaAs(001) <i>Авдиенко П.С., Седова И.В., Комков О.С., Сорокин С.В.</i>	418
Электропроводность сверхрешетки на основе полудираковских кристаллов <i>Кухарь Е.И., Крючков С.В., Николаева Л.Н.</i>	419
Асимметричное рассеяние в полупроводниковых гетероструктурах с нарушенной симметрией к инверсии времени <i>Ракицкий М. А.</i>	420
Физика плазмы, гидро- и аэродинамика	422
Селективное травление Si ₃ N ₄ /SiO ₂ плазмой SF ₆ /H ₂ <i>Панкратьев П.А., Барсуков Ю.В., Кобелев А.А., Виноградов А.Я., Мирошников И.В., Смирнов А.С.</i>	422
Обнаружение колебательных решений у диода со встречными потоками электронов и ионов <i>Кузнецов В.И., Флегонтова Е.Ю., Бакалейников Л.А.</i>	423
Ультразвуковой контроль температуры при кратковременном локальном нагреве тест-объекта фокусированным ультразвуком <i>Иванова Я.Ф., Гатаулин Я.А.1, Юхнев А.Д., Тархов Д.А., Смирнов Е.М., Беркович А.Е.</i>	424
Анализ потока нейтронов из плазмы сферического токамака Глобус-М2 при ее инжекционном нагреве <i>Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Толстяков С.Ю., Хилькевич Е.М., Чернышев Ф.В., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е., Щёголев П.Б.</i>	425
Численное моделирование пространственно-временной эволюции течения в модели бифуркации брюшной аорты при наличии стеноза в одной из ветвей <i>Синицына Д. Э., Зайцев Д.К.</i>	427
Изучение свойств альфвеновских колебаний в модернизированном сферическом токамаке Глобус-М2 <i>Балаченков И. М., Бахарев Н.Н., Буланин В. В., Гусев В. К., Жильцов Н. С., Киселёв Е. О., Курскиев Г. С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров Ю. В., Сахаров Н.В., Тельнова А. Ю., Щеголев П. Б., Яшин А. Ю.</i>	429
Моделирование взаимодействия гексафторида урана с метаном и кислородом в режиме турбулентного горения <i>Попов П.А., Талалов В.А., Пашкевич Д.С., Камбур П.С., Капустин В.В., Зимин А.Р., Алексеев Ю.И.</i>	430
Further development of the Xe laser plasma 11-nm radiation source – new data on laser energy absorption and spectroscopy <i>Буторин П.С., Калмыков С.Г., Максимов В.А., Сасин М.Э.</i>	430

Содержание

Свойства долгоживущих ионов, возникающих в ходе нелинейных колебаний в плазменном диоде <i>Бакалейников Л.А., Кузнецов В.И., Флегонтова Е.Ю.</i>	431
Измерение теплового потока с помощью тонкопленочного датчика и датчика на анизотропных термоэлементах при отражении ударной волны <i>Сахаров В.А., Попов П.А., Поняев С.А., Монахов Н.А., Митяков А.В.</i>	432
Численное исследование течения жидкости и движения стенки в модели упругой бифуркации кровеносного сосуда <i>Гатаулин Я.А., Котмакова А.А., Юхнев А.Д., Зайцев Д.К.</i>	433
Динамики пространственно-временного распределения возбужденных атомов в наносекундном плазменно-пучковом разряде с щелевым катодом <i>Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Шахсинов Г.Ш., Закарьяева М.З.</i>	434
Управление параметрами разряда токамака с помощью плазменной струи <i>Горяинов В. Ю., Воронин А.В., Гусев В.К., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Сахаров Н.В.</i>	435
Моделирование методом Монте-Карло характеристик дрейфа электронов в инертном газе с парами ртути <i>Рагимханов Г.Б., Голягина Р.И., Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Халикова З.Р.</i>	436
Влияние рассеяния электронов на стационарные состояния релятивистского диода Пирса в режиме с отражением электронов от потенциального барьера <i>Герасименко А. Б., Кузнецов В.И.</i>	438
THz gas discharge in nitrogen as a source of ultraviolet radiation <i>Сидоров А. В., Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Разин С.В., Водопьянов А.В.</i>	439
Квазипериодические колебания, возникающие при сверхзвуковом ламинарном обтекании установленного на пластине затупленного тела <i>Колесник Е.В., Смирновский А.А., Смирнов Е.М.</i>	440
On plasma neutralization of the ion beam <i>Shalenov E.O., Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S.</i>	441
Studies of terahertz discharge in noble gases using a Michelson interferometer <i>Бармаинова Т.В., А. Luchinin, А. Murzanev, А. Sidorov, А. Stepanov, А. Veselov, А. Vodopyanov</i>	442
Logarithmic fluid models and sound propagation in superfluid helium <i>Zloshchastiev K. G.</i>	443
Визуализация пространственной картины обтекания модели транспортного самолета с работающими воздушными винтами в аэродинамической трубе <i>Пигусов Е. А., Крутов А.А., Черноусов В.И.</i>	444
Бифуркации трансзвукового обтекания двойного клина <i>Кузьмин А. Г.</i>	445

