

Тезисы докладов  
международной молодёжной конференции

Физика.СПб

26–29 октября 2015 года

**ББК 22.3:22.6**  
**Ф 50**

**Организатор**

ФТИ им. А. Ф. Иоффе

**Спонсоры**

Российская академия наук / ФАНО  
Администрация Санкт-Петербурга  
Российский научный фонд, соглашение № 14-42-00015

**Программный комитет**

Аверкиев Никита Сергеевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — председатель  
Арсеев Петр Иварович (ФИАН)  
Варшалович Дмитрий Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Воробьев Леонид Евгеньевич (СПбГПУ)  
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. А. Ф. Иоффе)  
Новожилов Виктор Юрьевич (СПбГУ)  
Пихтин Никита Александрович (ООО «Эльфолюм», ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Рудь Василий Юрьевич (СПбПУ)  
Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Степина Наталья Петровна (ИФП им. А. В. Ржанова)  
Сурис Роберт Арнольдович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Тарасенко Сергей Анатольевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

**Организационный комитет**

Соколовский Григорий Семенович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — председатель  
Поняев Сергей Александрович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) — зам. председателя  
Азбель Александр Юльевич (КЦФЕ)  
Дюделев Владислав Викторович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Когновицкая Елена Андреевна (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева)  
Колыхалова Екатерина Дмитриевна (СПбГЭТУ)  
Лосев Сергей Николаевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Петров Павел Вячеславович (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)  
Рябочкина Полина Анатольевна (МГУ им. Н. П. Огарёва)  
Соболева Ксения Кирилловна (СПбПУ)  
Щербаков Алексей Валерьевич (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Молодежная конференция 2015 года продолжает традицию Итоговых семинаров по физике и астрономии по результатам конкурсов грантов для молодых ученых, проводившихся в Санкт-Петербурге в течение более двадцати лет, с середины 90-х.

**ISBN 978-5-00071-389-1**

## Наблюдение и исследование сверхновых II: SN2012aw и SN2013ej на телескопах AZT-8 и LX200

Мокрушина А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГАО

Эл. почта: hobbitenka1608@rambler.ru

Сверхновые звезды — важный объект для исследования, поскольку они не только играют ключевую роль в эволюции вещества во Вселенной, но и являются возможными индикаторами измерения расстояний. Сверхновые обогащают межзвездную среду большим количеством разнообразных химических элементов, синтезированных звездой во время ее эволюции и взрыва. Сверхновые звезды, принадлежащие к типу II с плато (IIp), могут стать индикаторами измерения расстояний во Вселенной (наряду с уже известными в этой роли сверхновыми Ia), благодаря наличию в их кривой блеска участка почти постоянной светимости — «плато».

С помощью телескопов AZT-8 и LX200 были проведены фотометрические и поляриметрические наблюдения двух сверхновых, принадлежащих к типу IIp: SN2012aw и SN2013ej. По результатам обработки наблюдений был вычислен ряд параметров: энергия взрыва, масса выброшенного при взрыве никеля, масса сброшенной оболочки, радиус звезды-предшественника, расстояние до сверхновой, изменение температуры и радиуса фотосферы со временем, болометрическая поправка, построены болометрические кривые блеска. Поляриметрические данные дали информацию об асимметричности взрыва. Полученные параметры были проанализированы и сопоставлены с данными, имеющимися в литературе, по этим и другим сверхновым такого же типа.

### Список литературы

1. Maguire K., Di Carlo E., Optical and near infrared coverage of SN2004et: physical parameters and comparison with other type IIp supernovae., *Notices of the Royal Astronomical Society*, 2, 981-1004, 2010;
2. Hamuy M., Type II Supernovae as Standardized Candles, *The Astrophysical Journal*, 2, 63-65, 2002;
3. Valenti S., The first month of evolution of the slow rising type IIp SN2013ej. *Monthly Notices of the Royal Astr. Society: Letters*, 1, 101-105, 2013;
4. Zhang J., Optical and ultraviolet observations of a low-velocity type II-P SN 2013am in M65, *The Astrophysical Journal*, 797:1,5-13,2014;
5. Subhash B., *Supernova 2012aw — a high energy clone of archetypal Type IIp SN 1999em*, Oxford University Press of behalf of the Royal Astronomical Society, 433:3,1871-1891, 2013;

## Тектоника земной литосферы в сферических функциях

Мохнаткин А. В.<sup>1</sup>, Петров С. Д.<sup>2</sup>, Горшков В. Л.<sup>1,2</sup>, Щербакова Н. В.<sup>1,2</sup>,  
Смирнов С. С.<sup>1,2</sup>, Трофимов Д. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГАО

<sup>2</sup>СПбГУ

Эл. почта: artspace3@mail.ru

Согласно современным представлениям, внешняя твердая оболочка Земли, ее литосфера, разделена на отдельные блоки или литосферные плиты. Известно, что литосферные плиты медленно движутся относительно друг друга. В классической теории литосферной тектоники литосфера включает в себя около двадцати плит, которые считаются абсолютно твердыми. Однако современные астрономические наблюдения выявляют отклонения от классической теории. Во-первых, открывается все больше новых плит, число которых уже превысило две сотни. Во-вторых, оказывается, что литосферные плиты нельзя считать абсолютно твердыми — становится очевидно, что они подвержены деформациям. В связи с этими вновь открывшимися фактами классический математический аппарат литосферной тектоники более не удовлетворяет современным наблюдениям. В рамках классической теории принято, что литосферные плиты движутся без деформаций по сферической Земле и для каждой плиты определяется вектор ее угловой скорости. В настоящей работе предлагается новый подход к теории литосферной тектоники, а именно представление скоростей геодезических пунктов (станций) в виде ряда по сферическим функциям.

Хорошо известно, что разложение скалярных и векторных полей на сфере по сферическим функциям представляет собой мощный инструмент физических исследований. Этот метод зарекомендовал себя в гравиметрии, геодезии, звездной кинематике, исследованиях реликтового фона и во множестве других астрономических приложений. Особенно важно, что каждая сферическая функция отражает физическое содержание того или иного явления или процесса, то есть обладает физическим смыслом. В то же время, насколько известно авторам, аппарат сферических функций до сих пор не применялся к тектонике литосферных плит, за исключением отдельных незавершенных попыток. Цель данной работы — получить разложение скоростей пунктов глобальной геодезической сети в ряд по векторным сферическим функциям.

В качестве исходных данных в работе используются скорости более чем двух тысяч пунктов глобальной геодезической сети, определенных в Международной земной системе отсчета (International Terrestrial Reference Frame) ITRF2008 сотрудниками Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory) в США. Особенностью этих данных является то, что они получены в роботизированном режиме и, следовательно, содержат ошибки, связанные с техническими сбоями, сменой оборудования станций и т.д. С целью выявления ошибок скоростей построены и визуально исследованы графики координат станций.

При разложении поля скоростей пунктов в ряд по сферическим функциям были приняты соглашения, используемые в геомагнетизме, в которых векторное поле разделяется на радиальную, сфероидальную и тороидальную компоненты. Получены коэффициенты сферических гармоник для сфероидальной и тороидальной компонент вплоть до степени двенадцать. Предпринята предварительная попытка их геофизической интерпретации. Кроме того, дана интерпретация сферических функций с точки зрения вращений литосферных плит по сфере, а также их деформаций.

## Список литературы

1. *Cox A., Hart R. B.* Plate tectonics. How it works. — Palo Alto: Blackwell, 2008;
2. *Dermanis A., Kotsakis C.* Estimating Crustal Deformation Parameters from Geodetic Data: Review of Existing Methodologies, Open Problems and New Challenges // Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering, IAG Symposium Jaén, Spain. Sansò F. and Gill A. J. eds. — 2006;
3. *Altamimi Z., Métivier L. and Collilieux X.* ITRF2008 plate motion model // J. Geophys. Res. — 2012. — Vol. 117, Issue B7;

## Условия для формирования голой сингулярности в метрике Вайдья

*Вертоградов В. Д.<sup>1</sup>, Гриб А. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>РГПУ им. А. И. Герцена

Эл. почта: vitalii.vertogradov@yandex.ru

В работе изучается конечная стадия гравитационного коллапса в метрике Вайдья, относительно того, будет ли это черная дыра или голая сингулярность. Если существует семейство не пространственно-подобных направленных в будущее геодезических, начинающихся в сингулярности и при этом горизонт видимости еще не образовался, тогда результатом гравитационного коллапса будет голая сингулярность. Если такого семейства геодезических не существует или время образования горизонта видимости меньше, чем время образования сингулярности, тогда результатом коллапса будет черная дыра. В работе Джоши (1) было показано, что конечная стадия гравитационного коллапса зависит от изначальных данных. В работе даются условия на массовую функцию в соответствии с энергетическими условиями, при которых образуется либо голая сингулярность, либо черная дыра. Также приводятся условия, при которых образовавшаяся сингулярность является гравитационно сильной.

## Список литературы

1. *Maombi D. Mkenyeley, Rituparno Goswami, Sunil D. Maharaj.* Gravitational collapse of generalised Vaidya spacetime. ArXiv:1407.4309;
2. *Pankaj S. Joshi.* Gravitational collapse and spacetime singularities. Cambridge University Press. 2007. P. 284;

## **Анализ туманности пульсарного ветра DA 495 и ее центрального объекта с использованием данных рентгеновских обсерваторий XMM-Newton и Chandra**

*Карпова А. В.<sup>1,2</sup>, Зюзин Д. А.<sup>2</sup>, Даниленко А. А.<sup>2</sup>, Шибанов Ю. А.<sup>2,1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: annakarova1989@gmail.com

В данной работе представлен анализ рентгеновского излучения туманности пульсарного ветра DA 495 и ее центрального объекта, J1952.2+2925, предположительно являющегося пульсаром. Использовались архивные данные обсерваторий *Chandra* и *XMM-Newton*. Чисто тепловой спектр J1952.2+2925 одинаково хорошо аппроксимируется как моделью чернотельного излучения с температурой  $\sim 215$  эВ и радиусом излучающей области  $\sim 0.6$  км, так и моделями атмосфер замагниченных нейтронных звезд с температурами 80-90 эВ, при этом излучение может исходить от всей поверхности нейтронной звезды. Данные *XMM-Newton* с высоким временным разрешением использовались для поиска пульсаций от J1952.2+2925. Пульсации обнаружить не удалось, поэтому был определен верхний предел на долю пульсирующего излучения равный 40%. Использование соотношения между межзвездным поглощением и расстоянием позволило оценить расстояние до DA 495, которое может составлять от 1 до 5 кпк.

## **Топологический анализ рекуррентных структур в гелиобусловленных временных рядах**

*Князева И. С.<sup>1</sup>, Макаренко Н. Г.<sup>1</sup>, Уртьев Ф. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО РАН

Эл. почта: iknyazeva@gmail.com

Временные ряды, связанные с проявлением солнечной активности, как правило содержат малый уровень детерминизма. Это относится как к историческим индексам (числам Вольфа) так и к косвенным (проху) данным. Они продуцированы множеством независимых процессов, неравномерно загрязнены шумами неизвестной природы и следами фильтров, которые использовались для реконструкции (палеоданные). Обычно для поиска циклических компонент на разных масштабах пользуются модификацией Фурье подхода в варианте метода Lomb-Scargle periodogram [1], хотя для таких данных применение его мало оправдано. Алгоритм Такенса для реконструкции динамики в псевдофазовом пространстве практически неприменим. Малая доля детерминизма не позволяет получить оценки корреляционной размерности, необходимой для топологического вложения ряда, в евклидово пространство. В сущности, априорная информация о ряде сводится в лучшем случае к утверждению о возможном присутствии некоторого ожидаемого квазипериода. В этом случае может оказаться полезным топологический метод диагностики рекуррентности, предложенный в работе [2]. Он начинается с построения облака точек из временного ряда с помощью скользящего окна, примерно равного ожидаемому периоду, обычным алго-

ритмом Такенса. Полученное облако многомерных точек, после нормировки заполняет поверхность единичной сферы. Существование рекуррентности или периодичности эквивалентно появлению окружности в многомерном пространстве, или в терминах топологии существованию цикла на сфере. Его можно выделить методами алгебраической топологии, с использованием покрытия Рипса или Вьеториса-Чеха в терминах персистентных гомологий [3]. Оценки персистентных гомологий можно связать с количественной характеристикой (score) для цикла с ожидаемым периодом. Мы тестируем эту методику для нескольких гелиообусловленных временных рядов и рядов солнечной активности

#### Список литературы

1. Partha Chowdhury. Study on solar and cosmic ray activities and their periodic behaviour 29th ASI Meeting ASI Conference Series, Vol. 3, pp 69 – 74, 2011;
2. Jose A. Perea, John Harer. Sliding Windows and Persistence: An Application of Topological Methods to Signal Analysis Journal Foundations of Computational Mathematics. Volume 15 Issue 3, Pages 799-838, 2015;
3. Herbert Edelsbrunner and John L. Harer. Computational Topology, An Introduction, AMS, 2010;

## **Диффузия в плотной неизотермической кулоновской плазме**

*Безногов М. В.<sup>1,2</sup>, Яковлев Д. Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПб АУ НОЦ НТ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: mikavb89@gmail.com

Эта работа является развитием наших предыдущих работ [1, 2], посвященных диффузии в многокомпонентной изотермической кулоновской плазме. Использованный ранее подход обобщен на случай неизотермических систем. Предложенный метод, совместно с методом эффективных потенциалов [3], позволяет рассчитывать диффузионные потоки в кулоновских системах произвольной степени неидеальности. Условия химического – в данном случае диффузионного (см., например, [4]) – равновесия, пригодные только для изотермических систем, обобщены на случай неизотермических систем. На основе полученных выражений для диффузионного потока исследовано соотношение между поверхностными и внутренними температурами остывающих нейтронных звезд с разным количеством водорода, гелия, углерода и более тяжелых элементов в теплоизолирующих оболочках. Рассмотрены оболочки в состоянии диффузионного равновесия, а также в отсутствие такого равновесия. В последнем случае исследована динамика диффузии при переходе в состояние равновесия. Тем самым улучшено описание теплоизолирующих оболочек нейтронных звезд [5], которые могут содержать легкие (аккрецированные) элементы. В отличие от [5] рассмотрены оболочки, содержащие смеси различных элементов (а не отдельные слои из разных элементов), и изучена эволюция таких смесей со временем. Полученные результаты необходимы для моделирования тепловой эволюции изолированных и аккрецирующих нейтронных звезд. Они значительно сужают неопределенности теории тепловой эволюции нейтронных звезд [6, 7] и позволяют более надежно

интерпретировать наблюдения теплового излучения изолированных нейтронных звезд и аккрецирующих нейтронных звезд в спокойном состоянии мягких рентгеновских транзиентов.

Список литературы

1. M.V. Beznogov, D.G. Yakovlev. Diffusion and Coulomb Separation of Ions in Dense Matter, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 161101 (2013);
2. M.V. Beznogov, D.G. Yakovlev. Diffusive currents and Coulomb separation of ions in dense matter, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 572, 012001 (2014);
3. M.V. Beznogov, D.G. Yakovlev. Effective potential and interdiffusion in binary ionic mixtures, *Phys. Rev. E*, 90, 033102 (2014);
4. Chang P., Bildsten L., Arras P., Diffusive nuclear burning of helium on neutron stars, *Astrophys. J.*, 723, 719 (2010);
5. A.Y. Potekhin, G. Chabrier, D.G. Yakovlev. Internal temperatures and cooling of neutron stars with accreted envelopes, *Astron. Astrophys.* 323, 415 (1997);
6. M.V. Beznogov, D.G. Yakovlev. Statistical theory of thermal evolution of neutron stars, *MNRAS*, 447, 1598 (2015);
7. M.V. Beznogov, D.G. Yakovlev. Statistical theory of thermal evolution of neutron stars – II. Limitations on direct Urca threshold, *MNRAS*, 452, 540 (2015);

## **Оценка и анализ основных параметров галактических шаровых скоплений, полученных методом Q-коэффициентов**

Скакун А. А.<sup>1</sup>, Шарина М. Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>САО РАН

Эл. почта: a\_skakun@mail.ru

Шаровые скопления (ШС) – старейшие галактические объекты, дающие возможность строить модели формирования и эволюции галактик. В данной работе реализован и протестирован на системе ШС Млечного Пути метод Q – коэффициентов (Johnson & Morgan 1953), позволяющий с помощью широкополосной фотометрии оценить избытки цвета, возрасты, абсолютные звездные величины и массы галактических шаровых скоплений. Этот алгоритм был применен к системам ШС галактик Туманность Андромеды, Сомбреро, NGC5128, NGC3379. В результате были получены и проанализированы основные параметры ШС и их распределения, причем для NGC 3379 оценки величин масс и возрастов ШС приводятся в литературе впервые.

Список литературы

1. Johnson H. L., Morgan W. W., 1953, *ApJ*, 117, 313;



## **Модель усиления магнитного поля в массивных звездных кластерах**

*Романский В. И.<sup>1</sup>, Гладилин П. Е.<sup>1</sup>, Осипов С. М.<sup>1</sup>, Быков А. М.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбПУ

Эл. почта: romanskyvadim@gmail.com

Вопрос об особенностях ускорения и распространения энергичных частиц в массивных звездных кластерах последнее время широко обсуждается в научной среде. Наблюдательные данные современных орбитальных и наземных телескопов позволили получить уникальную информацию о природе космического излучения и процессах, происходящих внутри массивных скоплений звезд. За счёт этого в последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в понимании наблюдаемых явлений. Интерпретация астрономических наблюдений требует серьёзной теоретической базы, в том числе понимания природы больших магнитных полей (100-1000 мкГ), на существование которых внутри источников рентгеновского и гамма-излучения указывают современные наблюдения. Адекватное описание процесса ускорения заряженных частиц, а, следовательно, и процессов генерации электромагнитного излучения космических источников невозможно без теории усиления турбулентных магнитных полей вблизи оболочек УВ сверхновых.

В докладе рассматривается модель ускорения космических частиц на ударной волне с учётом усиления флуктуирующих магнитных полей за счёт роста коротковолновой неустойчивости Бейла и акустической неустойчивости Друри, а также нелинейных эффектов, связанных с влиянием нетепловых компонент на динамику плазмы.

Список литературы

1. Bykov A.M., Brandenburg A., Malkov M.A., Osipov S.M. «Microphysics of Cosmic Ray Driven Plasma Instabilities» *Space Science Reviews*, Volume 178, Issue 2-4, pp. 201-232 (2013);
2. Bykov A.M., Gladilin P.E., Osipov S.M. «Particle acceleration at supernova shocks in young stellar clusters» *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, v.82, p.800 (2011);

## **Квазисинхронные базисные наблюдения опасного астероида 2004 BL86**

*Башакова Е. А.<sup>1</sup>, Ляшенко А. Ю.<sup>1</sup>, Слесаренко В. Ю.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО РАН

Эл. почта: cheshirchik@mail.ru

В начале 2015 года вблизи Земли пролетел опасный астероид 2004BL86, достигающий в диаметре 325 м. С целью уточнения параметров его орбиты и более точных предсказаний его дальнейших сближений с Землей, была проведена международная кампания по квазисинхронным базисным наблюдениям данного астероида в период с 26 января по 12 февраля 2015 г. Наблюдения велись в 8 обсерваториях: Сёрро-Толболо

(Чили, 807), Валенсия (Испания, 975), Пулково (Россия, 84), Кисловодск (Россия, С20), Краснодар (Россия, D04), Уссурийск (Россия, С15), Монды (Россия, С48), Алма-Ата (Казахстан). Благодаря траектории, одновременно за данным небесным объектом следило более 5 станций, расстояние между которыми достигало 5,5 тысяч км. Получено более семи с половиной тысяч ПЗС-изображений астероида 2004BL86. На основе астрометрических наблюдений и расстояний до астероида, полученных методом триангуляции, улучшена его орбита.

## **О происхождении изолированного рентгеновского пульсара 1E161348-5055, с периодом 6,7 часа**

*Ким В. Ю.<sup>1</sup>, Ихсанов Н. Р.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО

Эл. почта: [ursa-majoris@yandex.ru](mailto:ursa-majoris@yandex.ru)

Предложен сценарий образования изолированного рентгеновского пульсара 1E161348-5055, обладающего сверхдолгим периодом 6.7 часа. Показано, что этот пульсар может являться потомком массивной рентгеновской двойной системы, которая распалась около 2000 лет назад после вспышки сверхновой, обусловленной коллапсом ядра массивного компонента. Рентгеновское излучение этого объекта в нынешнюю эпоху генерируется вследствие аккреции вещества на старую (порядка 10 млн. лет) нейтронную звезду из остаточного магнито-левитационного диска. Туманность RCW 103, в которую погружен этот пульсар, является остатком вспышки сверхновой, сформированным взрывом его массивного компаньона на заключительной фазе эволюции массивной двойной системы.