Экспериментальные исследования спектральных характеристик свободного тлеющего разряда в диапазоне длин волн 340-440 нм <i>Безверхний Н. О., Монахов Н.А., Петренко М.В., Лапушкина Т.А., Сахаров В.А., Поняев С.А., Бобашев С.В.</i>	446
Особенности развития ионизационной неустойчивости разного масштаба в газовом разряде воздуха <i>Лапушкина Т. А.</i>	448
Перспективы ионно-циклотронного нагрева ионов в плазме (^3He)-D-N токамака Глобус-M2 <i>Корепанов П. А.</i>	449
Наблюдение параметрических неустойчивостей в экспериментах по генерации тока на сферическом токамаке Глобус-M2 <i>Коновалов А. Н., Дьяченко В. В.</i>	450
Численное моделирование течения моно- и полидисперсной пузырьковой среды в трехмерной колонне под действием силы тяжести в рамках эйлера-эйлеровского подхода <i>Чернышев А. С., Шмидт А.А.</i>	451
Разработка оптической диагностики быстрых ионов на токамаке ТУМАН-3М <i>Блехштейн М.Д., Аскинази Л.Г., Жубр Н.А., Корнев В.А., Лебедев С.В., Разуменко Д.В., Резниченко П.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С.</i>	452
Области стабильности плазменных микронеустойчивостей в сферических токамаках Глобус-M/M2 <i>Киселев Е. О., Патров М. И., Курскиев Г. С., Гусев В. К., Тельнова А. Ю., Яшин А. Ю.</i>	453
Контроль плотности плазмы при помощи дисперсионного интерферометра на сферическом токамаке Глобус-M2 <i>Шулятьев К. Д., Соломахин А.Л., Гринемайер К.А., Минаев В.Б., Щеголев П.Б., Гусев В.К., Коваленко Ю.В., Петров Ю.В., Савкин В.Я., Сахаров Н.В.</i>	454
Кластерная гипотеза стратификации в канале четочной молнии <i>Твердохлебов К. В., Поняев С. А., Бобашев С. В.</i>	455
Экспериментальное исследование влияния фронта ударной волны на проницаемый материал <i>Масюкевич А. В., Булович С. В.</i>	456
Измерение параметров периферийной плазмы токамака ФТ-2 и сравнение результатов с гирокинетической моделью <i>Каледина О. А., Шаталин С.В., Есипов Л.А.</i>	457
Применение гибридного метода на основе волнового уравнения для расчета аэроакустического шума при низких числах маха <i>Гусева Е. К., Егоров Ю.</i>	459
Предсказание кризиса сопротивления на круглом цилиндре с использованием моделей перехода <i>Стабников А. С., Гарбарук А.В.</i>	460