### Список литературы

1. Ikhsanov, N.R., Kim, V.Y., Beskrovnaya, N.G., and Pustil'nik, L.A. «A new look at the origin of the 6.67 hr period X-ray pulsar 1E 161348-5055», *Astrophysics and Space Science*, 346, 105 (2013) [arXiv:1212.0375v2];
2. Н.Р. Ихсанов, В.Ю. Ким, Н.Г. Бескровная «Сценарий формирования изолированных рентгеновских пульсаров с аномально долгими периодами», *Астрономический журнал*, 92, 29, (2015) [arXiv:1408.2397v1];

## **Структуры в планетезимальных дисках**

*Демидова Т. В.<sup>1</sup>, Шевченко И. И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО

Эл. почта: [proximal@list.ru](mailto:proximal@list.ru)

На начальных этапах эволюции молодые звезды, как одиночные, так и кратные, проходят стадию аккреции вещества из остатков околозвездной оболочки, образующих протопланетный диск. Со временем газопылевой диск теряет газовую составляющую, а пылинки слипаются и увеличиваются в размерах, оседая при этом к плоскости диска. К тому моменту, когда большая часть газа покидает диск, в нем формируются планетезимали (километровых размеров), из которых в дальнейшем образуются

протопланеты. Поэтому в диске могут наблюдаться структурные неоднородности, которые свидетельствуют о присутствии в нем массивных тел. Используя модифицированный нами программный код Gadget-2, мы исследуем образование структур в планетезимальных дисках двойных и одиночных звезд, с планетами и без планет. Наши численные эксперименты показывают, что образующиеся структуры существенным образом зависят от конфигурации и параметров системы. В случае двойной звезды без планет, в циркумбинанном диске возникает однорукавная спираль. Она может разрушаться, если в диск вводится планета. Циркумбинанная планета двойной звезды, как и планета одиночной звезды, формирует кольцеобразную планетезимальную структуру вдоль своей орбиты; однако долговременная динамика планетезималей в этих кольцах у двойных и одиночных звезд различна. Таким образом, присутствие определенных структурных особенностей в планетезимальных дисках может свидетельствовать о наличии в диске массивных тел, или же о двойственности звезды. Тип неоднородности позволяет косвенно судить о конфигурации родительской системы.

## **Спектрополяриметрические наблюдения активных ядер галактик на БГА-6м**

*Булига С. Д.<sup>1</sup>, Гнедин Ю. Н.<sup>1</sup>, Афанасьев В. Л.<sup>2</sup>, Борисов Н. А.<sup>2</sup>,  
Нацвлишвили Т. М.<sup>1</sup>, Пиотрович М. Ю.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО РАН

<sup>2</sup>САО РАН

Эл. почта: aynim@yandex.ru

Представлены результаты спектрополяриметрических наблюдений ряда активных галактических ядер (АГЯ), выполненных на 6-м телескопе при помощи фокального редуктора светосилы SCORPIO. Полученные зависимости степени поляризации от длины волны излучения проанализированы с учетом эффекта фарадеевского вращения плоскости поляризации на длине свободного пробега фотона в замагниченном аккреционном диске. В результате, на основе традиционных моделей аккреционных дисков, определены величина и распределение магнитного поля и ряда физических параметров аккрецирующей плазмы в области генерации оптического излучения.

## **Влияние светового давления на движение опасных астероидов**

*Мартюшева А. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО

Эл. почта: alex.mart13@gmail.com

Световое давление является одной из негравитационных сил, которая может существенно изменить орбиты опасных астероидов. Изменяя альбедо отражающей поверхности астероида, можно в будущем изменить его орбиту. Для опасных астероидов 308635 (2005 YU55), 367943 Duende (2012 DA14) и 357439 (2004 BL86) были

вычислены величины отклонений в их орбитальном движении под действием сил светового давления. Учет влияния светового давления производился с помощью специально разработанной программы на основе численного интегрирования уравнений движения [1]. В результате вычислений было получено, что в ближайшие 20 лет максимальные отклонения астероидов 2005 YU55 (альbedo  $p = 0.02$ ), 2012 DA14 ( $p = 0.28$ ) и 2004 BL86 ( $p = 0.32$ ), обусловленные световым давлением, составляют соответственно: вдоль гелиоцентрического радиус-вектора  $|\Delta r| = 16.6$  км, 21.8 км, 32.2 км; вдоль орбиты  $|\Delta l| = 47.2$  км, 270.4 км, 109.4 км; полное смещение  $\Delta d = 49.3$  км, 270.6 км, 109.8 км. В случае повышения отражающей способности астероидов с помощью светлого покрытия поверхности каждого астероида (при  $p = 0.80$ ), отклонения астероидов 2005 YU55, 2012 DA14 и 2004 BL86 под действием сил светового давления составят соответственно: вдоль гелиоцентрического радиус-вектора  $|\Delta r| = 22.4$  км, 26.5 км, 38.4 км; вдоль орбиты  $|\Delta l| = 63.6$  км, 328.4 км, 130.5 км; полное смещение  $\Delta d = 66.4$  км, 328.6 км, 130.9 км.

В качестве сравнения, полагая альbedo  $p = 1.0$  (абсолютно белое тело), отклонения астероидов 2005 YU55, 2012 DA14 и 2004 BL86 равны соответственно: вдоль гелиоцентрического радиус-вектора  $|\Delta r| = 23.7$  км, 28 км, 40.6 км; вдоль орбиты  $|\Delta l| = 67.3$  км, 347.7 км, 138.2 км; полное смещение  $\Delta d = 70.3$  км, 348 км, 138.6 км. Данные результаты позволили сделать оценку возможного воздействия на астероиды путем изменения их альbedo. До следующего сближения астероидов 308635 (2005 YU55), 367943 Duende (2012 DA14) и 357439 (2004 BL86) с Землей (при использовании светлого покрытия поверхности) возможное полное отклонение под действием сил светового давления составит около 199.2 км (2075 год), 509 км (2046 год), 79 км (2027 год) соответственно.

Таким образом, изменения орбитальных движений астероидов под влиянием такого негравитационного эффекта, как световое давление, могут быть достаточно значимыми для того, чтобы повлиять на оценку угрозы столкновения объектов при тесных сближениях с Землей.

#### Список литературы

1. Мартюшева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н., «Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей», Вестник СПбГУ, сер.1, том 2 (60), вып.1, с. 135-147, 2015;

## Эффект Лидова–Козаи в планетных системах кратных звезд HD 196885 и 16 Cygni

Боруха М. А.<sup>1,2</sup>, Эскин Б. Б.<sup>2</sup>, Мельников А. В.<sup>1</sup>, Соколов Л. Л.<sup>2</sup>, Шевченко И. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГАО

<sup>2</sup>СПбГУ

Эл. почта: maybeemoi@gmail.com

В рамках пространственной эллиптической ограниченной задачи трех тел численно-экспериментально исследуется долговременная динамика планеты двойной звезды HD 196885 и планеты иерархической тройной звезды 16 Cyg. Выбор объектов

исследования обусловлен (1) принадлежностью планет к системам кратных звезд и (2) наблюдаемой эксцентricностью их орбит (эксцентриситеты 0.48 и 0.67, соответственно). Варьируя значения неизвестных из наблюдений орбитальных элементов (в частности, наклонения орбиты планеты к плоскости орбиты возмущающего тела), мы установили возможность «флипов» («опрокидывания») орбит — переходов планет с проградных на ретроградные орбиты и обратно). Мы исследуем соответствующие траектории, а также возможность проявления динамического хаоса в орбитальном движении исследуемых планет. Обе возможности обусловлены эффектом Лидова–Козаи. В первом случае планета может в дальнейшем эволюционировать к стадии «ретроградного горячего юпитера», а во втором случае возможен распад системы.

## Возможность замедления вращения BF Ori из-за эффекта синхронизации

*Шульман С. Г.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>ГАО

Эл. почта: sgshulman@gmail.com

Молодые переменные звёзды типа UX Ori обладают высокими проекционными скоростями вращения. Единственным известным исключением является BF Ori, скорость вращения которой существенно меньше, чем у любой другой звезды данного типа.

Может быть предложено несколько объяснений медленного вращения, основная часть которых связана с уже выдвигавшейся гипотезой о двойственности звезды BF Ori [1]. В данной работе рассматривается возможность замедления вращения из-за играющего важную роль в тесных двойных системах эффекта синхронизации периода вращения и орбитального периода.

Изучены предложенные разными авторами процессы, приводящие к синхронизации. Обсуждается их применимость к молодым звёздам ранних спектральных классов и анализируется их эффективность.

Показано, что существующие механизмы синхронизации при некоторых условиях могли замедлить вращение BF Ori от скоростей, наблюдаемых у других звёзд типа UX Ori до наблюдаемого у BF Ori.

### Список литературы

1. Grinin V. P., Rostopchina A. N., Barsunova O. Yu., Demidova T. V., Mechanism for cyclical activity of the Herbig Ae star BF Ori, *Astrophysics*, 53, 367-372, 2010;
2. Zahn J.-P., Tidal friction in close binary stars, *Astronomy & Astrophysics*, 57, 383-394, 1977;
3. Press W. H., Smarr L. L., Wiita P. J., Mechanism for inducing synchronous rotation and small eccentricity in close binary systems, *The Astrophysical Journal*, 202, L135-L137, 1975;
4. Tassoul M., Tassoul, J.-L., On Synchronization in Detached Close Binaries: Reply to Rieutord and Zahn, *The Astrophysical Journal*, 481, 363-368, 1996;

## **Определение фрактальной размерности крупномасштабной структуры методом попарных расстояний**

*Герасим Р. В.<sup>1,2</sup>, Райков А. А.<sup>1</sup>, Орлов В. В.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ГАО

<sup>2</sup>СПбГУ

Эл. почта: [astrorus@mail.ru](mailto:astrorus@mail.ru)

Разработанный авторами метод попарных расстояний применяется для выявления признаков фрактальности множества внегалактических сверхновых. Поскольку область пространства, занимаемая объектами выборки, сильно сплюснута, мы используем теорему Мандельброта о коразмерности. Метод попарных расстояний также применяется для исследования пространственного распределения 352 источников гамма-всплесков с измеренными красными смещениями. Рассмотрены три космологических модели: модель с метрикой Евклида, модель «усталого света», стандартная  $\Lambda$ CDM модель. Получены оценки фрактальных размерностей.

Список литературы

1. A.A. Raikov, V.V. Orlov, and R.V.Gerasim, *Astrophysics*, Vol. 57, No. 2, May, 2014;
2. R.V.Gerasim, V.V. Orlov, and A.A. Raikov, *Astrophysics*, Vol. 58, No. 2, May, 2015;

## **Астрометрические и фотометрические исследования астероидов (3100) Zimmerman, (3504) Kholshchevnikov, (4592) Alkissia, (4619) Polyakhova**

*Петрова С. Н.<sup>1</sup>, Горшанов Д. Л.<sup>1</sup>, Девяткин А. В.<sup>1</sup>, Львов В. Н.<sup>1</sup>*

ГАО РАН

Эл. почта: [stalkered@yandex.ru](mailto:stalkered@yandex.ru)

На двух телескопах ГАО РАН (ЗА-320М и МТМ-500М), а также двух телескопах АО ИГУ и обсерватории КубГУ проведены наблюдения астероидов Главного пояса, названных в честь сотрудников СПбГУ и Пулковской обсерватории: (3100) Zimmerman, (3504) Kholshchevnikov, (4592) Alkissia, (4619) Polyakhova и др. Обработка наблюдений выполнена с помощью программных пакетов АПЕКС-II и ЭПОС. Построены кривые блеска астероидов, а также определены показатели цвета для некоторых из них, что позволило сделать предположения о физических параметрах наблюдаемых тел. Периоды осевого вращения избранных астероидов определены впервые с помощью частотного анализа рядов наблюдений. На основе полученных данных и данных с сайта MPC уточнены элементы орбит.

## Работа приливных сил в окрестности вращающихся черных дыр для ультрарелятивистских частиц

Рауслова А. М.<sup>1,2</sup>, Гриб А. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>РГПУ им. А.И. Герцена

<sup>2</sup>Лаборатория теоретической физики им. А.А. Фридмана

Эл. почта: arasulova@gmail.com

В ряде статей [1-6] рассматривается столкновения частиц вблизи горизонта вращающихся черных дыр и показано, что ультрарелятивистские частицы в системе центра масс могут достигать высоких энергий — порядка Великого объединения или даже планковских. В данной работе будет показано, что достижение таких энергий вблизи горизонта черных дыр возможно за счет эффекта девиации геодезических. Данный эффект сводится к отклонению близких геодезических между собой. При отклонении геодезических, по аналогии с классической физикой, будут возникать приливные силы. В докладе рассмотрена работа приливных сил, возникающих при относительном отклонении протона на расстояние порядка комптоновской длины волны, вблизи горизонта. Для простоты расчетов принято допущение, что протон движется чисто радиально.

В результате расчетов показано, что работа приливных сил при скоростях близких к скорости света ( $v \geq (1 - 10^{-5}) c$ ) резко возрастает при увеличении Лоренц-фактора, т.к. прямо пропорциональна квадрату Лоренц-фактора. Также показано, что достижение энергий порядка  $10^{18}$  эВ возможно только в керровских черных дырах при следующих суловиях:

- масса  $M$  и угловой момент черной дыры  $10^6 M_{\odot}$  и  $0.98M$ , соответственно;
- геодезические находятся в экваториальной плоскости;
- относительная скорость движения  $v = (1 - 10^{-16})$ ;
- отклонение протона от реперной геодезической порядка  $10^{-15}$  м.

Если угловой момент черной дыры стремится к нулю, то работа приливных сил при девиации протонов достигает только порядков  $10^6$  эВ при прочих равных условиях.

Также найдена зависимость работы приливных сил от плоскости падения (полярного угла) частиц. Приливные силы будут максимальны в экваториальной плоскости и минимальны на полюсах. Причем данная зависимость проявляется только при относительно небольших скоростях ( $v \leq (1 - 10^{-5}) c$ ).

### Список литературы

1. Banados M., Silk J., West S.M., Kerr black holes as particle accelerators to arbitrarily high energy, Phys. Rev. Lett., 103(11), 111102, 2009;
2. Kimura M., Nakao K.-i., Tagoshi H., Acceleration of colliding shells around a black hole: Validity of the test particle approximation in the Banados-Silk-West process, Phys Rev D, 83:4, 044013, 2011;
3. Harada T., Kimura M., Collision of an innermost stable circular orbit particle around a Kerr black hole, Phys Rev D, 83:2, 024002, 2011;
4. Patil M. and Joshi P. S., High energy particle collisions in superspinning Kerr geometry, Phys. Rev. D 84, 104001, 2011;

5. Grib A.A., Pavlov Yu.V., Piattella O. F., On collisions with unlimited energies in the vicinity of Kerr and Schwarzschild black hole horizons, *Grav. Cosmol.* 18, No. 1, 70-75, 2012;
6. Grib A.A., Pavlov Yu.V., High energy particles with negative and positive energies in the vicinity of black holes, *AIP Conf. Proc.*, 1606, 11-18, 2014;

## **Инерция магнитного поля и динамика вращения радиопульсаров**

*Гогличидзе О. А.<sup>1</sup>*, Барсуков Д. П.<sup>1</sup>, Цыган А. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: [goglichidze@gmail.com](mailto:goglichidze@gmail.com)

Несимметричность распределения инерции электромагнитного поля радиопульсаров относительно их оси вращения приводит к появлению так называемого аномального электромагнитного момента сил, заставляющего нейтронные звёзды прецессировать. В нашей работе исследуется вклад в этот эффект полоидальных и тороидальных магнитных полей различных масштабов. Приводятся аргументы в пользу того, что мелкомасштабные магнитные поля могут давать вклад, сравнимый с вкладом крупномасштабного дипольного поля звезды. Кроме того, важную роль может играть внутреннее тороидальное поле. Если магнитное поле нейтронной звезды имеет структуру, несимметричную относительно дипольного момента, угол между направлением дипольного момента и осью вращения из-за прецессии будет осциллировать. Амплитуда этих осцилляций может составлять десятки градусов. Такие вариации данного угла в принципе могут оказаться наблюдаемыми.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 13-02-00112).

## **Изучение остатка сверхновой G350.0-2.0 в рентгеновском диапазоне**

*Карпова А. В.<sup>1,2</sup>*, Зюзин Д. А.<sup>2</sup>, Даниленко А. А.<sup>2</sup>, Шибанов Ю. А.<sup>2,1</sup>, Штернин П. С.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: [annakarпова1989@gmail.com](mailto:annakarпова1989@gmail.com)

Центральные компактные объекты (ЦКО) в остатках сверхновых — это малочисленный класс радиомолчащих молодых нейтронных звезд с чисто тепловым спектром, который наблюдается в рентгеновском диапазоне. На сегодняшний день известно менее десятка таких объектов. Изучение ЦКО имеет важное значение для понимания фундаментальных свойств вещества в экстремальных условиях. Остаток сверхновой G350.0-2.0 интересен тем, что в его поле имеется кандидат в ЦКО — источник 1RXS J172653.4–382157. В работе представлен спектральный анализ излучения данного источника и самого остатка по данным обсерватории *XMM-Newton*.



## Первый промежуточный всплеск от SGR 1935+2154 (по данным эксперимента Конус-Винд)

Козлова А. В.<sup>1</sup>, Израэль Г. Л.<sup>2</sup>, Свинкин Д. С.<sup>1</sup>, Фредерикс Д. Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>Osservatorio Astronomico di Roma, INAF, via Frascati 33, I-00040 Monteporzio Catone, Italy

Эл. почта: ann\_kozlova@mail.ioffe.ru

Мягкие гамма-репитеры (Soft Gamma-Ray Repeaters, SGR) представляют небольшую группу одиночных, медленно вращающихся нейтронных звезд с сильным магнитным полем (магнетаров), демонстрирующих вспышечную активность в гамма-диапазоне. Такие источники проявляют три вида активности. Наиболее частыми являются слабые (с пиковой светимостью  $L \leq 10^{41}$  эрг/с) короткие ( $\sim 0.1$  с) всплески. Реже встречаются существенно более мощные ( $L \sim 10^{41} - 10^{43}$  эрг/с) промежуточные вспышки. Третьим, самым впечатляющим, видом активности гамма-репитеров являются гигантские вспышки — чрезвычайно редкие события. За более чем 30 лет наблюдений было зарегистрировано всего три гигантских вспышки от трех разных источников.

В 2014 году космическим аппаратом Swift был открыт новый гамма-репитер SGR 1935+2154. В апреле 2015 года четыре аппарата межпланетной сети IPN (Interplanetary Network) детектировали и локализовали первый промежуточный всплеск от недавно открытого репитера. Среди приборов, наблюдавших данную вспышку, наиболее полную временную и спектральную информацию получил российский гамма-спектрометр Конус-Винд, установленный на американском космическом аппарате Винд.

В работе представлены результаты временного и спектрального анализа данных эксперимента Конус-Винд по промежуточному всплеску от SGR 1935+2154, проведен поиск квазипериодических осцилляций в кривой блеска (установлен верхний предел), а также приведена оценка расстояния до источника, полученная из распределения параметров двух чернотельных компонент спектральной модели.

### Список литературы

1. Stamatikos, M. et al. «GRB 140705A: Swift-BAT refined analysis of a possible newly discovered SGR 1935+2154», GRB Coordinates Network, Circular Service, 16522, 1, 2014;
2. Israel, G.L. et al. «Chandra discovery of 3.2s X-ray pulsations from SGR 1935+2154», The Astronomer's Telegram, #6370, 2014;
3. Golenetskii et al. «IPN Triangulation of a bright burst from SGR 1935+2154», GRB Coordinates Network, Circular Service, 17699, 1, 2015;
4. Pavlovic, M.Z. et al. «The Radio Surface-brightness-to-Diameter Relation for Galactic Supernova Remnants: Sample Selection and Robust Analysis with Various Fitting Offsets», The Astrophysical Journal Supplement, Vol. 204, Issue 1, article id. 4, 16 pp., 2013;
5. Israel, G.L.; Stella, L. «A New Technique for the Detection of Periodic Signals in "Colored" Power Spectra», Astrophysical Journal v.468, p.369, 1996;
6. Groth, E.J. «Probability distributions related to power spectra.», Astrophysical Journal, Suppl. Ser., Vol. 29, No. 286, p. 285 — 302, 1975;

## Остывание нейтронной звезды в HESS J1731-347

Оффенгейм Д. Д.<sup>1,2</sup>, Каминкер А. Д.<sup>2</sup>, Клочков Д. К.<sup>3</sup>, Сулейманов В. Ф.<sup>3,4</sup>, Яковлев Д. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПб АУ НОЦ НТ

<sup>2</sup> ФТИ

<sup>3</sup>Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen, Germany

<sup>4</sup>КФУ

Эл. почта: ddofengeim@gmail.com

Нейтронная звезда XMMU J173203.3-34418 (далее XMMU J1732) в остатке сверхновой HESS J1731-347 обладает необычными свойствами. При вероятном возрасте 27 тысяч лет измеренная температура ее поверхности (с учётом гравитационного красного смещения) составляет околомлн. К (Klochkov et al., 2015). Звезда заметно горячее обычной нейтронной звезды такого же возраста, которая в основном охлаждается изнутри за счёт нейтринных реакций модифицированного урка-процесса. Фактически XMMU J1732 является самой горячей среди изолированных нейтронных звёзд с определённым возрастом и температурой.

Клочков и др. (Klochkov et al., 2015) показали, что столь высокую температуру XMMU J1732 можно объяснить с помощью стандартной теории остывания (Yakovlev and Pethick, 2004), но на пределе возможности теории. Во-первых, требуется, чтобы почти вся теплоизолирующая оболочка звезды была заполнена углеродом, а не железом, как обычно считается. Это усиливает теплопроводность оболочки и повышает температуру поверхности. Во-вторых, необходима сильная сверхтекучесть протонов в ядре звезды. Она подавляет нейтринные процессы с участием протонов, включая модифицированный урка-процесс, и замедляет остывание. Комбинация этих факторов позволяет повысить поверхностную температуру до наблюдаемого уровня, но для ограниченной области масс и радиусов звезды.

В настоящей работе анализ остывания XMMU J1732, выполненный Клочковым и др., существенно дополнен. Учтено нейтринное излучение при столкновениях нейтронов в ядре звезды, не подверженное влиянию протонной сверхтекучести. Предложен метод анализа наблюдений, позволяющий находить возможные значения масс и радиусов звезды для протонной сверхтекучести любой силы и для произвольного содержания углерода в теплоизолирующей оболочке. Метод универсален - очень слабо зависит от уравнения состояния в ядре звезды. Анализ наблюдений с помощью более полной теории позволил значительно уточнить ограничения на массу и радиус XMMU J1732. Это, в свою очередь, сузило класс возможных уравнений состояния сверхплотного вещества в ядрах нейтронных звёзд.

### Список литературы

1. D.G. Yakovlev and C.J. Pethick. Neutron Star Cooling. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 42, 169-210 (2004);
2. D. Klochkov, V. Suleimanov, G. Puhhofer, D.G. Yakovlev, A. Santangelo and K. Werner. The neutron star in HESS J1731-347: Central compact objects as laboratories to study the equation of state of superdense matter. *Astronomy and Astrophysics*, 573, A53 (2015);

## Наблюдения пульсара J1357–6429 в ближнем инфракрасном и радиодиапазоне

*Кириченко А. Ю.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: aida.taylor@gmail.com

Пульсар J1357–6429 является молодым радиопульсаром, ранее детектированным в рентгеновском и гамма-диапазонах. В рентгеновском диапазоне у пульсара наблюдается компактная туманность. Предполагалось, что J1357–6429 имеет высокое значение собственного движения, подразумевающее экстремально высокую скорость около 2000 км/с. Чтобы проверить это предположение, были проведены радиоинтерферометрические наблюдения пульсара, а также наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне. По новым данным радионаблюдений была произведена оценка наиболее точного на сегодняшний день положения пульсара: RA = 13:57:02.525(14) и Dec = –64:29:29.89(15). В результате анализа новых и архивных радиоинтерферометрических данных собственное движение пульсара выявлено не было, но был установлен верхний предел на его значение  $\mu < 106 \text{ mas/год}$ . Данные наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне показали, что оптический источник, предложенный ранее как кандидат в оптические двойники пульсара, является коричневым карликом класса L. В связи с этим он может исключаться из дальнейшего рассмотрения. Однако, в этих же наблюдениях был детектирован слабый источник, позиция которого согласуется с позицией пульсара по новым радиоданным. Источник детектируется в фильтрах J и Ks с соответствующими величинами  $J = 23.51 \pm 0.24$  и  $Ks = 21.82 \pm 0.25$ . Этот источник предлагается в качестве нового кандидата в оптические двойники пульсара.

## Магнитные вихри в неравновесной релятивистской плазме пульсарных туманностей

*Петров А. Е.<sup>1</sup>, Быков А. М.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: alexey.e.petrov@gmail.com

Изучение физических механизмов конверсии энергии в пульсарном ветре и ускорения частиц на его ударной волне торможения представляет большой интерес для астрофизики высоких энергий. Исследование данных явлений тесно связано с моделированием сильно неравновесных процессов в релятивистской плазме пульсарной туманности.

Важным инструментом изучения процессов ускорения частиц ветра является построение моделей наблюдаемых в туманностях динамических структур, таких, как вихри, имеющие форму жгутов и распространяющиеся по туманности. Излучение релятивистской плазмы пульсарной туманности в основном определяется синхротронным механизмом, поэтому данные структуры, вероятно, представляют собой жгуты магнитного поля. Изучение динамики магнитных структур в плазме ветра можно использовать для оценки характеристик сильно неравновесной релятивистской плазмы.

Кинетическое построение локальной модели распространения возмущений магнитного поля в условиях плазмы туманности (Petrov & Bykov 2014) позволяет получить уравнение, описывающее локальную динамику магнитных структур. Коэффициенты этого уравнения представляют собой величины, характеризующие эво-

люцию структур и описывающие их свойства: скорость распространения, скорость затухания, характерные пространственные масштабы.

При моделировании сильно неравновесных процессов в плазме пульсарной туманности важно определить из сравнения с наблюдениями характеристики плазмы, в частности, ее компонентный состав, распределение частиц по энергиям и давление. Эти характеристики определяют свойства динамических магнитных структур (жгутов). Зависимости наблюдаемых величин от параметров, описывающих неравновесное распределение частиц плазмы и рассеяние частиц на флуктуациях магнитного поля, могут позволить получить ограничения на характеристики плазмы. В данной работе будут представлен анализ характеристик плазмы пульсарной туманности на основе сравнения ее наблюдаемых свойств с результатами моделирования локальной динамики магнитных структур.

#### Список литературы

1. Amato E. and Arons J., Heating and nonthermal particle acceleration in relativistic, transverse magnetosonic shock waves in proton-electron-positron plasmas, *ApJ.*, Vol. 653, Issue 1, P. 325-38, 2006;
2. Arons J., Pulsar Wind Nebulae as Cosmic Pevatrons: A Current Sheet's Tale, *Space Sci. Rev.*, Vol. 173, Issue 1-4, P. 341- 367, 2012;
3. Bykov A.M., Pavlov G.G., Artemyev A.V. and Uvarov Yu.A., Twinkling pulsar wind nebulae in the synchrotron cut-off regime and the gamma-ray flares in the Crab Nebula, *MNRAS*, Vol. 421., P. L67-71., 2012;
4. Petrov A.E. and Bykov A.M., Relativistic solitons in pulsar wind nebulae, *J. Phys.: Conf. Series*, Vol. 572, 012005, 2014;

## **WASP-17b – возможно, первая удаляющаяся от родительской звезды экзопланета. Международная кампания по её наблюдениям**

*Соков Е. Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГАО РАН

Эл. почта: jenkins06@gmail.com

11 августа 2009 года команда британского проекта по поиску экзопланет SuperWASP представила открытие экзопланеты WASP-17b. WASP-17b стала первой экзопланетой, которая обращается по ретроградной орбите, т.е. планета обращается вокруг звезды в направлении противоположном вращению самой звезды. Данное явление позволило предположить о ранее испытанном экзопланетой гравитационном возмущении со стороны другого объекта.

Помимо этого, WASP-17b имеет необычайно низкую плотность, которая составляет от 0.08 до 1.9 г/см<sup>3</sup>.

Большой интерес к этой загадочной экзопланете добавило открытие, сделанное с использованием телескопа «Хаббл» в 2013 году. По результатам наблюдений телескопа можно предполагать, что атмосфера экзопланеты WASP-17b имеет признаки водяного пара.

Совсем недавно на основе проведенной международной наблюдательной кампании, организованной в Пулковской обсерватории, с участием телескопов, расположенных в частных и профессиональных обсерваториях Аргентины, Австралии и острова Раротонга, было обнаружено удаление экзопланеты от своей родительской звезды. Подобное поведение транзитных экзопланет ранее не встречалось и на данный момент является уникальным.

# АТОМНАЯ ФИЗИКА И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

---

## Исследования разрушения отрицательного иона водорода с молекулой водорода методом классических траекторий

*Александрович О. В.<sup>1</sup>, Тюканов А. С.<sup>1</sup>, Беляев А. К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>РГПУ им. А.И. Герцена

Эл. почта: allformtg@gmail.com

Элементарные процессы определяют свойства газовых сред, например, в газовых лазерах, в атмосфере Земли, в фотосферах звезд, низкотемпературной плазме и так далее. В связи с этим существует постоянная потребность в разработке и использовании надежных методов определения параметров различных процессов, происходящих при атомных и молекулярных столкновениях, а также в проведении систематических расчетов таких характеристик процессов, как вероятностей переходов, сечений и констант скорости.

В настоящей работе исследуются столкновения  $H^- + H_2$  и их изотопы, которые являются фундаментальными прототипами столкновений отрицательных ионов с молекулами. Отличительной особенностью системы  $H^- + H_2$ , которая отсутствует в столкновениях  $H + H_2$ , является наличие канала отрыва электрона от отрицательного иона. Таким образом, кинетика реакций в системе  $H^- + H_2$  является более сложной, чем в случае  $H + H_2$ , что требует расширения теоретических подходов.

Расчет электронной структуры  $H^-$  в областях квазистационарности для основного и возбужденных состояний были проведены обобщенным методом двухатомных комплексов в молекуле (ОМДКМ) [1–3]. При этом необходимо отметить, что ОМДКМ, в отличие от стандартного метода двухатомных комплексов в молекуле (ДКМ), позволяет рассчитывать не только вещественные части локальных и нелокальных комплексных потенциалов, но и их мнимые части, ответственные за разрушение квазистационарных состояний.

Исследования ядерной динамики проводились с помощью метода ветвящихся классических траекторий. При этом вероятность неадиабатического перехода между дискретными состояниями для каждой траектории рассчитывается в рамках модели Ландау–Зинера в зависимости от параметров неадиабатичности вдоль каждой классической траектории. Вероятности переходов между состояниями дискретного и непрерывного спектров (вероятность отрыва электрона вдоль каждой траектории) рассчитывается по формуле, приведенной в работе [3] через квазистационарную шири-

ну. Результаты исследования будут представлены на конференции. Работа поддержана грантом РФФИ.

Список литературы

1. Belyaev A.K., Tiukanov A.S., Domcke W. // Phys. Rev.A. 2002. V. 65. P. 012508;
2. Belyaev A.K., Tiukanov A.S., Domcke W. // Chem. Phys. 2006. V. 325. P. 378;
3. Belyaev A.K., Tiukanov A.S., Domcke W. // Phys. Scripta 2009. V. 80. P. 048124;

## Электронная экранировка при измерении сечений реакций ядерного синтеза в лабораторных условиях

Мелузова Д. С.<sup>1</sup>, Зиновьев А. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: dmeluzova@gmail.com

Знание сечений реакций ядерного синтеза при энергиях ионов 1-10 кэВ важно для описания энергобаланса в Солнце и звездах и для нейтринной астрономии. Влияние электронной экранировки при соударениях между голыми ядрами в плазме Солнца незначительно и может быть легко учтено [1]. Однако, при измерении сечений в лабораторных условиях присутствие электронов серьёзно влияет на величину получаемых сечений. Существующие расчёты поправок на электронное экранирование дают значения в 1.5-2 раза меньшие, чем даёт эксперимент.

Возможность прямого определения потенциала из экспериментов по рассеянию позволяет уточнить наши представления о поведении потенциала в области слабо экранированного кулоновского взаимодействия и обеспечить эксперименты по ядерной физике более надёжными данными для оценки эффекта электронной экранировки при измерении сечений ядерного синтеза.

При малых межъядерных расстояниях экранированный кулоновский потенциал  $U$  можно разложить в ряд по  $R$ :  $U(R) = \alpha / R \cdot \exp(-\beta R) \approx \alpha / R - \alpha\beta$  ( $\alpha = Z_1 Z_2 e^2$ , где  $Z_1, Z_2$  — заряды ядер партнеров соударения).

При рассеянии на углы  $\theta$ , близкие к  $180^\circ$ , значение потенциала в точке поворота траектории  $R_0$  связано с энергией соударения в системе центра масс  $E_{cm}$  соотношением:

$$U(R_0) = E_{cm} \frac{2 \sin(\theta / 2)}{1 + \sin(\theta / 2)} + 2\alpha\beta \frac{\sin(\theta / 2) - 1}{1 + \sin(\theta / 2)} \approx E_{cm}.$$

Это позволяет оценить значение  $R_0$  по формуле  $R_0 = \alpha / (E_{cm} + \alpha\beta)$ . При углах  $\theta$  близких к  $180^\circ$  поправки к  $R_0$  малы.

Отношение сечения рассеяния на потенциале Бора к сечению рассеяния на потенциале Кулона может быть записано в виде [2]:

$$f = \frac{(d\sigma / d\Omega)_{screened}}{(d\sigma / d\Omega)_{Coulomb}} = \frac{1}{1 + \alpha\beta / E_{cm}}.$$

Используя измеренное отношение сечений, можно получить значение  $R_0$  из выражения  $R_0 = f\alpha / E_{cm}$ . Ошибка в определении  $R_0$  определяется ошибкой измерения величины  $f$  и составляет обычно  $3 \div 5\%$ .

На основе приведённых выше формул и зависимостей величины  $f$  для столкновений ионов  $\text{He}^+$  с  $\text{WO}_3$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  от энергии соударения в диапазоне энергий 73÷4000 кэВ из работы [3] были построены зависимости потенциала взаимодействия  $U$  и параметра экранирования  $\beta$  от межъядерного расстояния, а также проведено сравнение с результатами для системы  $\text{He}^+-\text{Au}$  из работы [4].

Полученные данные также позволили оценить рост сечения ядерного синтеза, связанный с наличием экранировки в потенциале, путём расчёта вероятности туннелирования сквозь потенциальный барьер:

$$\eta = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2m[U(r) - E]} dr\right).$$

Была получена зависимость астрофизического фактора  $s = \sigma(E)E / \eta$  от энергии для реакции  $d+d$  с учётом электронной экранировки. Значение  $\beta = 1.45 \pm 0.13$  было определено из данных по рассеянию. Хорошее согласие с экспериментом [5] было достигнуто при учёте существования двух каналов рассеяния ( $1s\sigma$  и  $2p\sigma$  – молекулярных орбиталей), реализуемых с равной вероятностью и имеющие разные параметры экранировки.

Список литературы

1. G. Adelberger et al. Rev.Mod. Phys. 83, 195, 2011;
2. Н.Н. Andersen, F.Besenbacher, P.Loftager, W.Moller, Phys.Rev. A 21, 1891, 1980;
3. F. Schumann, S.Zavatarelli, L.Gialanella, U.Greife, M.Junker, D.Rogalla, C.Rolfs, F. Strieder, H.P.Trautvetter, Eur.Phys.J. A 2, 237, 1998;
4. A.N. Zinoviev, NIMB 269, 829, 2011;
5. U. Greife, F.Gorris, M.Junker, C.Rolfs, D.Zahnov, Z.Phys. A 351,107, 1995;

## Численное моделирование поглощения рентгеновского излучения модифицированным ABS-пластиком

Милойчикова И. А.<sup>1</sup>, Стучебров С. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ТПУ

Эл. почта: miloichikova@gmail.com

Рентгеновское излучение повсеместно применяется для анализа внутренней структуры объектов, например, для поиска дефектов промышленных изделий, для изучения строения вещества, а также для проведения медицинских рентгенографических обследований [1, 2]. На сегодняшний день реализовано множество медицинских методов рентгенодиагностики, в том числе позволяющие получать данные о состоянии организма пациента в томографическом виде [3]. Томографические изображения являются основным источником информации для планирования и проведения процедур лучевой терапии. Распространенные в настоящее время способы дозиметрического контроля, основанные на планировании расчетными методами, ограничены параметрами исходной модели. В свою очередь для оценки реальных дозовых нагрузок используется *in vivo* дозиметрия, что является инвазивным методом, причиняющим дополнительные неудобства пациенту [4]. Как следствие, разработка неинвазив-

ных методов, позволяющих проводить планирование и верификацию дозовых нагрузок, представляет собой актуальную задачу.

Одним из решений является использование индивидуальных анатомически точно выполненных фантомов для проведения экспериментального планирования радиотерапевтических процедур. Применение аддитивных технологий позволяет решить проблему экспрессности изготовления индивидуальных фантомов. Одной из самых распространенных технологий трехмерной печати является моделирование методом наплавления (Fused Filament Fabrication, FFF), заключающейся в том, что прототипы формируются путем послойного наплавления филамента [5]. Пластиковые филаменты приобрели наибольшую популярность в силу простоты изготовления, эксплуатации и хранения.

Для внедрения предложенной методики в первую очередь необходимо разработать модель, позволяющую проводить быстрый анализ влияния концентрации тяжелого металла в пластиковом филаменте на характер взаимодействия рентгеновского излучения с материалом. В данной работе был выбран ABS-пластик с примесями свинца различных концентраций для создания материалов с заданной плотностью [6]. В качестве источника излучения при моделировании использовались реальные параметры пучка рентгеновского генератора РАП-160-5 [7]. Значение плотности исследуемых материалов подбирались в соответствии с плотностями реальных анатомических структур.

В результате были получены расчетные профили и расчетные глубинные распределения дозы рентгеновского излучения в модифицированном ABS-пластике. На следующем этапе необходимо провести экспериментальную оценку полученных расчетных данных для дальнейшей корректировки модели.

#### Список литературы

1. Cherepennikov Yu., Gogolev A., Device for X-ray spectral absorption analysis with use of acoustic monochromator, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 517, Article number 012037, 2014;
2. Chair C-M. Ma, Coffey C W, DeWerd L.A., Liu C., Nath R., Seltzer S.M., Seuntjens J.P., AAPM protocol for 40–300 kV X-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology, *Med. Phys.*, V. 28 (6), pp 868–893, 2001;
3. Hampai D., Marchitto L., Dabagov S.B., Allocca L., Alfuso S., Innocenti L. Desktop X-ray tomography for low contrast samples, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 309, pp. 264–267, 2013;
4. Development of procedures for in vivo dosimetry in radiotherapy, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1606\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1606_web.pdf);
5. A comprehensive introduction to 3D printing technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dprintingforbeginners.com/3d-printing-technology/>;
6. Fischer F, Thermoplastics: the best choice for 3D printing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.appliancedesign.com/ext/resources/AM/Home/Files/PDFs/themoplastics.pdf>;
7. Руководство по эксплуатации «Аппарат рентгеновский переносной для промышленного применения» –2008. – 34 с.;



## **Изучение корреляций средних значений поперечных импульсов частиц, рождающихся в ядро-ядерных соударениях в рамках blast-wave модели**

*Сокольский В. В.<sup>1</sup>, Алцыбеев И. Г.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: sokolskiyv@gmail.com

В 2000 г. в CERN было официально объявлено о новом состоянии вещества-кварк-глюонная плазма. Состояние характеризуется экстремально высокими значениями давления и температуры. КГП может наблюдаться при протон-протонных и ядро-ядерных столкновениях на БАК.