Динамическая реакция водной пены на взрывное воздействие <i>Гайнуллина Э.Ф., Болотнова Р.Х.</i>	461
Исследование пробоя газов в сфокусированном пучке терагерцового излучения на пользовательской станции NovoFEL <i>Водопьянов А. В., Кубарев В.В., Сидоров А.В., Шевченко О.А., Гобачев Я.И., Бармашова Т.В.</i>	463
Численное исследование эволюции турбулентного следа за тонкой пластиной под действием неблагоприятного градиента давления, созданного аэродинамическими профилями <i>Гусева Е. К., Стрелец М.Х.</i>	464
Первые результаты измерений с помощью инфракрасной камеры на токамаке Глобус-М2 <i>Токарев В. А., Гусев В.К., Хромов Н.А., Воронин А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Новохацкий А.Н., Минаев В.Б., Варфоломеев В.И., Балаченков И.М., Тельнова А.Ю., Щеголев П.Б., Бахарев Н.Н., Курские Г.С., Киселев Е.О., Патров М.И., Тюхменева Е.А., Толстяков С.Ю.</i>	465
Тестирование новой алгебраической модели перехода при расчете обтекания крыловых профилей при умеренных числах Рейнольдса <i>Матюшенко А. А., Стабников А.С., Гарбарук А.В.</i>	466
Численное исследование кавитирующих потоков и выделения растворенного газа <i>Махнов А. В.; Шмидт А.А.</i>	467
Математическое моделирование направленного вихревого движения массы воды для малых гидроэлектростанций <i>Shalenov E.O.; Tolemis M.T.; Bekbayev A.B., Abdiyeva Sh.A., Anarbayev S.T.</i> :	468
Результаты измерения мощности радиационных потерь и эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М2 <i>Тюхменева Е. А., Толстяков С.Ю., Курские Г.С., Гусев В.К., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Киселев Е.О., Жильцов Н.С., Тельнова А.Ю., Бахарев Н.Н., Щеголев П.Б.</i>	469
Численное исследование возмущающего действия кубического препятствия на турбулентный свободно-конвективный пограничный слой, развивающийся на вертикальной нагретой пластине <i>Левченя А. М., Смирнов Е.М., Смирновский А.А.</i>	471
Исследование взаимодействия конических тел с неравномерным сверхзвуковым потоком при малых углах атаки <i>Шевченко А. В., С.А. Яшков, Е.А. Прокопенко, С.А. Поняев</i>	472
Исследование газодинамических параметров сверхзвукового потока вблизи тела при различных числах Маха <i>Житников Т. А., А.В. Шевченко, А.С. Юрьев, С.А. Поняев, Е.Б. Панфилов, А.Р.Ротэрмель</i>	473

Динамический и стационарный расчеты нижегибридного тока увлечения для токамаков ФТ-2 и Глобус-М2 <i>Трошин Г. А., Теплова Н.В., Хавин В.Е., Дьяченко В.В., Гусаков Е.З., Гусев В.К., Коновалов А.Н., Лашкул С.И., Савельев А.Н.</i>	475
Измерение теплового потока в начальной фазе отражения ударной волны от стенки с помощью датчика на анизотропных термоэлементах <i>Монахов Н. А., Попов П.А., Сахаров В.А., Поняев С.А., Котов М.А.</i>	476
Моделирование методом Монте-Карло характеристик дрейфа ионов ртути в инертном газе <i>Халикова З. Р., Курбанисмаилов В.С., Майоров С.А., Рагимханов Г.Б.</i>	477
Получение технического углерода в высоковольтном однофазном плазмотроне переменного тока <i>Герасимова Л. В., Субботин Д.И.</i>	478
Плавление золы древесных отходов воздушным высоковольтным трехфазным плазмотроном переменного тока <i>Кириллова А. А., Субботин Д.И.</i>	479
Физика ферроиков	481
Оптически-возбуждаемые спиновые волны в системе двух динамически-связанных ферромагнитных слоев <i>Геревенков П. И., Филатов Я.А., Rushforth A.W., Бессонов В.Д., Телегин А.В., Калашникова А.М., Хохлов Н.Е.</i>	481
Флексоэлектрический и флексодиэлектрический эффекты в тонких пластинах монокристалла SrTiO ₃ <i>Обозова Е. Д., Полушина А.Д., Сырников П.П., Залесский В.Г.</i>	482
Electroconductivity of the sintered ceramic based on yttrium chromite multiferroic <i>Malcev D.D., Sinelshchikova O.Yu., Popkov V.I.</i>	483
Исследование проводимости, диэлектрической проницаемости и поляризации в монокристаллах PbCo _{1/3} Ta _{2/3} O ₃ <i>Полушина А. Д., Обозова Е.Д., Петрова Н.С., Щеглов М.П., Лушников С.Г.</i>	485
Изменения параметров лазерно-индуцированных магнитостатических волн, распространяющихся в неоднородно нагретой пленке галфенола <i>Филатов Я. А., П.И. Геревенков, А. W. Rushforth, А.М. Калашникова, Н.Е. Хохлов</i>	486
Структурные и диэлектрические свойства керамических и плёночных мультиферроиков на основе Ba _{0,5} Sr _{0,5} TiO ₃ <i>Мыльников И. Л., Буровихин А.П., Еськов А.В., Дедык А.И., Павлова Ю.В., Белявский П.Ю., Семёнов А.А.</i>	487
Исследование временных и частотных характеристик электрокалорического отклика в сегнетоэлектрических материалах <i>Анохин А. С., Еськов А. В., Пахомов О. В., Семенов А. А.</i>	488