Дальние корреляции между наблюдаемыми, измеренными в разнесённых по быстроте интервалах, несут в себе информацию о начальном состоянии протон-протонных и ядро-ядерных высокоэнергичных столкновений. В настоящей работе применён метод дальних корреляций между средними поперечными импульсами частиц в двух непересекающихся по быстроте окнах. Такие корреляции проявляются в модели кварк-глюонных струн [1]. Для исследования данных корреляций, вызванных радиальным потоком в рамках blast-wave модели [2], использован монтекарловский генератор событий.

В работе показано, что флуктуации поверхностной скорости частиц от события к событию ведут к возникновению корреляций. Обнаружен рост коэффициента корреляции с увеличением поверхностной скорости и величиной её флуктуации. А также продемонстрирована положительная взаимосвязь между массой частиц и коэффициентом корреляции. Результаты позволяют сделать вывод, что влияние радиального потока должно быть принято во внимание при интерпретации экспериментальных данных.

### Список литературы

1. V.V. Vechernin and R.S. Kolevatov, «Long-Range Correlations between Transverse Momenta of Charged Particles Produced in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions Phys.Atom.Nucl. 70 (2007) 1809-1818, Yad.Fiz. 70 (2007) 1858-1867;
2. E. Schnedermann, J. Sollfrank, U. Heinz, Thermal phenomenology of hadrons from 200-A/GeV S+S collisions, Phys.Rev. C48 (1993) 2462-2475; nucl- th/9307020;

## Исследование воздействия двухмикронного лазерного излучения на внутреннюю стенку венозного сосуда

Чабушкин А. Н.<sup>1</sup>, Рябочкина П. А.<sup>1</sup>, Беляев А. А.<sup>1</sup>, Кузнецова О. А.<sup>1</sup>,  
Ляпин А. А.<sup>1</sup>, Хрущалина С. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. Н.П. Огарёва

Эл. почта: chabushkin@mail.ru

В настоящее время в клинической практике для лечения варикозной болезни вен получил распространение метод эндовазальной лазерной коагуляции (ЭВЛК).

Для проведения ЭВЛК применяются установки на основе лазерных диодов с длиной волны излучения 810 нм, 970 нм и твердотельного YAG:Nd лазера с длиной волны излучения 1.06 мкм. Перечисленные выше лазеры классифицируют как «Н»-лазеры, так как генерируемое ими излучение хорошо поглощается гемоглобином.

В последнее время для реализации метода ЭВЛК предлагается использовать «W»-лазеры. Излучение этих лазеров приходится на пик поглощения воды, содержащейся в крови и стенке вены.

Наряду с имеющимися в клинической практике источниками лазерного излучения для ЭВЛК, актуальной задачей, по-прежнему, является поиск источников лазерного излучения, использование которых обеспечивало бы стойкую коагуляцию и при этом в минимальной степени оказывало бы воздействие на прилегающие к сосуду ткани и нервы.

Кроме того, несмотря на многообразие работ, посвященных исследованию процесса ЭВЛК, к настоящему времени не существует единого мнения о физических механизмах воздействия лазерного излучения на стенку венозного сосуда. В соответствии с этим, работы по исследованию возможности применения двухмикронного лазерного излучения для ЭВЛК, а также исследование физических механизмов воздействия данного излучения на стенку венозного сосуда, являются актуальными и представляют практический интерес.

В настоящей работе проведены исследования по воздействию излучения лазера YLF:Tm с длиной волны излучения  $\lambda_{изл.}=1885$  нм на внутреннюю поверхность стенок венозных сосудов, просвет которых был заполнен физиологическим раствором, либо цельной кровью, соответственно.

При проведении экспериментов выявлено, что повреждение внутренней стенки вены, приводящее к ее «слипанию», происходит в случае сегментов вен, в просвете которых находится цельная кровь, при значении мощности излучения 3 Вт и скорости перемещения пробирки с кровью 1 мм/сек. Выявлено, что значение мощности лазерного излучения, при которой достигается эффект коагуляции при использовании двухмикронного излучения, ниже аналогичных величин мощности излучения

лазеров с длиной волны излучения 810 нм (15 Вт) и 1.56 мкм (5-10 Вт), используемых в настоящее время для ЭВЛК.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что в экспериментах по ЭВЛК с цельной кровью на термическое повреждение внутренней стенки венозного сосуда оказывает воздействие излучение нагретого карбонизированного слоя, который образуется на торце оптического световода в процессе коагуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 3.384.2014/К и государственного задания № 0708 0210059 611 («Организация проведения научных исследований»).

## **Влияние изотопического замещения $H^+$ на динамику фазовых превращений в бычьем сывороточном альбумине**

*Вашченко В. Э.<sup>1,2</sup>, Дмитриев А. В.<sup>1,2</sup>, Федосеев А. И.<sup>1</sup>, Лушников С. Г.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбГУ

Эл. почта: vikvas@mail.ioffe.ru

Известно, что последовательность фазовых превращений белков существенным образом зависит от растворителя, в котором они находится. Изотопическое замещение  $H^+ \leftrightarrow D^+$  меняет свойства растворителя и, соответственно, может изменить последовательность фазовых превращений белков. В настоящей работе с помощью мандельштам-бриллюэновского рассеяния (МБР) света изучали особенности фазовых превращений белков в буферных растворах на основе  $H_2O$  и  $D_2O$  при изменении температуры на примере модельного белка бычий сывороточный альбумин (БСА).

При фазовых превращениях белков, связанных с изменением температуры, меняется конформация молекул и, соответственно, скорость распространения звука в растворе. Эти изменения проявляются в спектрах МБР как изменение величины сдвига компонент Мандельштама-Бриллюэна (МБ) относительно несущей несмещенной линии и интенсивности этих линий. В данной работе исследовались растворы БСА разной концентрации в натрий-фосфатном буфере на воде и на  $D_2O$  с  $pH = 7.45$ . Температура менялась от 293 до 367 градусов Кельвина. Для анализа рассеянного света использовался 3-х проходной пьезо-сканируемый интерферометр Фабри-Перо со свободным спектральным интервалом около 22 ГГц, применялась 180 градусная геометрия рассеяния. В качестве источника возбуждающего света использовался аргоновый лазер с  $\lambda = 488$  нм.

Были получены температурные зависимости сдвига, интенсивностей и полуширины на полувисоте дублетов МБР света и интенсивностей компонент упругого рассеяния в растворах БСА. Анализ данных МБР света показал, что в области денатурации БСА в зависимости от растворителя могут существовать промежуточные фазы, а при дальнейшем нагревании реализуется переход в гелеподобное состояние.

## **Компьютерное моделирование микроструктуры фрагментов губчатой костной ткани для исследования напряженно-деформированного состояния**

*Ластовкина Е. Н.<sup>1</sup>, Колмакова Т. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ТГУ

Эл. почта: caterinka4@gmail.com

Задачи механики, возникающие при создании остеоимплантатов, решаются на основе исследования механического поведения костных тканей и включают в себя создание подходов и способов моделирования их сложной иерархической структуры, определение их эффективных механических характеристик, установление основных требований к заменителям с точки зрения механики материалов имплантатов.

Кость представляет собой биологический композиционный материал со сложной структурной организацией компонентов, определяющей анизотропию механических свойств кости и подстраивающейся под изменяющиеся механические условия [1-3].

Губчатая костная ткань состоит из перекладин – трабекул. Трабекулы располагаются закономерно, соответствуя внешним нагрузкам, которые испытывает данная кость [3]. Направленность расположения трабекул костной ткани варьируется в зависимости от анатомического расположения фрагмента кости.

Целью работы являлось компьютерное моделирование микроструктуры фрагментов губчатой костной ткани.

В качестве структурной единицы компьютерной модели фрагмента кости рассматривался трабекулярный узел, содержащий трабекулы, расположенные перпендикулярно друг относительно друга. Трабекулярный узел строился на основе представленных в литературе экспериментально полученных параметров эллипса структуры [4] фрагментов кости и значений средних толщин трабекул [5]. Вся модель фрагмента кости формировалась путем копирования трабекулярных узлов в трех взаимно перпендикулярных направлениях, учитывая угол, показывающий направленность расположения главных трабекул природной кости [4].

Построенные компьютерные модели структуры фрагментов губчатой костной ткани необходимы для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния, анализ которого позволит разработать рекомендации по созданию механически совместимых с костной тканью имплантатов, обеспечивающих сохранение существующего в макрообъеме кости напряженно-деформированного состояния при имплантации и тем самым исключить перестройку кости на границе кость-имплантат.

### Список литературы

1. Cowin, S.C., Wolff's law of trabecular architecture at remodeling equilibrium, *J. Biomech. Engng*, Vol. 108, P. 83–88, 1986;
2. Zioupos P., Kaffy C., Currey J.D. Tissue heterogeneity, composite architecture and fractal dimension effects in the fracture of ageing human bone, *International Journal of Fracture*, Vol.139, P. 407– 424, 2006;
3. Киченко А.А., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Симановская Е.Ю., Еловикова А.Н. Становление и развитие классической теории описания структуры костной ткани, *Российский журнал биомеханики*, Том 12, № 1, С. 69–89, 2008;

4. Ken-ichi Tsubota, Taiji Adachi, Yoshihiro Tomita Functional adaptation of cancellous bone in human proximal femur predicted by trabecular surface remodeling simulation toward uniform stress state, *Journal of Biomechanics*, Vol.35, P.1541–1551, 2002;
5. D. Dagan, M. Be'ery, A. Gefen, Single-trabecula building block for large-scale finite element models of cancellous bone, *Med. Biol. Eng. Comput*, № 42, P. 549-556, 2004;

## Исследование вторичной структуры БСА и овальбумина методом ИК-спектроскопии

*Абросимова К. В.<sup>1</sup>, Шуленина О.В.<sup>1</sup>, Пастон С.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: pilgr111m@gmail.com

Функционирование белков в живом организме во многом определяется их пространственной формой, которая задается первичной и вторичной структурой белковой молекулы, а также последующими более высокими уровнями структурной организации. Вторичная структура белка представляет собой тип укладки полипептидных цепей, который характеризуется максимальным образованием водородных связей. Известно, что белки, имеющие одинаковую первичную структуру, могут образовывать разные формы вторичной структуры. Варьируя условия среды, можно наблюдать переходы во вторичной структуре белка, которые, как правило, влекут за собой изменения третичной и четвертичной структуры белковой молекулы [1]. Так, переход нормального прионного белка в инфекционную изоформу в клетке происходит на уровне вторичной структуры белка:  $\alpha$ -спиральные участки превращаются в  $\beta$ -слои. Затем прионизованные белки образуют амилоиды – надмолекулярные белковые агрегаты [2]. В опытах *in vitro* при нагревании водного раствора бычьего сывороточного альбумина (БСА) или яичного альбумина (овальбумина) также наблюдается изменение вторичной структуры белков – денатурация. При высокой концентрации белка может происходить агрегирование молекул [1]. Выявление закономерностей конформационных переходов хорошо изученных белков, таких как БСА и овальбумин, может помочь в дальнейшем исследовании превращений прионных белков.

Метод ИК-спектроскопии широко используется для исследования структуры молекул. В частности, для белков этот метод дает информацию о функциональных группах, участвующих в образовании водородных связей при формировании различных типов вторичной структуры. Наиболее интенсивной и информативной является полоса Амид I ( $1600\text{ см}^{-1}$ - $1700\text{ см}^{-1}$ ), которую составляют валентные колебания связи C=O амидной группы, а также плоскостные деформационные колебания группы N–H и валентные колебания группы C–N [3].

Измерения проводились с помощью ИК-Фурье спектрометра Nicolet 8700 методом однократного НПВО. Каждый полученный спектр являлся средним по 512 измеренным спектрам. В ходе эксперимента были получены ИК-спектры безводного БСА, раствора БСА в воде, нативного и денатурированного овальбумина. Обработка спектров проводилась с помощью программного обеспечения, поставляемого производителем прибора, а также в программе Origin. В интересующей нас составной полосе Амид I производилась корректировка базовой линии. Затем находили коорди-

наты максимумов составляющих полос как точки минимумов второй производной полосы Амид I. Составляющие полосы искали в форме гауссовых кривых. Соответствие типов вторичной структуры белков определенным положениям волновых чисел в разложении полосы Амид I позволяет вычислить процентное соотношение  $\alpha$ -спиралей,  $\beta$ -слоев,  $\beta$ -изгибов и неупорядоченных последовательностей в изучаемом белке [4]. Определена вторичная структура БСА и овальбумина при разных условиях. Опыт показал, что при денатурации происходит снижение количества  $\alpha$ -спиральных участков и рост содержания  $\beta$ -слоев, причем метод ИК-Фурье спектроскопии НПВО позволяет наблюдать этот эффект для белков в составе яйца.

Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Оптические и лазерные методы исследования вещества». Работа выполнена при поддержке СПбГУ (шифр проекта 11.37.290.2015).

#### Список литературы

1. А. Ленинджер. Основы биохимии, т.1. М. Мир, 1985;
2. Ch.M. Dobson. The structural basis of protein folding and its links with human disease. Trans. R. Soc. Lond. B. 2001, vol. 356. 133-145;
3. H. Fabian, W. Mantele. Infrared Spectroscopy of Proteins. In: Handbook of Spectroscopy, Ed. by J.M. Chalmers, P.R. Griffiths. Willey;
4. H. Yang, S. Yang, J. Kong, A. Dong, S. Yu. Obtaining information about protein secondary structures in aqueous solution using Fourier transform IR spectroscopy. Nat. Protoc. 2015, vol. 10, N 3. 382–396;

## **Дизайн активного центра трегалоза/мальтоза-связывающего белка как чувствительного элемента биосенсора на глюкозу**

*Пивоваров В. А.<sup>1</sup>, Фонин А. В.<sup>2</sup>, Рычков Г. Н.<sup>3,1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ИНЦ

<sup>3</sup>ПИЯФ

Эл. почта: public.viacheslav@gmail.com

Количество людей, страдающих от диабета, существенно увеличилось за последние десятилетия. В норме значение концентрации глюкозы в крови человека лежит в диапазоне от 3 до 6 мМ (1). При достижении концентрации глюкозы значений ниже 2 и выше 8 мМ диагностируется гипо- и гипергликемия, соответственно. Чтобы предотвратить негативные последствия гипер- и гипогликемии требуется непрерывный мониторинг концентрации глюкозы в крови. Поиск «идеального» чувствительного элемента является целью исследователей на протяжении полувека, что привело к созданию применяемых сейчас электрохимических систем мониторинга, главным недостатком которых является необходимость проведения инвазивного забора крови.

Альтернативной электрохимическим методам являются методы, основанные на флуоресцентных свойствах периплазматических белков грам-отрицательных бактерий, меняющих свою конформацию при связывании глюкозы. В работе Fonin A.V. et al (2) в качестве потенциального детектора глюкозы было предложено использовать мутантную форму трегалоза/мальтоза-связывающего белка (ТМВР) из термофиль-

ной бактерии *Thermococcus litoralis*, несущую флуоресцентную метку BADAN. ТМВР отличается высокой стабильностью и полностью не переходит в развернутое состояние даже при 95 °С (3). Этот белок способен, кроме трегалозы и мальтозы, связывать глюкозу с константой диссоциации комплекса ТМВР – глюкоза 3 – 8 мМ (4).

Цель работы заключалась в нахождении возможных замен аминокислотных остатков в трегалоза/мальтоза связывающем белке (ТМВР), которые приводили бы к смещению константы диссоциации комплекса белка с глюкозой, позволяющему определять концентрацию глюкозы во всем диапазоне изменения её содержания в крови больного диабетом (2-20 мМ). Ожидаемая высокая стабильность мутантных форм ТМВР должна обеспечить возможность непрерывного мониторинга содержания глюкозы в крови человека.

Работа проводилась методами молекулярного моделирования, включая молекулярную механику в неявно заданном растворителе и «гибкий» молекулярный докинг в программе ICM Pro v3.7. В качестве исходной модели исследуемого объекта взяли кристаллографическую структуру комплекса ТМВР с трегалозой (PDB код 1EU8). По результатам докинга в активном центре ТМВР были выявлены основные аминокислотные остатки, участвующие в связывании глюкозы: Asp70, Asp123, Glu178, Glu239, Gly294, Arg364, Thr46, Trp257 и Trp295. Были произведены аминокислотные замены указанных остатков, кардинально не нарушающие физико-химические свойства поверхности активного центра. Для оценки связывания глюкозы с мутантными формами белка использовались следующие критерии: величина оценочной функции связывания, количество межмолекулярных водородных и константа диссоциации комплекса.

Проведённый анализ позволяет нам предположить, что четыре точечные замены D70E, D123E, W257Y, R364K существенным образом дестабилизируют взаимодействие глюкозы с сильным субсайтом связывания ТМВР, что потенциально может расширить динамический диапазон измерения концентраций до величин, характерных для людей, страдающих гипергликемией.

#### Список литературы

1. Renard E., Monitoring glycemic control: the importance of self-monitoring of blood glucose, *Am J Med* 118: 12S-19S, 2005;
2. Fonin A.V., Povarova O.I., Staiano M., D'Auria S., Turoverov K.K., et al., The trehalose/maltose-binding protein as the sensitive element of a glucose biosensor, *Optical Materials* 36: 1676-1679, 2014;
3. Povarova O.I., Stepanenko O.V., Sulatskaya A.I., Kuznetsova I.M., Turoverov K.K., et al., High stability of trehalose/maltose binding protein from *Thermococcus litoralis* makes it a good candidate as a sensitive element in biosensor systems for sugar control, *Spectroscopy* 24: 349-353, 2010;
4. Herman P., Barvik I., Staiano M., Vitale A., Vecer J., et al., Temperature modulates binding specificity and affinity of the d-trehalose/d-maltose-binding protein from the hyperthermophilic archaeon *Thermococcus litoralis*, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics* 1774: 540-544, 2007;

## **Взаимодействие ДНК с пиперазиновыми производными бензоимидазофталазина**

*Осинникова Д. Н.<sup>1</sup>, Морошкина Е. Б.<sup>1</sup>, Травкина В. И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: osinnikovadasha@yandex.ru

В настоящее время ведется активный поиск новых биологических агентов, способных взаимодействовать с молекулой ДНК. Биологическая активность многих соединений заключается в формировании комплексов с макромолекулой. Наличие в структуре соединения плоского гетероциклического хромофора, как правило, указывает на возможность возникновения таких взаимодействий. Существуют различные способы связывания подобных соединений с молекулой ДНК, среди которых биологически значимыми являются интеркаляция хромофора в двойную спираль ДНК и его расположение в малой бороздке.

Взаимодействие молекулы ДНК с синтетическими производными бензо[4,5]имидазо[1,2-а]фталазина, имеющими в 9-ом положении остатки пиперазина, в данной работе было исследовано спектральными, оптическими и гидродинамическими методами. Данные соединения были синтезированы в НИИ гигиены, профпатологии и экологии человека ФМБА РФ [1].

Для определения наличия взаимодействия исследуемых соединений с макромолекулой проводились спектрофотометрические исследования растворов, содержащих оба компонента. Наблюдаемые изменения в спектрах поглощения данных производных бензоимидазофталазина при увеличении концентрации ДНК в растворе свидетельствуют об их взаимодействии с макромолекулой. Количественный анализ этих изменений позволяет сделать вывод не только о наличии связывания лиганда с молекулой ДНК, но и определить стехиометрию образующихся комплексов.

Для определения способа связывания исследованных соединений с ДНК использовали методы вискозиметрии и динамического двойного лучепреломления. При интеркаляции молекулы лиганда в двойную спираль ДНК происходит увеличение контурной длины макромолекулы, что приводит к увеличению характеристической вязкости раствора. Но в случае высокомолекулярной ДНК рост характеристической вязкости может происходить также за счет увеличения термодинамической жесткости макромолекулы. Для контроля изменения длины статистического сегмента макромолекулы при образовании комплекса измеряли оптическую анизотропию комплекса методом динамического двойного лучепреломления. При связывании исследованных соединений с молекулой ДНК наблюдается значительное увеличение и характеристической вязкости, и оптической анизотропии макромолекулы. Проведенные расчеты показали, что при образовании комплекса происходит увеличение термодинамической жесткости макромолекулы, а ее контурная длина практически не меняется.

Таким образом, можно сделать вывод, что интеркаляции бензоимидазофталазинового хромофора в двойную спираль ДНК не происходит. Можно предположить, что исследованные соединения связываются с ДНК в малой бороздке двойной спирали, увеличивая ее термодинамическую жесткость.



## Список литературы

1. Kuznetsov, V.A.; Shubin, K.M.; Petrov, M.L. "Synthesis of benzo[4,5]imidazo[2,1-a]phthalazines" Russ. J. Org. Chem., 40, 1702, 2004;

## **Конформации макромолекул полиэлектролитов с различной плотностью заряда в растворах разных ионных сил**

*Доммес О. А.<sup>1</sup>, Павлов Г. М.<sup>1,2</sup>, Окатова О. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИВС РАН

<sup>2</sup>СПбГУ

Эл. почта: oljaspb552@gmail.com

Полиэлектролиты являются полимерами, которые обладают способностью к диссоциации зарядов в полярных растворителях, в результате образуются заряженные полимерные цепи и мобильные противоионы [1, 2]. Исследования таких цепей представляют фундаментальный и прикладной интерес. Полиэлектролиты привлекают большое внимание в связи с их способностью образовывать интерполимерные комплексы с синтетическими и биополимерами. Синтетические полиэлектролиты используются также как носители биологически активных веществ. Большая часть биополимеров является ионногенными полимерами. Заметное развитие в последнее время получила новая область науки – биомедицинские макромолекулярные системы. Многие из таких полимерных систем несут электрические заряды. В Институте высокомолекулярных соединений РАН под руководством чл.-корр. РАН Е.Ф. Панарина проводятся систематические исследования взаимосвязи химического строения водорастворимых нейтральных и заряженных полимеров-носителей с их биологической активностью [3]. Синтезирован целый ряд синтетических полимеров, проявляющих разнообразные типы биологических активностей. Одной из важнейших задач при исследовании этих полимеров является определение величин молекулярной массы и установление соотношений Куна-Марка-Хаувинка для их последующего использования при тестировании многочисленных образцов. В лаборатории гидрофильных полимеров ИВС РАН были синтезированы сополимеры N-метил-N-винилацетамида и N-метил N-виниламина гидрохлорида П(МВАА-ГМВА) с разной линейной плотностью заряда. Эти полимеры могут использоваться для доставки лекарственных веществ к клетке. Задачей настоящей работы было исследовать их свойства. Исследованы фракции П(МВАА-ГМВА) состава 95:5 мол. % и 92:8 мол. %, с малой линейной плотностью заряда в 20-кратном интервале молекулярных масс. Фракции изучали в растворах в предельно широком интервале ионных сил – от водных бессолевых ( $\sim 10^{-6}$ М) до водно-солевых растворов вплоть до ионной силы 6М NaCl. Ранее [4, 5] были исследованы незаряженные гомополимеры П(МВАА) и сополимеры П(МВАА-ГМВА) с высокой линейной плотностью заряда состава 56:44 мол. %. Исследования фракций проводили следующими методами молекулярной гидродинамики и оптики: скоростная седиментация, поступательная диффузия, вискозиметрия, которые являются одними из основных методов исследования молекулярных характеристик полимеров любой природы. С помощью этих методов независимо были получены основные гидродинамические характеристики: характеристическая вязкость, коэффициенты скоростной седиментации и поступательной диффузии. Сово-

купность гидродинамических данных позволяет получить достоверную информацию о размерах и форме макромолекул, об их конформационном статусе. Методом седиментационно-диффузионного анализа в условиях подавления полиэлектролитных эффектов в растворах 0.2 М NaCl получены молекулярные массы фракций сополимеров П(МВАА-ГМВА). Исследовано вязкое течение разбавленных растворов фракций в предельно широком интервале ионных сил. При получении информации о размерах изолированных цепей полиионов в бессолевых растворах, ключевым вопросом является возможность измерить соответствующие физические характеристики при очень малых концентрациях, которые соответствовали бы критерию достаточной степени разбавленности раствора. Информация о размерах и конформации линейных полиэлектролитов при минимальных ионных силах получена из изучения вязкого течения их разбавленных растворов с использованием ранее предложенной методики определения характеристической вязкости полиионов [6]. В результате были получены скейлинговые соотношения Куна-Марка-Хаувинка-Сакурады и сделаны оценки равновесной жёсткости сополимеров в растворах разных ионных сил. Проведено сравнение конформационного поведения макромолекул с разной линейной плотностью заряда.

#### Список литературы

1. Dautzenberg, H., Jaeger, W., Kötz, J., Philipp, B., Seidel, C., Stscherbina, D. Polyelectrolytes: Formation, Characterization, and Application. Hanser-Gardner Publications: Munich, p 343, 1994;
2. Dobrynin A.V., Rubinstein M., Theory of polyelectrolytes in solutions and at surfaces, Prog. Polym. Sci., Vol. 30, No. 11, p. 1049-1118, 2005;
3. Панарин Е.Ф., Лавров Н.А., Соловский М.В., Шальнова Л.И. Полимеры – носители биологически активных веществ. Санкт-Петербург: ЦОП “Профессия”, 2014;
4. Pavlov G.M., Okatova O.V., Mikhailova A.V., Ulyanova N.N., Gavrilova I.I., Panarin E.F. Conformational parameters of poly(N-methyl-N-vinylacetamide) molecules through the hydrodynamic characteristics studies, Macromolecular Bioscience, V. 10. P. 790-797, 2010;
5. Павлов Г.М., Окатова О.В., Гаврилова И.И., Ульянова Н.Н., Панарин Е.Ф., Размеры и конформации гидрофильных и гидрофобных полиэлектролитов в растворах разной ионной силы, Высокомолекулярные соединения, серия А, том 55, № 12, с.1-7, 2013;
6. Павлов Г.М., Губарев А.С., Зайцева И.И., Сибилёва М.А., К определению величины характеристической вязкости полиэлектролитов в бессолевых растворах, Журнал прикладной химии, 79, 1423, 2006;

## Взаимодействие коротких пептидов KE и KEDW с ДНК

*Болдырев А. Ю.<sup>1</sup>, Морозова Е. А.<sup>1,2</sup>, Кузнецова Е. П.<sup>1,2</sup>, Касьяненко Н. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>СПб ИБГ

Эл. почта: morozova.kate91@gmail.com

Исследование молекулярного механизма действия коротких пептидов является актуальной задачей молекулярной медицины и геронтологии. Известно, что пептиды,

состоящие из нескольких аминокислотных остатков, выполняют роль сигнальных молекул, осуществляющих регуляцию функций организма на различных уровнях организации живой материи. Исследуемые пептиды KE и KEDW были получены в Санкт-Петербургском институте биорегуляции и геронтологии классическим способом пептидного синтеза в растворе.

KE (Lys-Glu, вилон) – синтетический пептид, созданный на основе фрагмента аминокислотной последовательности, встречающегося в составе эндогенных факторов тимуса и цитокинов. Клинические испытания на животных показали высокую иммунологическую, репаративную активность и безвредность этого вещества. В частности, в опытах на культурах клеток лимфоцитов человека показан выраженный иммуностимулирующий эффект KE, который проявлялся в индукции дифференцировки Т-лимфоцитов [2, 3].

KEDW (Lys-Glu-Asp-Trp, панкреаген) – синтетический пептид, обладающий инсулиноподобным эффектом. В экспериментах на клетках поджелудочной железы человека линии Mia Pasa-2 установлено, что пептид KEDW способствует дифференцировке полипотентных клеток в секреторные клетки островков Лангерганса [1].

Однако, молекулярный механизм биологического действия пептидов остается до конца не изученным. Предполагаемой мишенью действия пептидов является молекула ДНК. Целью исследования стало изучение взаимодействия пептидов KE и KEDW с молекулой ДНК в растворе.

Растворы пептидов KE и KEDW смешивали с готовым раствором ДНК различной концентрации в 5 мМ NaCl. Для анализа взаимодействия пептидов с ДНК в растворе использовали методы УФ-спектрофотометрии, вискозиметрии, двойного лучепреломления в потоке (ДЛП).

Для пептида KE при его добавлении в раствор ДНК никакого значимого изменения спектральных свойств обнаружено не было. Напротив, для пептида KEDW было показано существенное изменение амплитуды спектральных полос и смещение главных максимумов.

Для изучения влияния пептида на третичную структуру ДНК применяли метод низкоградиентной вискозиметрии. Были получены значения приведенной вязкости растворов ДНК в присутствии разных концентраций пептида. Погрешность измерений составляла 5-10%, а падение вязкости при взаимодействии ДНК с пептидами достигало 15% для KE и 40% для KEDW, что указывало на изменение объема макромолекулярного клубка ДНК при взаимодействии с пептидами. Рассмотрели также возможное влияние связывания пептидов на жесткость молекулы ДНК (ее персистентную длину). Был проведен ряд экспериментов с использованием метода динамического двойного лучепреломления (ДЛП), который позволяет определить оптическую анизотропию статистического сегмента ДНК. Эта величина связана с жесткостью макромолекулы и оптической анизотропией пары нуклеотидов. В этом случае было замечено падение оптической анизотропии на 15-20% для каждого пептида. Таким образом, взаимодействие пептида KEDW с ДНК оказывает влияние на ее вторичную и третичную структуру. Пептиды KE и KEDW связываются с молекулой ДНК, и в зависимости от их концентрации в растворе комплексобразование сопровождается изменением ряда конформационных параметров ДНК.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 13-03-01192 а, и СПбГУ11.38.644.2013.

Список литературы

1. 1. Хавинсон В.Х., Малинин В.В. Влияние тетрапептида панкреатина на течение экспериментального сахарного диабета // Проблемы эндокринной патологии N 4. С. 2010. С. 61-70;
2. 2. Хавинсон В.Х., Соловьёв А.Ю., Жилинский Д.В. и соавт. Эпигенетические аспекты пептидной регуляции старения // Успехи геронтологии. 2012. Т. 25. N 1. С. 11-22;
3. 3. Khavinson V.Kh., Malinin V.V. Gerontological aspects of genome peptide regulation. Basel (Switzerland), 2005;

## **Исследование систем ДНК-наночастицы и ДНК-нанокластеры в растворе и на поверхности**

*Варшавский М. С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: varshavskiiimiha@mail.ru

В настоящее время металлические наноматериалы являются объектом интенсивного изучения из-за новых возможностей их использования в современных технологиях. Нанопорошки используются на конечных стадиях обработки полупроводников, при создании материалов с водо- и маслоотталкивающими свойствами, при производстве износостойких и высокопрочных материалов. Металлические наночастицы применяются в качестве катализаторов и защитных материалов. Нанокластеры нашли применение в оптических стеклах и нанобиосенсорах. Стоит отметить важность использования наноматериалов в медицине и биологии при изготовлении имплантатов, биосенсоров, избирательных и эффективных катализаторов и нанопорошков лекарственных препаратов. Наноплазмоника с использованием биологических систем может найти применение как для разработки новых подходов и способов лечения в современной медицине, так и в области информационных технологий. Целью данной работы являлось исследование влияния низкомолекулярных электролитов на спектральные свойства серебряных наночастиц (НЧ) и нанокластеров (НК) в водном растворе, изучение способов взаимодействия серебряных НЧ с макромолекулой ДНК и исследование условий роста серебряных НК на молекуле ДНК. Наночастицы серебра интересны своими уникальными оптическими свойствами: их коллоидные растворы имеют специфическую полосу поглощения в видимой области спектра, обусловленную плазмонным резонансом. Изменение этой полосы под действием различных факторов дает возможность следить за состоянием наночастиц в растворе.

В данной работе использовались наночастицы серебра, полученные восстановлением нитрата серебра боргидридом натрия; ДНК тимуса теленка (производство Sigma, молекулярная масса  $8 \cdot 10^6$  Да коммерческого препарата была определена вискозиметрически); хлорид натрия; нитрат натрия; хлорид магния. Для исследования систем использовались методы: УФ спектрофотометрия (СФ-56, СФ-2000), круговой дихроизм (Mark IV, Jobin Ivon), атомно-силовая микроскопия (NanoScope IV, III), низкоградиентная вискозиметрия (ротационный вискозиметр типа Зимма-Крозерса с градиентами скорости  $1-4 \text{ c}^{-1}$ ), просвечивающая электронная микроскопия (измерения проводились в наноцентре СПбГУ <http://nano.spbu.ru>). Измерения проводились при температуре 21 °С.

В ходе проведенного исследования было определено оптимальное соотношение реагентов  $\text{NaBH}_4$  и  $\text{AgNO}_3$  для создания стабильных (до 3 месяцев) НЧ в водном растворе и была продемонстрирована их нестабильность в водно-солевых растворах хлорида натрия и нитрата натрия. Стоит отметить, что присутствие ДНК значительно увеличивает стабильность НЧ в водно-солевых растворах. Показано, что НЧ незначительно влияют на конформацию ДНК. При определенных условиях в растворе фиксировали появление флюоресцирующих нанокластеров серебра размером до 15 атомов. Также в проведенном исследовании удалось получить НЧ в присутствии ДНК без использования каких-либо восстанавливающих агентов (условия формирования НЧ в таких системах были определены).

## **Теоретическое изучение конформационных переходов в изолированной линейной цепи, внедрённой в полимерную щётку из звездообразных макромолекул**

*Казakov А. Д.<sup>1</sup>, Полоцкий А. А.<sup>2,3</sup>, Бирштейн Т. М.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>Институт высокомолекулярных соединений РАН

<sup>3</sup>ИТМО

Эл. почта: alexk911@lenta.ru

Слои макромолекул, плотно привитых к непроницаемой поверхности, или полимерные щётки, являются одними из наиболее исследуемых полимерных систем. В последние годы особое внимание привлекают щётки, образованные прививкой к поверхности цепей более сложной архитектуры, в частности, регулярно разветвленных дендритных макромолекул — дендронов. Были успешно разработаны методы создания таких щёток, а в теоретических работах было показано, что дендронные щётки имеют сложную внутреннюю структуру. В частности, в густо привитых плоских щётках (и сферических с большим радиусом кривизны) происходит разделение дендронов по степени их растяжения [1].

В настоящей работе рассматривалась одиночная линейная полимерная цепь, внедрённая в плоскую щётку из привитых звездообразных макромолекул. Исследовалось влияние плотности прививки звёзд, образующих щётку, число лучей в них и длины внедрённой линейной цепи на конформационные свойства цепи. Важно отметить, что по своей химической структуре (то есть, по структуре мономерного звена) внедрённая цепь была идентичной макромолекулам, образующим щётку. Система находилась в хорошем растворителе.

Задача решалась с помощью численного метода самосогласованного поля Схойтенса-Флира. Было показано, что короткая цепь (контурная длина которой меньше удвоенной длины луча звезды) или не очень длинная цепь в редко привитой щётке находится в конформации «клубка», расположенного вблизи поверхности прививки, тогда как длинная цепь в густо привитой щётке принимает конформацию «цветка» с вытянутым «стеблем», находящимся в щётке и клубковой частью, расположенной на поверхности щётки. При увеличении плотности прививки звёзд цепь, длина которой больше удвоенной длины луча звезды, претерпевает конформационный переход «клубок» — «цветок». Этот переход имеет черты фазового перехода первого рода: он происходит резко, а в области перехода наблюдается сосуществова-

ние двух состояний («клубка» и «цветка»), что выражается в бимодальной форме распределения конца линейной цепи. Аналогичный переход «клубок»-«цветок» можно вызвать, увеличивая длину цепи при фиксированной плотности прививки. При густой прививке этот переход также идёт скачкообразно, в то время как при малых плотностях прививки звёзд – непрерывно, без сосуществования двух состояний в области перехода. Подобный непрерывный переход характерен для цепи, внедрённой в щётку из линейных макромолекул, независимо от плотности прививки [2]. Показано, что длина цепи в точке перехода первого рода уменьшается при увеличении плотности прививки звёзд, то есть, при соответствующем росте толщины щётки.

#### *Благодарности*

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-03-00372а), ОХНМ РАН (программа ОХ-3) и программы Правительства РФ по государственной поддержке ведущих университетов (субсидия 074-U01).

#### Список литературы

1. Borisov O.V., Polotsky A.A., Rud O.V., Zhulina E.B., Leermakers F.A.M., Birshtein T.M., Dendron brushes and dendronized polymers: a theoretical outlook, *Soft Matter*, 10, 2093-2101, 2014;
2. Skvortsov A.M., Klushin L.I., Gorbunov A.A., Long and Short Chains in a Polymeric Brush: A Conformational Transition, *Macromolecules*, 30, 1818–1827, 1997;

## **Компьютерное моделирование комплексов ДНК с водорастворимыми поликатионами**

*Кондинская Д. А.*<sup>1</sup>, *Кострицкий А. Ю.*<sup>1</sup>, *Нестеренко А. М.*<sup>2</sup>, *Антипина А. Ю.*<sup>1</sup>, *Гуртовенко А. А.*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова

<sup>3</sup>ИВС РАН

Эл. почта: d.kondinskaia@gmail.com

Комплексация ДНК с поликатионами является на сегодняшний день одним из самых широко исследуемых явлений, так как подобные комплексы могут успешно применяться в генной терапии [1]. Довольно часто её изучают с помощью компьютерного моделирования, в частности, методом молекулярной динамики. Для изучения были выбраны четыре соединения — полиэтиленимин (PEI), полилизин (PLL), поливиниламин (PVA) и полиаллиламин (PAA). Все они содержат аминные группы, способные протонироваться. PVA и PAA являются относительно новыми полимерами, применяемыми для комплексации ДНК, тогда как комплексы PEI и PLL с ДНК используются в качестве референсных систем для оценки «качества» комплекса ДНК с новым полимером [2].

Целью данной работы является исследование взаимодействия с ДНК четырех поликатионов, определение предпочтительных мест связывания с полинуклеотидом для каждого полимера и изучение влияния полимеров на вторичную структуру ДНК.

Моделирование проводилось в кубической ячейке, где находилась молекула ДНК и молекула полимера, вода и соответствующее количество противоионов  $\text{Na}^+$  и

СГ. В качестве молекулы ДНК использовался додекамер Дрю-Дикерсона. Все полимеры состояли из 20 мономерных звеньев, степень протонирования соответствовала  $pH = 7$ . Для PEI – 50%, PLL – 100%, PVA – 50%, PAA – 20%. Моделирование проводилось в пакете Gromacs [3] с шагом 2 фс при температуре 300 К и давлении 1 бар. Использовался баростат Парринелло-Рамана и термостат v-rescale, модель воды – TIP3P, силовое поле — AMBER99. Для каждой системы проводилось несколько запусков моделирования для повторения наблюдаемых эффектов. Было проведено 5 моделирования с PEI различной протяженности – 1000, 800, 400, 400, 100 нс; 3 моделирования с PLL – 500, 200, 200 нс; 4 запуска для PVA – 800, 500, 200, 300 нс; и 4 запуска для системы с PAA – 700, 500, 100 и 200 нс. Для каждого нового запуска выбиралась равновесная конфигурация полимера и ДНК. Помимо этого, в каждой системе было различное относительное положение поликатиона и ДНК.

У каждой системы анализировались следующие характеристики: расстояние между центрами масс полимера и ДНК, среднеквадратичное отклонение структуры ДНК от первоначальной, радиальные функции распределения атомов ДНК, имеющих отрицательный парциальный заряд, относительно протонированных аминных групп полимера и оценивалось среднее время жизни контактов между определенными атомами.

Для всех систем с PEI образование комплекса происходило менее, чем за 5 нс, было выявлено, что вторичная структура ДНК не нарушается, на радиальных функциях распределения есть четкие пики и минимумы для фосфатных групп. Помимо этого, если PEI связался с серединой ДНК, то он способен образовать стабильный контакт с атомами в большой бороздке.

В системах с полилизинном образование комплекса происходит за 2 нс, нарушение вторичной структуры ДНК не наблюдается, связывание происходит между аминными и фосфатными группами полиэлектролитов. Возможны также контакты с атомами оснований в большой бороздке.

В системах с PAA формирование комплекса медленное – занимает около 10 нс. Отклонение от вторичной структуры колеблется в пределах нормы. Связывание происходит как по фосфатам, так и по атомам большой бороздки, однако стабильных контактов нет. Кроме того, большая часть полимера не взаимодействует с ДНК.

В системах с PVA формирование комплекса происходит за 5 нс. В трех из четырех систем нет нарушений вторичной структуры ДНК. В них первичное связывание происходит по фосфатам, затем полимер встраивается в большую бороздку и формирует в ней стабильные контакты с атомами оснований. В четвертой системе наблюдается связывание по фосфатам, причем образованные контакты очень стабильны. Связывание произошло таким образом, что в ДНК изогнулась, из-за чего наблюдается большее отклонение от начальной структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-03-01073 на суперкомпьютере «Ломоносов» МГУ и вычислительном кластере ИВС РАН.