Атомная физика и физика элементарных частиц 490

Способ и устройство динамического управления характеристиками преобразования спектрометрических трактов многоканальных систем регистрации заряженных частиц <i>Тубольцев Ю. В., Богданов А.А., Чичагов Ю.В., Ерёмин В.К., Ерёмин И.В., Вербицкая Е.М.</i>	490
Определение электронной плотности образцов с использованием данных двухэнергетической компьютерной томографии <i>Григорьева А. А., Булавская А.А., Милойчикова И.А., Черепенников Ю.М., Стучебров С.Г.</i>	491
Production and reconstruction of short-lived $\rho(770)$, $K^*(892)_0$, $\phi(1020)$ and $\Lambda(1520)$ resonances as a function of centrality and energy in Au+Au collisions at NICA <i>Kotov D.O., Ivanishchev D.A., Malaev M.V., Riabov V.G., Riabov Yu.G.</i>	492
$K^*(892)$ meson measurements in Cu+Au collisions at 200 GeV and U+U collisions at 192 GeV <i>Борисов В. С., Бердников А.Я., Бердников Я.А., Котов Д.О., Митранков Ю.М.</i>	493
Разработка численной модели терапевтического электронного пучка клинического линейного ускорителя <i>Булавская А. А., Григорьева А.А., Милойчикова И.А., Черепенников Ю.М., Стучебров С.Г.</i>	494
Comparative analysis of proton production as a function of quark content and collision geometry <i>Ларионова Д. М., Бердников А.Я., Бердников Я.А., Котов Д.О., Митранков Ю.М.</i>	495

Другие вопросы физики 496

Фрактальные границы песчаных лавин <i>Бузыкин А. Г., Кузнецов И.А. , Ипатов А.Н. , Паршин Д.А.</i>	496
Изучение структурных переходов в расплавах Fe-Mn на основе расчета их электросопротивления и вязкости <i>Синицин Н. И., Чикова О.А.</i>	497
Security of subcarrier wave continuous variable quantum key distribution <i>Гончаров Р. К., Самсонов Э.О., Сантьев А.О.</i>	499
Исследование термостойких волокон, полученных из расплава термопластичного кристаллизуемого полиимида <i>Ваганов Г. В., Иванькова Е.М., Диденко А.Л., Попова Е.Н., Елоховский В.Ю., Юдин В.Е.</i>	500
Фононы и изгибные волны в кристаллическом графене <i>Райков И. О. , Конюх Д.А. , Ипатов А.Н. , Паршин Д.А.</i>	501

Точная оценка кинетического скоростного фактора кристаллизации переохлажденных жидкостей <i>Яруллин Д. Т., Галимзянов Б.Н., Мокшин А.В.</i>	503
Экспериментальная демонстрация влияния механических напряжений на лазерную генерацию акустических колебаний в различных материалах <i>Глазов А. Л., Муратиков К.Л.</i>	504
Описание диффузии колебаний в аморфных твердых телах с помощью теории случайных матриц <i>Конюх Д. А., Бельтюков Я.М.</i>	505
Кооперативное размораживание орбитальных моментов при упорядочении орбиталей в ян-теллеровских кристаллах <i>Борлаков Х. Ш., Эдиев Д.М., Борлакова А.Х.,</i>	506
Энергия Дзялошинского-Мории в диамагнитно-разбавленных монокристаллах на основе бората железа <i>Могиленец Ю. А., Селезнева К.А., Ягупов С.В., Стругацкий М.Б., Клява Янис</i>	508
In-situ БУР исследования кристаллической структуры олигоимида в процессе нагревания <i>Иванькова Е. М., Касаткин И. А., Попова Е. Н., Диденко А., Юдин В. Е., Комаров П. В.</i>	509
Транзисторное усиление фототока в МДП-структурах на высокоомном кремнии р-типа с туннельным диэлектриком из нитрида алюминия <i>Котина И. М., Базлов Н.В., Данишевский А.М., Драчнёв И.С., Коньков О.И., Кузьмичёв А.М., Трушин М.В., Унжаков Е.В.</i>	511
Влияние условий имидизации на структуру и свойства волокон из частично- кристаллического полиимида <i>Ваганов Г.В., Диденко А.Л., Иванькова Е.М., Иванов А.Г., Попова Е.Н., Юдин В.Е., Борисов И.Л., Волков А.В.</i>	512
Сокращённые наименования организаций	514

Физика.СПб

Тезисы докладов
международной конференции

19–23 октября 2020 года

Подписано в печать 06.10.2020. Формат 70×100/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 44,5. Тираж 400. Заказ 2217

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного оргкомитетом
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.