#### Список литературы

1. H. Eliyahu, Y. Barenholz, A. J. Domb, *Polymers for DNA Delivery, Molecules*, 10, 34-64, 2005;
2. S.K. Samal, M. Dash, S. van Vlierberghe, D. L. Kaplan, E. Chiellini, C. van Blitterswijk, L. Moronid, P. Dubruel, *Cationic polymers and their therapeutic potential, Chem Soc Rev*, 41, 7147–7194, 2012;

3. B. Hess, C. Kutzner, D. van der Spoel, E. Lindahl, GROMACS 4: Algorithms for Highly Efficient, Load-Balanced, and Scalable Molecular Simulation, *J. Chem. Theory Comput.*, 4, 435–447, 2008;

## **Адсорбция катионных полимеров на поверхности бактериальных мембран. Компьютерное моделирование**

*Кострицкий А. Ю.<sup>1</sup>, Кондинская Д. А.<sup>1</sup>, Нестеренко А. М.<sup>2</sup>, Гуртовенко А. А.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова

<sup>3</sup>ИВС РАН

Эл. почта: a.kostrickii@gmail.com

Клеточная мембрана является одним из самых важных элементов клетки. Она обеспечивает ее целостность и представляет собой естественный барьер между внутренней частью клетки и ее окружением. Для разного рода биотехнологических и медицинских приложений представляют интерес объекты, способные взаимодействовать с биологическими мембранами и изменять их свойства. Катионные полимеры, которые являются многообещающими кандидатами для применения их в качестве антимикробных агентов, составляют один из классов таких объектов [1]. Положительный заряд таких полимеров обеспечивает избирательное взаимодействие с липидной частью именно бактериальных мембран, которые, в отличие от мембран клеток млекопитающих, богаты анионными фосфолипидами [2]. В данной работе была исследована адсорбция четырех различных типов поликатионов на поверхности липидной бактериальной мембраны путем компьютерного моделирования методом молекулярной динамики.

Симметричный липидный бислой, представляющий модель бактериальной мембраны, состоял из 128 молекул фосфолипидов, каждый монослой содержал 51 молекулу диолеилфосфатидилэтаноламина (DOPE) и 13 молекул диолеилфосфатидилглицерола (DOPG). Модели липидов были описаны в рамках силового поля Slipids [3]. Полимеры отличались как структурой, так и степенью протонирования. Каждый из них состоял из 20 мономеров, часть из которых была протонирована в соответствии с состоянием поликатиона при нейтральных pH. В работе были рассмотрены следующие катионные полимеры: поливиниламин (PVA), полиаллиламин (PAA), линейный полиэтиленимин (LPEI) и поли-L-лизин (PLL). Для построения их моделей использовалось силовое поле AMBER99 [4]. Таким образом, было промоделировано 5 систем: бислой в воде без полимеров и бислой в водном окружении в присутствии цепочки одного из поликатионов. Время моделирования зависело от скорости уравнивания системы и составляло от 0,5 до 1 микросекунды. Моделирование проводилось в NPT ансамбле при температуре 310 K и давлении 1 бар. Для расчета использовался пакет GROMACS 4.5.7 [5].

В результате работы было показано, что адсорбция всех полимеров на поверхность бислоя занимает не более 20 нс, но при этом стабильность связывания уменьшается с уменьшением заряда полимера. Из анализа радиальных функций распределения был сделан вывод о том, что основное взаимодействие протонированных аминогрупп полимеров происходит с фосфатными группами DOPG, несмотря на большую представленность в бислое фосфатных групп DOPE. Зависимость количества



контактов между заряженными аминокруппами полимеров и фосфатами DOPG от времени показала, что, несмотря на быструю адсорбцию, выход числа контактов на равновесное значение занимает значительно больше времени, порядка 100 нс. Также оказалось, что увеличение степени протонирования с 50% (PVA, LPEI) до 100% (PLL) не приводит к увеличению среднего числа контактов.

Далее с помощью профилей плотности компонент систем была продемонстрирована различная степень проникновения поликатионов во внутреннюю часть мембраны. Сильнее всего в гидрофобную часть бислоя внедрялся наименее заряженный PAA. В то же время PLL, обладающий наибольшей зарядовой плотностью, несмотря на наибольшую среди всех полимеров длину гидрофобной части боковых цепей, показал наименьшее проникновение внутрь бислоя. Помимо этого, было рассмотрено влияние адсорбции поликатионов на ориентацию молекул воды вблизи границы раздела бислоем — вода. Было показано, что степень переориентации молекул воды по сравнению с чистым бислоем напрямую зависит от степени протонирования полимера.

Также были построены двумерные радиальные функции распределения липидов относительно друг друга и относительно полимера. На основании полученных зависимостей был сделан вывод о том, что структура и линейная плотность заряда PVA позволяют ему наиболее эффективно собирать вокруг себя анионные фосфолипиды.

Работа была выполнена с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительного кластера ИВС РАН.

#### Список литературы

1. El-Refaie Kenawy, Worley S. D., Roy Broughton, The Chemistry and Applications of Antimicrobial Polymers: A State-of-the-Art Review, *Biomacromolecules*, 8(5), 1359-1384, 2007;
2. Michael R. Yeaman, Nannette Y. Yount, Mechanisms of Antimicrobial Peptide Action and Resistance, *Pharmacol. Rev.*, 55, 27–55, 2003;
3. Joakim P.M. Jambeck, Alexander P. Lyubartsev, Another Piece of the Membrane Puzzle: Extending Slipids Further, *J. Chem. Theory Comput.*, 9, 774–784, 2013;
4. Wang J., Cieplak P., Kollman P. A., How Well Does a Restrained Electrostatic Potential (RESP) Model Perform in Calculating Conformational Energies of Organic and Biological Molecules, *J. Comp. Chem.*, 21(12), 1049–1074, 2000;
5. Hess B., Kutzner C., van der Spoel D., Lindahl E., GROMACS 4: Algorithms for Highly Efficient, Load-Balanced, and Scalable Molecular Simulation., *J. Chem. Theory Comput.*, 4, 435–447, 2008;

## Исследование механических напряжений изолированных сегментов сосудов и воздухоносных путей животных

*Турзунова Н. Д.<sup>1</sup>, Алейник А. Н.<sup>1</sup>, Носарев А. В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ТПУ

<sup>2</sup>СибГМУ

Эл. почта: ousa@tpu.ru

В настоящее время активно исследуются фундаментальные механизмы регуляции сократительной активности гладких мышц сосудов и воздухоносных путей,

апробируются многочисленные субстанции на моделях экспериментальных животных с целью поиска новых лекарственных средств коррекции патологических состояний. Особая актуальность исследования сократительной активности гладких мышц связана с ростом числа заболеваний сосудов (гипертония, легочная гипертензия, атеросклероз) и воздухоносных путей (бронхиальная астма, ХОБЛ) [1-3]. Исследования сократительной активности гладких мышц в медико-биологическом эксперименте не мыслимы без применения высокоточных и доступных датчиков силы, способных уловить малые механические напряжения кусочков бронхов и сосудов малого диаметра и незначительной толщины. Современная индустрия располагает подобными устройствами, однако эти продукты дороги и сложны в обслуживании в рамках российской действительности. В связи с этим актуальной задачей представляется разработка отечественного программно-аппаратного комплекса для медико-биологического эксперимента.

В данной разработке было принято решение использовать дифференциальную емкость. Для точного измерения изменения емкости применялась микросхема AD7745, которая представляет собой преобразователь емкость-цифра с высоким разрешением. Измеряемая емкость присоединяется непосредственно ко входу микросхемы. В состав микросхемы входит 24-разрядный АЦП с линейностью 0.01%. Точность измерения  $\pm 4$  фемтофаряды [4].

Материал для исследования представлен кафедрой биофизики и функциональной диагностики СибГМУ. В работе использовались беспородные половозрелые крысы линии Wistar массой 180-240 грамм ( $n = 13$ ), а также морские свинки весом 380-420г ( $n = 13$ ).

Сначала было произведено исследование влияния L цистеина на механическое напряжение сегментов воздухоносных путей морской свинки, предсокращенных гиперкалиевым раствором Кребса.

Увеличение наружной концентрации хлорида калия ведет к деполяризации мембраны гладкомышечных клеток, открыванию потенциал-зависимых кальциевых каналов, увеличению содержания внутриклеточного кальция, что в последующем приводит к сокращению гладких мышц бронха. Действие 40 мМКл на сегменты приводило к развитию поддерживаемого сократительного ответа.

На фоне предсокращения, вызванного КСл, добавление 100 мкМ-100 мМ L-цистеина оказывало релаксирующее действие на всем диапазоне концентраций. В ответ на добавление 100 мкМ, 1000 мкМ, 10 мМ и 100 мМ L цистеина наблюдалось снижение механического напряжения сегментов с сохраненным эпителием до  $91,6 \pm 8,3\%$ ,  $85 \pm 10,3\%$ ,  $74,8 \pm 8,3\%$ ,  $56,9 \pm 4,8\%$  соответственно, и для деэпителизованных сегментов до —  $85,83 \pm 4,23\%$ ,  $69,43 \pm 6,24\%$ ,  $50,1 \pm 8,54\%$ ,  $34,86 \pm 7,49\%$  соответственно.

Далее произвели исследование влияние L цистеина на механическое напряжение сегментов трахеи крысы, предсокращенных гиперкалиевым раствором Кребса.

На фоне предсокращения, вызванного КСл, добавление 100 мкМ-100 мМ L-цистеина оказывало релаксирующее действие на всем диапазоне концентраций. Этому свидетельствует снижение механического напряжения предсокращенных деэпителизованных сегментов в ответ на добавление 100 мкМ, 1000 мкМ, 10 мМ и 100 мМ L цистеина до-  $102,8 \pm 1,8\%$ ,  $100,3 \pm 10,3\%$ ,  $78,4 \pm 12,4\%$ ,  $27,9 \pm 11,3\%$  соответственно, и до  $85,1 \pm 8,4\%$ ,  $67,3 \pm 10,8\%$ ,  $13,1 \pm 15,8\%$ ,  $-5,7 \pm 21,63\%$  — в случае сохранения эпителия.

Согласно полученным данным, донор сероводорода L цистеин в концентрациях 100 мкМ-100 мМ, оказывает релаксирующее действие на всем диапазоне концентра-

ций, как у крыс, так и у морских свинок вне зависимости от наличия или отсутствия эпителия.

#### Список литературы

1. Mulvany M, Halpern W, Contractile properties of small arterial resistance vessels in spontaneously hypertensive and normotensive rats, *Circulation Research*, 41(1), pp. 19-26, 1977;
2. Richard L, Twort H, Cameron I, Jeremy P, A comparison of contractile function in large and small pulmonary arterial vessels of the rat, *Quarterly Journal of Experimental Physiology*, 74, pp. 947-950, 1989;
3. Gainullina D, Tarasova O, Kiryukhina O, Shestopalov V, Panchin Y, Endothelial function is impaired in conduit arteries of pannexin1 knockout mice, *Biology Direct*, 9, pp. 2-5, 2014;
4. Extending the Capacitive Input Range of the AD7745/AD7746 Capacitance-to-Digital Converter 2012 Application Circuit Note CN-0129 — p. 4;

## **Анализ морфологии эритроцитов методом полихроматической интерференционной микроскопии тонких пленок**

*Дьяченко А. А.<sup>1</sup>, Малинова Л. И.<sup>2</sup>, Рябухо В. П.<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>СГУ им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского

<sup>3</sup>ИПТМУ РАН

Эл. почта: Anton-1047@yandex.ru

В настоящее время существуют данные, позволяющие сделать вывод об использовании такого параметра крови, как степень эритроцитарного анизацитоза (RDW), определяемого по ширине статистического распределения объема эритроцитов, в качестве нового прогностического маркера у пациентов, подлежащих первичной ангиопластике и для диагностики других сердечнососудистых патологий [1, 2].

Эритроциты в мазке крови на отражающей подложке представляют собой тонкие пленки. В случае освещения таких объектов полихроматическим излучением наблюдается появление цветовой интерференционной окраски, анализ которой позволяет сделать вывод о толщине исследуемого объекта [3, 4]. Основная цель представленной работы — разработка метода определения оптической толщины эритроцитов в мазке крови по цвету их интерференционной картины и определение степени эритроцитарного анизацитоза образца крови.

Метод определения оптической толщины эритроцитов можно разделить на следующие стадии:

- моделирование референтного цветного интерференционного изображения;
- регистрация интерференционного изображения эритроцитов в мазке крови и его обработка;
- определение оптической толщины эритроцитов.

Моделированное интерференционное изображение представляет собой шкалу интерференционного цвета тонкой пленки в зависимости от её оптической толщины. Данная шкала в дальнейшем выступает в качестве «линейки», с которой сравнивает-

ся значение цвета в выбранной точке исследуемого интерференционного изображения исследуемого объекта [5].

Для определения оптической толщины в выделенной точке интерференционного изображения исследуемого объекта определяется цвет пикселя цифрового изображения в этой точке, который сопоставляется с соответствующим цветом на моделированной цветовой шкале. Далее по известной зависимости интерференционного цвета от толщины рассчитывается оптическая толщина в выбранной точке эритроцита.

В рамках данной работы исследованы мазки цельной крови, полученной от пациентов с хронической сердечной недостаточностью (ХСН) (II стадия, 3 функциональный класс по NYHA). В ходе исследования рассмотрены три образца крови. Образец А представлял собой мазок крови пациентов с указанными выше заболеваниями до внутривенного болюсного введения 40%-ого раствора глюкозы. Образцы Б и В — образцы крови этих же пациентов через 10 и 60 минут после внутривенного болюсного введения 40%-ого раствора глюкозы, соответственно. Расчет оптических толщин эритроцитов проводился в их центральной части. Результаты этих измерений представлены в виде гистограмм распределения оптических толщин эритроцитов в мазке крови для каждого образца.

Для регистрации интерференционных изображений эритроцитов использовался оптический микроскоп Axio Imager 2 (Carl Zeiss, Германия) с микрообъективом Epiplan-Neofluar 100x/0.75 HD DIC и цифровая камера NIKON D80.

Полученные данные позволяют провести оценку степени эритроцитарного анизацитоза — параметра, для расчета которого используется соотношение:

$$RDW = \frac{\sigma_d}{\langle d \rangle} \times 100\% ,$$

где  $\langle d \rangle$  — среднее значение толщины эритроцитов в мазке крови;  $\sigma_d$  — стандартное отклонение толщины эритроцитов от среднего.

В ходе работы рассчитан данный показатель для каждого из рассматриваемых образцов. Значения показателя анизацитоза эритроцитов составили: 12%, 11% и 10% для образцов А, Б и В, соответственно.

Для проверки разработанного метода проводился расширенный анализ крови с использованием автоматических гематологических анализаторов ABS Micros и Datacell-16.

В процессе проведения внутривенного теста с острой гипергликемией установлено статистически достоверное изменение оптической толщины эритроцитов (через 0 — 10 — 60 минут). Рассчитанная внутригрупповая вариабельность определения степени анизацитоза эритроцитов с использованием разработанного метода измерения по цвету интерференционной картины и методов, реализованных в стандартных гематологических анализаторах, составила 0,2 для предложенного в работе метода и 0,5 для ABS Micros и 0,4 для Datacell-16.

#### Список литературы

1. Uyarel H., Red cell distribution width as a novel prognostic marker in patients undergoing primary angioplasty for acute myocardial infarction, *Coronary Artery Disease*, Vol. 22, №3, p. 138-144, 2011;
2. Malinova L., Akhmadullina L., Red blood cell distribution width and peripheral blood cells parameters in patients with heart failure and a reduced ejection fraction

- vs heart failure with «preserved» ejection fraction, European Journal of Heart Failure, Vol. 12, № 1, p. S269, 2013;
3. Борн М., Вольф Э., Основы оптики. Пер. с англ.-М.: Наука, 720 с., 1973;
  4. Lychagov V.V., Ryabukho V.P., Kalyanov A.L., Smirnov I.V., Polychromatic low-coherence interferometry of stratified structures with digital interferogram recording and processing, Journal of Optics, Vol. 14, №1, p. 015702, 2012;
  5. Kitagawa K., Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis, Applied Optics, Vol.52, № 10, p. 1998-2007, 2013.

## Изучение влияния нуклеотидного состава ДНК на динамику фазовых превращений

Дмитриев А. В.<sup>1,2</sup>, Вашченков В. Э.<sup>1,2</sup>, Захаров Г. А.<sup>3</sup>, Федосеев А. И.<sup>1</sup>,  
Савватеева-Попова Е. В.<sup>3</sup>, Лушников С. Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбГУ

<sup>3</sup>Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН

Эл. почта: art41090@gmail.com

В последнее десятилетие активно исследуются фазовые превращения ДНК, белков, и других биополимеров. Известно что, изменения в пространственной структуре связаны с изменениями колебательного спектра макромолекулы. Это хорошо видно на проведенных экспериментах по изучению динамики фазовых переходах в некоторых биополимерах, таких как ДНК и белки [1-3]. Так, с помощью метода мандельштам-бриллоэновского рассеяния света, было показано, что при изменениях пространственной организации макромолекулы при фазовых превращениях, поведения скорости и интенсивности гиперзвука испытывают аномалии, также, как и поведение релеевского рассеяния света. В настоящей работе, используя метод МБР света, анализировалось поведение скорости звука в ДНК с различными нуклеотидными составами. В качестве дополнительного метода, для определения степени связанности спирали ДНК, был использован метод плавления с высоким разрешением (HRMA).

В качестве объектов исследований были выбраны две последовательности ДНК выделенные из 1ого интрона гена *limk1* мух вида *Drosophila melanogaster* линии дикого типа *Berlin*, и также мутантной линии – *agnostic (agn<sup>ts3</sup>)*. Мутантная линия характеризуется резкими нарушениями обучения и памяти, что соответствует основным симптомам нейродегенеративных болезней. Секвенирование соответствующих ДНК показало, что *agn<sup>ts3</sup>* отличалась от *Berlin* наличием АТ богатой вставки в 28 п.н. В измерениях использовали раствор ДНК в натрий-фосфатном буфере (рН = 7,5), полученной посредством полимеразной цепной реакции. Эксперименты проводили с помощью трехпроходного, пьезосканируемого интерферометра Фабри-Перо в 180<sup>0</sup> геометрии рассеяния. Источником света служил аргоновый лазер с длиной волны  $\lambda = 488$  нм. Измерения проводили на растворах с концентрацией ДНК 500 мкг/мл, в диапазоне температур от 298 до 363 К. Методом HRMA с высокой точностью была определена степень связанности молекул ДНК при изменении температуры.

Были получены температурные зависимости сдвига, дублетов МБР света и интенсивностей компонент упругого рассеяния, причем их поведение различалось для

ДНК с различными нуклеотидными составами. Использование двух методов (HRMA и МБР) позволило сопоставить различия в структуре и динамике ДНК *agn<sup>ts3</sup>* и *Berlin* при изменении температуры. Результаты обсуждаются в рамках современных представлений о фазовых превращениях ДНК.

Список литературы

1. Сванидзе А.В., Романов В.П., Лушников С.Г., Аномальное поведение мандельштам-бриллюэновского рассеяния света при тепловой денатурации лизоцима, Письма в ЖЭТФ, 93(7), 453, 2011;
2. Lushnikov S.G., Dmitriev A.V., Fedoseev A.I. et.al., Low-frequency dynamics of DNA in Brillouin light scattering spectra, Pis'ma v ZhETF, 98(11), 830, 2013;
3. Vashchenkov V.E., Fedoseev A.I., Petukhov M.G., et.al., Study of low-frequency dynamics of short peptides by Brillouin light scattering and Monte-Carlo global energy minimization, Journal of Physics: Conference Series, 572, 012015, 2014;

## **Расширенная кинетическая модель процесса полимеразной цепной реакции в реальном времени**

*Федоров А. А.<sup>1</sup>, Сочивко Д. Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ИАП РАН

<sup>2</sup>ЗАО «Синтол»

Эл. почта: f\_aa@mail.ru

Полимеразная цепная реакция в реальном времени (ПЦР-РВ) является сегодня основным молекулярно-генетическим методом, используемым для качественного и количественного анализа специфических последовательностей нуклеиновых кислот (НК) во многих областях биомедицинских исследований: в лабораторной диагностике инфекций и медико-генетическом анализе, в криминалистике, в системе биологической безопасности и противодействия терроризму. Особенностью, выделяющей ПЦР-РВ на фоне прочих аналитических методов, является предельно высокая чувствительность и специфичность, позволяющая обнаруживать и анализировать в пробах даже единичные молекулы НК. Несмотря на то, что общие физико-химические основы метода хорошо известны, детальные модели процессов ПЦР, способные количественно характеризовать данный процесс, привлекают внимание исследователей и продолжают быть объектом разработки [1]. Это обусловлено тем, что ПЦР-РВ является многостадийной реакцией, в которой участвуют около десяти основных молекул, поэтому анализ ее кинетики представляет собой нетривиальную задачу.

В настоящее время основным подходом к моделированию процесса ПЦР-РВ является применение уравнений химической кинетики [1-3]. Нами разработана расширенная кинетическая модель процесса ПЦР-РВ, основанная на системе уравнений с учетом ферментативной кинетики. В представленной модели впервые учтена зависимость параметров реакции от температуры. Система учитывает присутствие в реакции фермента, гибридизацию комплементарных цепей НК, присутствие флуоресцентного зонда, с помощью которого осуществляется регистрация продуктов реакции, а также температурную зависимость гибридизации праймеров и зонда. Полученная система кинетических уравнений решалась и анализировалась методом численного моделирования с использованием языка C++. Подбор параметров системы

проведен на основе данных литературы, а также собственных экспериментальных результатов. В отличие от большинства существующих моделей процесса ПЦР-РВ, регистрация результатов реакции данной модели проводится опосредованно по количеству флуоресцентного зонда, использованного в реакции, а не молекул синтезированных НК. Данное обстоятельство позволяет получать более реалистичные кинетические кривые ПЦР-РВ и более адекватное описание этапа выхода реакции на насыщение, что подтверждено сопоставлением теоретических и экспериментальных данных.

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (соглашение №14607.21.0095 о предоставлении субсидии).

#### Список литературы

1. Marimuthu K., Jing C., Chakrabarti R. Sequence-Dependent Biophysical Modeling of DNA Amplification // *Biophys. J.*, 2014 v.107, pp.1731-1743;
2. Mehra, S., and W. S. Hu. A kinetic model of quantitative real time polymerase chain reaction // *Biotechnol. Bioeng.* 2005, v.91, pp.848–860;
3. Cobbs, G. Stepwise kinetic equilibrium models of quantitative polymerase chain reaction // *BMC Bioinformatics*, 2012, doi: 10.1186/1471-2105-13-203;

## Биливердин как хромофор ближне-инфракрасных биомаркеров

*Бубликов Г. С.*<sup>1</sup>, Степаненко Олеся В.<sup>1</sup>, Щербакова Д. М.<sup>2</sup>, Кузнецова И. М.<sup>1</sup>,  
Верхуша В. В.<sup>2</sup>, Туроверов К. К.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт Цитологии РАН

<sup>2</sup>Медицинский колледж им. Альберта Эйнштейна, Нью-Йорк

<sup>3</sup>СПбПУ

Эл. почта: gsb@incras.ru

Биливердин (BV) – естественный хромофор новых ближне-инфракрасных флуоресцентных маркеров, разработанных на основе бактериальных фитохромов (BphPs). BV является продуктом распада гема и поэтому всегда в достаточном количестве присутствует в клетках млекопитающих. BV, встроенный в BphPs, поглощает и флуоресцирует в так называемом ближне-инфракрасном «окне прозрачности» (650-900 нм), биологических тканей, где уже не поглощает гемоглобин эритроцитов и меланин и еще не поглощает вода. Это дает принципиальную возможность создания зондов для неинвазивной прижизненной визуализации тканей и целых органов животных [1-3].

Одной из актуальных проблем при создании ближне-инфракрасных биомаркеров является создание улучшенных ближне-инфракрасных флуоресцентных зондов — зондов с высоким квантовым выходом флуоресценции и различными спектрами поглощения и флуоресценции для одновременной визуализации нескольких целевых объектов в одном эксперименте. Изучение спектральных свойств BV и выяснение того, как влияет микроокружение BV на его спектральные свойства, может дать существенный вклад в решение этой задачи.

BV встраивается в хромофор-связывающую часть BphPs, которая состоит из так называемых PAS и GAF доменов. Домен PAS в BphPs содержит на N-концевом

участке консервативный остаток цистеина (Cys 15), который ковалентно связывает BV, в то время как сам хромофор встраивается в так называемый «карман» GAF домена. В то же время было показано, что ближне-инфракрасный флуоресцентный белок iRFP713, созданный на основе бактериального фитохрома *RpVrh2* из *R. palustris* может существовать в апо-форме (без BV), и что апо-форма также имеет нативную структуру и может связывать BV. Об этом свидетельствует восстановление характерных полос поглощения и флуоресценции белка в ближней инфракрасной области и появление спектра CD, характерного для нативного белка, при взаимодействии апо-формы с биливердином.

Было также установлено, что мутантная форма iRFP713, в которой Cys15 заменен на Ser, не способная связывать биливердин ковалентно, также приобретает характерные полосы поглощения и флуоресценции при взаимодействии с биливердином. Для этой мутантной формы с помощью равновесного микродиализа была определена константа связывания BV с белком. Сравнительное изучение денатурации ближне-инфракрасного флуоресцентного белка iRFP713, его апо-формы под действием гуанидингидрохлорида (GdnHCl) позволило сделать заключение о том, что хромофор значительно стабилизирует iRFP и делает денатурационный переход более кооперативным. Обсуждается также роль необычной структуры – узла, образованного аминокислотной последовательностью, которая связывает PAS и GAF домены [4], в стабилизации структуры белка и связывании BV [5].

Для выяснения причин более коротковолновых спектров поглощения и флуоресценции биомаркеров iRFP670 и iRFP682 по сравнению с iRFP713 были исследованы их физико-химические свойства. Известно, что iRFP670 и iRFP682 кроме консервативного цистеинового остатка Cys 15 в PAS домене, имеют остаток цистеина Cys 256 в GAF домене, который также способен химически связывать BV, встроенный в карман GAF домена [6].

В настоящей работе были исследованы спектральные свойства мутантных форм этих белков, содержащие цистеиновые остатки только в PAS домене (Cys 15), только в GAF домене (Cys 256), в PAS и GAF доменах одновременно, или не имеющих этих цистеиновых остатков вовсе.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-04-01842.

#### Список литературы

1. Piatkevich K.D., Subach F.V., Verkhusha V.V., Far-red light photoactivatable near-infrared fluorescent proteins engineered from a bacterial phytochrome, *Chem. Soc. Rev.*, 42, 3441-3452, 2013;
2. Filonov G.S., Piatkevich K.D., Ting L.M., Zhang J., Kim K., Verkhusha V.V., Bright and stable near-infrared fluorescent protein for in vivo imaging, *Nat. Biotechnol.*, 29, 757-761, 2011;
3. Shcherbakova D.M., Verkhusha V.V., Near-infrared fluorescent proteins for multicolor in vivo imaging, *Nat. Methods* 10, 751-754, 2013;
4. Wagner J.R., Zhang J., Brunzelle J.S., Vierstra R.D., Forest K.T., High resolution structure of Deinococcus bacteriophytochrome yields new insights into phytochrome architecture and evolution, *J. Biol. Chem.*, 282, 12298-12309, 2007;
5. Stepanenko O.V., Bublikov G.S., Stepanenko O.V., Shcherbakova D.M., Verkhusha V.V., Turoverov K.K., Kuznetsova I.M., A knot in the protein structure—probing the near-infrared fluorescent protein iRFP designed from a bacterial phytochrome *FEBS J.*, 281, 2284–2298, 2014;



6. Shcherbakova D.M., Baloban M., Verkhusha V.V., Near-infrared fluorescent proteins engineered from bacterial phytochromes, *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 27, 1-12, 2015;

## Взаимодействие катионных агентов с молекулами малых интерферирующих РНК и ДНК

Унксов И. Н.<sup>1</sup>, Слита А. В.<sup>2</sup>, Петрова А. В.<sup>2,3</sup>, Перевазко И. И.<sup>1</sup>, Бакулев В. М.<sup>1</sup>, Ролич В. И.<sup>1</sup>, Бондаренко А. Б.<sup>2</sup>, Касьяненко Н. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>НИИ гриппа Минздрава России

<sup>3</sup>СПбПУ

Эл. почта: vanjaunksov@mail.ru

Были изучены структуры, возникающие в растворе при взаимодействии высокомолекулярной ДНК и малых интерферирующих РНК (siРНК) с фоточувствительными катионными поверхностно-активными веществами (ПАВ). Такие структуры могут быть использованы для доставки нуклеиновых кислот в клетки. Проведено сравнение действия катионных ПАВ с другими агентами, способными связываться с молекулами нуклеиновых кислот.

Использовали атомную силовую микроскопию для прямого наблюдения наноструктур, формируемых в растворе Размеры структур, формирующиеся при различной (1 М – 0,003 М NaCl) ионной силе раствора и изменяемом значении зарядового соотношения  $z=C(\text{ПАВ})/C(\text{НК})$  были также получены методами вискозиметрии, седиментации, динамического светорассеяния. Для растворов высокомолекулярной ДНК измерена оптическая анизотропия статистического сегмента макромолекулы ПАВ методом динамического двойного лучепреломления (ДЛП), и проанализировано изменение персистентной длины молекулы ДНК.

Связывание катионного агента с siРНК и протяженной ДНК исследовали также с помощью флуоресцентной спектроскопии. При этом использовали краситель DAPI, связывающийся с ДНК. Рассмотрено изменение спектров флуоресценции комплексов краситель DAPI+ДНК и DAPI+siРНК при добавлении ПАВ. Показано, что существует конкуренция между ПАВ и DAPI за внешнее электростатическое связывание с молекулами нуклеиновых кислот. Выявлено влияние ПАВ на сильное связывание DAPI с нуклеиновыми кислотами (при частичной интеркаляции красителя). Взаимодействие нуклеиновых кислот с ПАВ приводит к переходу ПАВ в псевдомицеллярное состояние (молекулы нуклеиновых кислот провоцируют образование мицеллоподобных структур на цепочке полимера).

Нейтрализация заряда молекул siРНК и ДНК также показана с помощью гелевого электрофореза, при этом действие ПАВ мы сравнили с действием агентов липофектамина и хитозана, индуцирующих компактизацию ДНК в растворе.

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии ионной силы раствора, а также зарядового соотношения ПАВ и нуклеиновых кислот на комплексообразование. Для высокомолекулярной ДНК в случае малой ионной силы раствора наблюдается уменьшение оптической анизотропии при вызванном катионным агентом переходе макромолекулы в компактную форму. Показано различие между связыванием

ДНК+ПАВ и siРНК+ПАВ. Для растворов siРНК+ПАВ найдены условия формирования компактных структур, подходящих для доставки РНК в клетки.

## **Исследование условий воспроизводимой генерации и сортировки эмульсий «вода в масле» в микрофлюидном чипе для скрининга клеточных библиотек**

*Филатов Н. А.<sup>1</sup>*, Букатин А. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПб АУ НОЦ НТ

Эл. почта: nikita.filatov@inbox.ru

В 1954 году [1] было впервые предложено изучать отдельные клетки, изолированные в оболочке минерального масла. Однако только развитие микрофлюидных технологий позволило достичь стабильного и воспроизводимого формирования монодисперсных капель объемом 1 – 100 пл, пригодных для количественных исследований. Существует множество способов для формирования эмульсий, однако микрофлюидика позволяет генерировать стабильные эмульсии, контролируемых размеров. Кроме того, использование микрофлюидных технологий позволяет добиться высокой скорости формирования эмульсий (диапазон частот образования эмульсий от 0.1 до 10 кГц и выше), малого расхода реагентов, выполнения большого количества экспериментов. Генерируя эмульсии малых объемов, можно создать условия для изоляции отдельных клеток или молекул [2].

Исследования в области «капельной» микрофлюидики показывают ее огромный потенциал не только для создания приборов для химического и биохимического синтеза веществ [3], но и для высокопроизводительной молекулярной диагностики методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) [4], для скрининга лекарственных средств [5] и т.д.

Целью данной работы является изучение условий воспроизводимой генерации и сортировки эмульсий «вода в масле» в микрофлюидном чипе. Исследование возможности упаковки клеток в эти эмульсии и их сортировки в микрофлюидном чипе. Данные разработки направлены на создание платформы для скрининга клеточных библиотек (дрожжи). Существенное отличие от обычного микротитровального планшета, и преимущество данной системы заключается в том, что можно отсортировать, отобрать предельно малое количество вещества для последующего анализа.

В экспериментальных исследованиях применялись полидиметилсилоксан — стеклянные микрофлюидные чипы, полученные по методу «мягкой литографии» [6]. Формирование эмульсии осуществлялось следующим образом: дисперсная фаза (например, вода) подавалась через центральный канал, а непрерывная фаза (минеральное масло) — через два канала расположенных по обе стороны от него, тем самым сжимая или фокусируя поток дисперсной фазы. При конкретных гидродинамических условиях это приводит к образованию эмульсии [7]. Управляя отношением расходов дисперсной и непрерывной фаз, можно получать эмульсию с требуемыми характеристиками (например, размерами). Присутствие ПАВа в масле необходимо для того, чтобы образовавшаяся эмульсия не коалесцировала.

Измерения зависимости диаметра эмульсий воды в минеральном масле от отношения давления воды  $P_{\text{water}}$  к давлению масла  $P_{\text{oil}}$  при разной концентрации (3%, 4.3%, 5%) поверхностно-активного вещества (ПАВ) Abil EM180 в масле, показали,

что диаметр эмульсий не зависит от абсолютного давления воды и масла, а зависит только от их соотношения. Контролируемая генерация наблюдается при диапазоне значений  $P_{\text{water}}/P_{\text{oil}}$  от 0.55 до 0.95. Обнаружено, что размер капель эмульсий лежит в диапазоне значений от 5 мкм до 160 мкм. Количество ПАВа существенно влияет на размер капель эмульсии. Увеличение его концентрации до 5% приводит к увеличению диаметру капель примерно в 2 раза.

Измерения зависимости частоты генерации эмульсий от  $P_{\text{water}}/P_{\text{oil}}$  при разном содержании ПАВ в масле показали, что частота зависит от абсолютных значений давлений воды и масла. Эта зависимость имеет максимум при концентрации 3% и 4.3% ПАВа. Максимальное значение частоты генерации при 3% ПАВа есть 600 Гц, а при 4.3% ПАВа 230 Гц. При 5% ПАВа зависимость частоты генерации от  $P_{\text{water}}/P_{\text{oil}}$  эмульсии является монотонно убывающей функцией.

Для определения вероятности упаковки одиночных клеток в капли использовалась модельная клеточная линия хронического миелоидного лейкоза человека K562. Эксперименты показали, что вероятность упаковки клеток в капли описывается статистикой Пуассона. Кроме того, экспериментально была показана возможность направления капель эмульсии из одного микроканала в другой методом диэлектрофореза при напряженности 25 В/мкм, что может быть использовано для их сортировки по сигналу флуоресценции.

#### Список литературы

1. Lederberg J.A., Simple method for isolating individual microbes, *Journal of bacteriology*, V. 68. №. 2, P. 258, 1954;
2. Theberge A.B., Microdroplets in microfluidics: an evolving platform for discoveries in chemistry and biology, *Angewandte Chemie International Edition*, V. 49. №. 34, P. 5846-5868, 2010;
3. Lee C.C., A microfluidic oligonucleotide synthesizer, *Nucleic Acids Research*, V. 38. № 8, P. 2514-2521, 2010;
4. Leng X, Agarose droplet microfluidics for highly parallel and efficient single molecule emulsion PCR, *Lab on a Chip*, V. 10. №. 21, P. 2841-2843, 2010;
5. Sackmann E.K., The present and future role of microfluidics in biomedical research, *Nature*, V. 507, P. 181-189, 2014;
6. Xia Y., Whitesides G.M., *Soft Lithography*, *Annu. Rev. Mater. Sci*, 28,153–184, 1998;
7. Hsiung S.K., Chen C.T., Lee G.B., Micro-droplet formation utilizing microfluidic flow focusing and controllable moving-wall chopping techniques, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, V. 16. №. 11, P. 2403-2410, 2006;

## Разработка микроэлектродов для регистрации электрофизиологической активности нейрональных культур *in vitro*

Мальшев Е. И.<sup>1</sup>, Фризюк К.С.<sup>1</sup>, Пимашкин А. С.<sup>2</sup>, Гладков А. А.<sup>2,3</sup>,  
Букатин А. С.<sup>1</sup>, Вдовичев С. Н.<sup>4</sup>, Казанцев В. Б.<sup>2</sup>, Мухина И. В.<sup>2,3</sup>, Дубина М. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПб АУ НОЦ НТ

<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского

<sup>3</sup>НижГМА

<sup>4</sup>ИФМ РАН

Эл. почта: malishev@gmail.com

В современных фундаментальных исследованиях функционирования мозга наиболее актуальным методом становится многоканальная электрофизиология с помощью массивов (матриц) микроэлектродов. По сравнению с классическими методами регистрации электрофизиологической активности, такими как флуоресцентная микроскопия с использованием потенциал-зависимых красителей и пэтч-кламп, данный метод позволяет регистрировать и стимулировать внеклеточные биоэлектрические сигналы множества связанных нейронов одновременно. Использование массивов внеклеточных микроэлектродов является одним из важнейших инструментов для исследования процессов формирования и развития функциональных связей в нейронной сети и синаптической пластичности *in vitro*. Также метод позволяет стимулировать клетки электрическими импульсами, поданными на отдельные электроды (нейроны) и одновременно наблюдать сетевой отклик остальной нейронной сети, что необходимо для исследования кодирования информации в мозге, формирования памяти, обучения и поиска механизмов синхронизации клеток и т.д.

Однако, использование микроэлектродов не позволяет добиться пространственного разрешения, аналогичного флуоресцентной микроскопии, так как при уменьшении площади электрода его импеданс возрастает, а соотношение сигнал/шум у регистрируемого сигнала, соответственно, падает.

Одним из методов повышения чувствительности электродов является применение покрытий, выполняющих роль затвора транзистора. Однако технология микроэлектродов на основе КМОП транзисторов на сегодняшний день мало используется в научной практике в виду высокой сложности эксплуатации и высокой чувствительности.

Другим способом уменьшения импеданса является применение специальных материалов, обладающих пористой структурой для увеличения площади поверхности или меньшим удельным импедансом двойного электрического слоя. Так, например, электроды из черненой платины обладают пористой структурой и поэтому характеризуются высокой удельной площадью поверхности, однако, они обладают низкой механической устойчивостью. Этому недостатка лишены покрытия из нитрида титана. Нитрид титана зарекомендовал себя как наиболее оптимальный материал для длительных исследований и часто применяется для создания *in vivo* имплантов из микроэлектродов. Другим перспективным покрытием является PEDOT, обладающий, помимо низкого импеданса, оптической прозрачностью, что позволяет наблюдать за клетками в зоне регистрации и тем самым очень перспективен для трехмерных конструкций микроэлектродов.

В данной работе представлено исследование характеристик электродов (состава, формы и импеданса) и методов модификации их поверхности для оптимальной регистрации электрофизиологической активности в сети нейронов.

В работе были изготовлены и исследованы массивы из 60 микроэлектродов диаметром 30 и 10 мкм, расположенные на расстоянии 200 мкм друг от друга. Микроэлектроды состояли из наиболее популярны материалов, часто используемых в коммерческих системах (ITO, Au, Pt, TiN) и перспективного материала PEDOT. Для сравнения характеристик электродов были проведены импедансометрические измерения в диапазоне 100 Гц — 10 кГц, а также, зарегистрированы сигналы спонтанной и вызванной биоэлектрической активности в культурах нейрональных эмбриональных клеток гиппокампа мышей (E18). Шероховатость поверхности была оценена с помощью сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить минимальный диаметр электрода для каждого из изученных материалов, позволяющий оптимально регистрировать электрическую импульсную активность нейрональных клеток. Одним из путей дальнейшего уменьшения диаметра электродов является совмещение преимуществ сильнопористых материалов, таких как черная платина и TiN с преимуществами материалов, обладающих низким удельным импедансом, такими как PEDOT.

## **Исследование характеристик электретных микрофонов для разработки конструкции датчика внутричерепного давления**

*Сумовский А. С.<sup>1</sup>, Андреева А. В.<sup>1</sup>, Лютецкий Н. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИТМО

Эл. почта: aerbium@gmail.com

История изучения синдрома внутричерепной гипертензии (ВЧГ) насчитывает более 200 лет. Синдром ВЧГ является одной из основных проблем в клинической неврологии и нейрохирургии. Основные патологические состояния, такие как внутричерепные объемные процессы, черепномозговая травма, субарахноидальные кровоизлияния, инфекционные менингиты, гид роцефалия, очень часто сопровождаются клиникой синдрома ВЧГ вплоть до необратимых нарушений функций центральной нервной системы. Подъем внутричерепного давления (ВЧД) приводит к снижению церебральной перфузии, затруднению венозного дренирования и нарастанию дислокационных явлений с расстройством витальных функций. ВЧГ является фактором неблагоприятного исхода при травматическом повреждении головного мозга. Прогностическое значение имеет не только выраженность, но и длительность гипертензии. Поскольку уровень и длительность ВЧГ влияет на исход патологического процесса в головном мозге, его контроль и своевременное проведение мероприятий, направленных на нормализацию, приобретают важнейшее значение. Золотым стандартом для оценки и измерения ВЧД считается применение инвазивных методов. Различные типы сенсоров (эпидуральные, интрапаренхиматозные, желудочковые) используются для мониторинга ВЧД. Однако данные методы ассоциируются с риском кровотечений, инфекции и повреждением вещества мозга. Кроме того, инвазивная оценка ВЧД возможна только в условиях стационара. Все это накладывает

определенные ограничения на их широкое использование в практике, поэтому поиск эффективных неинвазивных методов объективной диагностики внутричерепной гипертензии на сегодняшний день остается одной из сложнейших проблем неврологии и нейрохирургии. Проводятся попытки оценки ВЧД с помощью транскраниальной доплерографии, офтальмомодинамометрии, папиллометрии, оценки ликвородинамики с помощью магнитно-резонансной томографии и других. В данной работе будет исследован другой довольно перспективный метод измерения ВЧД – отоакустический. Основанием для использования этого метода, явилась тесная связь периферического отдела слухового и вестибулярного анализатора с внутричерепными структурами. В соответствии с целевым назначением разрабатываемый электретный микрофон, который ляжет в основу датчика, должен обеспечивать высокую чувствительность в частотном диапазоне 20—2000 Гц, малые габариты и вес, малую потребляемую мощность. При создании конструкции корпуса микрофона пришлось решать инженерную задачу по созданию помехозащищенного датчика. Основные пути передачи помех к чувствительному элементу следующие: передача звука (переизлучение) непосредственно через стенку корпуса во внутреннюю полость датчика к чувствительному элементу; улавливание акустических помех поверхностью кабеля датчика с последующей передачей поверхностными волнами во внутреннюю полость датчика; улавливание звука поверхностью тела больного с последующим переизлучением. Разработанный датчик обладает следующими характеристиками: рабочая полоса частот 20—2000 Гц; чувствительность на частоте 1000 Гц не хуже  $10 \text{ мВ} \cdot \text{Па}^{-1}$ ; мощность потребления согласующим каскадом 5 мВт.

#### Список литературы

1. Ильков А.В. Конструктивно-технологический базис микроэлектромеханических систем для диафрагменных электроакустических преобразователей [Текст] // Москва. – 2007;
2. Черный В.И. и др. Новые направления коррекции повышенного внутричерепного давления у пациентов с острой церебральной недостаточностью [Текст] // Мед неотл. сост. – 2008. – Т. 3. – С. 58-61;
3. Телешова Е.Г., Семенова Ж.Б., Капитанов Д.Н. Возможности использования позиционной тимпанометрии в оценке внутричерепного давления у детей с заболеванием ЦНС по данным литературы [Текст] // НЕЙРОХИРУРГИЯ И НЕВРОЛОГИЯ. – 2014. – С. 19;

## **Экспериментальное и теоретическое исследование конформационных изменений, вызванных действием терагерцового излучения, в пролин-содержащих фрагментах глобулярных белков**

Немова Е. Ф.<sup>1</sup>, Кобзева Т. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЛФ СО РАН

<sup>2</sup>ИХКиГ СО РАН

Эл. почта: endy@ngs.ru

Известно, что действие терагерцового излучения на биомолекулы может индуцировать конформационные изменения, но детальные механизмы влияния излучения

этого диапазона на лабильные равновесия между различными конформациями пространственно организованных биологических макромолекул, в частности глобулярных белков, пока не изучены. Ценную информацию о таких структурных изменениях может дать ЭПР-исследование динамических свойств системы глобулярный белок – спиновый зонд, так как анизотропное сверхтонкое расщепление и  $g$ -фактор чувствительны к молекулярному движению. Ранее нами было показано с использованием метода спинового зонда, что под действием терагерцового излучения происходит изменение конформации молекул бычьего сывороточного альбумина таким образом, что самые заметные структурные изменения претерпевает пролин-содержащий фрагмент.

С использованием новых перспективных соединений – динитронов (производных дигидропиразин-1,4-диоксида) в качестве предшественников спинового зонда, образующих детектируемые парамагнитные соединения, получена детальная информация об изменении структуры участка, содержащего пролиновый фрагмент.

Кроме того, для регистрации конформационных изменений была исследована адсорбция молекулярного кислорода ( $O_2$ ) и оксида азота (NO) на функциональных группах молекулы альбумина. Было показано, что изменения конформации под действием терагерцового излучения приводят к изменению доступности соответствующих центров. Эти изменения были зафиксированы: для кислорода – по изменению взаимодействия со спиновым зондом, для NO – непосредственно, по изменениям времен жизни и других параметров спектров ЭПР стабильных комплексов, образуемых NO с альбумином.

Для интерпретации полученных данных был проведен квантовохимический расчет с рассмотрением коллективных колебательно-вращательных мод для пролин-содержащих участков молекулы альбумина. Были получены собственные частоты колебаний в диапазоне 0,1-2,5 ТГц.

Таким образом, было получено, что облучение альбумина 60 мин импульсным ТГц источником в диапазоне 0,1-2,5 ТГц приводит к нарушению третичной структуры, и показаны места наиболее подверженные изменениям. Это оказалась регулярная структура белка с пролин-содержащим аминокислотным остатком.

## **Моделирование начальных этапов кристаллизации белка при встречной диффузии в капиллярах**

*Соколовский А. С.<sup>1</sup>, Елисеев И. Е.<sup>2</sup>, Юденко А. Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>СПБАУ НОЦ НТ

Эл. почта: andrewsocol@mail.ru

Решение многих биомедицинских задач требует детальной информации о химическом строении биологических молекул. Самый прогрессивный на сегодняшний день метод «рационального дизайна» для поиска новых лекарственных средств невозможно проводить без знания точной пространственной структуры белка и его комплексов с уже существующими ингибиторами. Основным способом получения структурной информации о макромолекулах является выращивание кристаллов и их последующее исследование методом рентгеноструктурного анализа. Для того чтобы изучать структуру белка данным методом, необходимо вырастить кристаллы белка,

что в подавляющем большинстве случаев является лимитирующим этапом, так как от качества кристалла напрямую будет зависеть разрешение полученной структуры.

Самым простым методом является метод выпаривания. Численная модель для происходящих в этом методе процессов была построена в работе [1]. Однако, в данном методе есть один недостаток, для различных начальных условий требуются различные эксперименты. Этот недостаток исключен в кристаллизации методом встречной диффузии. При этом капилляр заполняется раствором белка и помещается в раствор осадителя, после чего начинается диффузия белка из капилляра, осадителя в капилляр. Т.о. получается градиент концентраций вдоль длины капилляра, что соответствует различным начальным условиям для кристаллизации, и один подобный эксперимент оказывается эквивалентен множеству экспериментов методом выпаривания.

На сегодняшний день, не существует модели, удовлетворительно описывающей процесс нуклеации и роста кристаллов в капилляре, при использовании метода контр-диффузии, и данная работа посвящена разработке и апробации подобной модели. Для этого на начальном этапе численно были решены уравнения диффузии для осадителя и модельного белка лизоцима. Это позволило построить функции пересыщения, а, следовательно, и функции скоростей нуклеации и роста. Результаты решения уравнения диффузии белка хорошо согласуются с ранее опубликованными работами [2, 3]

Для проверки полученных в ходе моделирования результатов была проведена серия экспериментов с белком лизоцимом по кристаллизации в капиллярах методом встречной диффузии. Все параметры эксперимента (температура, pH, молярность буферного раствора и т.д.) были идентичны используемым при моделировании. Данные о растворимости белка лизоцима были взяты из работы [4].

Построенная численная модель с хорошей точностью описывает начальную стадию кристаллизации. Модель точно предсказывает время и координаты появления первых кристаллов белка, что подтверждается экспериментом. Построенная численная модель может быть использована для подбора оптимальных условий кристаллизации других белков в отличных по ионному составу буферах.

#### Список литературы

1. Sameer T., Paul J.A. Kenis and Charles F. Zukoski, A Kinetic Model To Simulate Protein Crystal Growth in an Evaporation-Based Crystallization Platform, *Langmuir*, 23, 4516-4522, 2007;
2. Tanaka H., Inaka K., Sugiyama S., Takahashi S., Sano S., Sato M. & Yoshitomi S., Optimization of salt concentration in PEG-based crystallization solutions, *Journal of Synchrotron Radiation*, 18, 84–87, 2010;
3. Garcia-Ruiz J.M., Counterdiffusion Methods for Macromolecular Crystallization, *Methods In Enzymology*, 368, 130-154, 2003;
4. Otalora F., Garcia-Ruiz J.M., Crystal growth studies in microgravity with the APCFI. Computer simulation of transport dynamics, *Journal of Crystal Growth*, 182, 141-154, 1997;



## Численное моделирование гидрирования циркониевого сплава

Родченкова Н. И.<sup>1</sup>, Заика Ю. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИПМИ

Эл. почта: nirodchenkova@krc.karelia.ru

Одним из важных требований к изделиям из циркониевых сплавов активной зоны реакторов является низкое поглощение водорода, поскольку водородное охрупчивание может стать одной из причин разрушения циркониевой оболочки. В зависимости от уровня содержания водорода и температуры эксплуатации водород может находиться в циркониевых сплавах в виде твердого раствора или в виде гидридов. Наибольший охрупчивающий эффект оказывают гидриды, так как они могут служить участками образования и развития трещин. Кратко об условиях эксперимента: пластина шлифуется с одной стороны, другая сторона водородонепроницаема; температура образца  $T$  и давление газообразного водорода  $p$  поддерживаются постоянными. Перейдем к модели гидрирования.

Обозначим:  $L$  — толщина пластины;  $\ell_0$  — толщина слоя, в который водород абсорбируется относительно легко и еще не ощущается диффузионное сопротивление (будущая начальная корка гидрида);  $u(t)$  — концентрация  $H$  в  $\ell_0$ -слое ( $1_n / \text{cm}^3$ );  $Q$  — концентрация, по достижении которой решетка перестраивается и раствор преобразуется в гидрид;  $c(t, x)$  — концентрация  $H$  в  $(L - \ell_0)$ -слое;  $\mu$  — газокинетическая константа.

Для диффузионного слоя толщины  $L - \ell_0$  пишем стандартную краевую задачу:  $\partial_x c = D \partial_x^2 c$ ,  $c(0, x) = 0$ ,  $c(t, \ell_0) = u(t)$ ,  $\partial_x c(t, L) = 0$ . Динамику  $u(t)$  моделируем, исходя из баланса потоков:  $\dot{u}(t) \ell_0 = 2\mu sp - bu^2(t) + D \partial_x c(t, \ell_0)$ ,  $u(0) = 0$ .

где  $s$ ,  $b$  — эффективные коэффициенты абсорбции и рекомбинации (подсчет ведем в атомах  $H$ ). По достижении  $u(t)$  порогового уровня  $Q = Q(T)$  происходит образование гидрида. Начнем новый отсчет времени ( $t = 0$ ) и моделируем рост гидридной фазы. К этому времени  $c(0, x) = \varphi(x)$  (распределение с предыдущего этапа),  $\varphi(\ell_0) = Q$ ,  $\ell_0$ -слой уже гидридный и сквозь него диффундирует растворенный  $H$ . Обозначим концентрацию  $H$  в гидриде через  $v(t, x)$ . Общая концентрация равна  $Q + v(t, x)$ .

В пластине с растущей коркой гидрида ( $x = \ell(t)$  — граница раздела фаз,  $\ell(0) = \ell_0$ ) запишем диффузионные уравнения:

$$\partial_x v = D \partial_x^2 v(x, \ell(t)), v(0, x) = 0, \partial_x c = D \partial_x^2 c(x, \ell(t)), c(0, x) = \varphi(x).$$

Граничные условия:

$$2\mu s_p - b v^2(t, 0) = -D \partial_x v(t, 0), \quad \partial_x c(t, L) = 0.$$

На свободной границе раздела фаз  $v(t, \ell(t)) = 0$  (в сторону  $x = L$  движется фронт концентрации гидридообразования  $Q$  и выполняется условие Стефана  $[Q - c(t, \ell(t))] \dot{\ell}(t) = -D \partial_x v(0, \ell) + D \partial_x c(0, \ell)$ ).

Задача: оценить параметры модели для сплава Э110 (Zr-1Nb) и определить динамику профилей концентрации  $H$  в гидриде и растворе. На основе неявных разностных схем разработан итерационный вычислительный алгоритм решения нелинейной краевой задачи со свободной границей раздела фаз. В докладе представлены результаты численного моделирования.

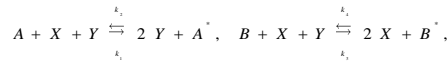
## Noise-induced phase transition in an autocatalytic chemical system

Фам М. Т.<sup>1</sup>, Вирченко Юрий Петрович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белгородский национальный исследовательский университет

Эл. почта: physicsidea@gmail.com

Noise-induced transition phenomena have become a subject of widespread interest in recent decades, because of their observations in a large variety of non-linear systems in physics, chemistry, biology. In this paper, we attempt to describe the phase transition in the so-called genetic model of autocatalytic chemical reactions presented by the following scheme [1]:



where the system consists of reactants X, Y and substances A, B, A', B' play the role of environment. The reaction rates are  $k_i, i = 1, 2, 3, 4$ .

According to chemical kinetics, the molecular numbers of the reactants,  $N_i(X)$  and  $N_i(Y)$ , obey the equations

$$\begin{aligned} \dot{N}_i(X) &= k_2 N_i^2(Y) N_i(A') - k_1 N_i(X) N_i(Y) N_i(A) - k_4 N_i^2(X) N_i(B') + k_3 N_i(X) N_i(Y) N_i(B) \\ \dot{N}_i(Y) &= k_1 N_i(X) N_i(Y) N_i(A) - k_2 N_i^2(Y) N_i(A') + k_4 N_i^2(X) N_i(B') - k_3 N_i(X) N_i(Y) N_i(B). \end{aligned}$$

Thus, in deterministic case, the time evolution of a reactant's concentration  $x(t)$  is described by the following kinetic equation

$$\dot{x}(t) = \alpha - x(t) + \lambda x(t)(1 - x(t)), \quad x(t) \in [0, 1],$$

with parameters  $\lambda \in \mathbb{R}, \alpha \in [0, 1]$  coupling to the environment:

$$\alpha = \frac{k_2 N(A')}{k_2 N(A') + k_4 N(B')}, \quad \lambda = \frac{k_3 N(B) + k_4 N(B') - k_1 N(A) - k_2 N(A')}{k_2 N(A') + k_4 N(B')}.$$

Suppose now that the system is subjected to a rapidly fluctuating environment in such a way that the parameter  $\lambda$  becomes a random variable and can be modelled as a stochastic process  $\tilde{\lambda}_t$ , using the Gaussian process «white noise»  $\xi_t$  of variance  $\sigma^2$  and zero mean:

$$\tilde{\lambda}_t = \lambda + \sigma \xi_t,$$

The corresponding equation governing behaviour of the system in this case is written:  $d\tilde{x}_i = [\alpha - \tilde{x}_i + \lambda \tilde{x}_i(1 - \tilde{x}_i)]dt + \sigma \tilde{x}_i(1 - \tilde{x}_i)d\tilde{w}_i$ , where the stochastic differential  $d\tilde{w}_i = \xi_i dt$  is understood in the Stratonovich sense.

In thermodynamic stationary states, the Markovian diffusion process  $\tilde{x}_i$  has the final probability density function  $p(x)$ , which obeys the Fokker-Plank equation:

$$\frac{d}{dx} [(\alpha - x + \lambda x(1 - x))p(x)] - \frac{\sigma^2}{2} \frac{d^2}{dx^2} [x^2(1 - x)^2 p(x)] = 0, \text{ and reads}$$

$$p(x) = \frac{C}{x(1 - x)} \left( \frac{x}{1 - x} \right)^\beta \exp \left\{ \frac{2}{\sigma^2} \left( \frac{\alpha - 1}{1 - x} - \frac{\alpha}{x} \right) \right\}, \quad \beta = \frac{2(2\alpha + \lambda - 1)}{\sigma^2},$$

with the normalization constant  $C$  given by

$$C = \frac{1}{2} \exp \left\{ \frac{2}{\sigma^2} + \beta \ln \sqrt{\frac{1 - \alpha}{\alpha}} \right\} \left[ K_{-\beta} \left( \frac{4}{\sigma^2} \sqrt{\alpha(1 - \alpha)} \right) \right]^{-1}.$$

Here  $K_{-\beta}(\cdot)$  is the modified Bessel function of the second kind with index  $-\beta$ .

This density function may be unimodal or bimodal, depending on the values of parameters  $\lambda, \sigma^2, \alpha$ . These dynamical regimes are divided by the so-called *critical surface* in the phase space of model's parameters  $\langle \lambda, \sigma^2, \alpha \rangle$ . We obtained for this surface [2] the following equation

$$\lambda^4 + \lambda^2(1 - 5\sigma^2 - \sigma^4/2) - \lambda\epsilon(9\sigma^4 + 18\sigma^2 - 4\lambda^2) - 4\sigma^2(1 - \sigma^2/4)^3 = 27\sigma^4\epsilon^2$$

and the inequality

$$G_+(\lambda, \sigma^2, \epsilon)G_-(\lambda, \sigma^2, \epsilon) \geq 0, \quad \epsilon = \alpha - 1/2,$$

$$G_+(\lambda, \sigma^2, \epsilon) = (2\sigma^2 + 1 \pm 2\lambda)^2 - (\sigma^2 + 2(4 \mp 9\epsilon))^2 + 4(4 \mp 9\epsilon)^2 - 1.$$

The phase transition in system dynamics occurs only when the intensity of the external noise  $\sigma^2$  passes a certain threshold value  $\sigma_c^2$  which is defined from

$$4(\sigma_c^2 - 1)^3 = 27\alpha(1 - \alpha)\sigma_c^2.$$

At this time the corresponding critical values of parameter  $\lambda$  reads

$$\lambda_c = -(9\epsilon\sigma_c^2) / (1 + 2\sigma_c^2).$$

Finally, the analytical solution of *critical surface* equation — its cross sections by planes  $\alpha = \text{const}$  is

$$\sigma^2 = \sigma_c^2 + \frac{(S^2(z) + 3R^2(z))^{1/2} - S(z)}{12(z^2 - 1/4)^2},$$

where  $z = (\lambda - \lambda_c) / (\sigma^2 - \sigma_c^2)$ ,  $R(z) = (4z^2 - 1)(1 - \sigma_c^{-2})(3z\sigma_c^2 - \lambda_c)$ ,

$$S(z) = \frac{8\lambda_c}{3\sigma_c^2}(7\sigma_c^2 - 1)z^3 - 6(\sigma_c^2 + 5)z^2 + \frac{6\lambda_c}{\sigma_c^2}(1 + \sigma_c^2)z + \frac{3}{2}(\sigma_c^2 - 3).$$

In summary, we presented a technique for the full investigation of the noise-induced phase transition in binary autocatalytic reactions. Furthermore, although we exemplified the technique with chemical systems, a similar behaviour can be observed in analog simulators [3]. This allows us to apply the technique to these systems. Extensions to population genetics in biology [1] also seem possible.

Список литературы

1. Horsthemke W., Lefever R., Noise-induced transitions: Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology, Berlin: Springer, P. 128-139, 2006;
2. Pham Minh Tuan, Virchenko Yu.P., Analysis of chemical kinetics stochastic model of binary autocatalytic reaction, Belgorod State University Bulletin: Mathematics & Physics — 31, P. 130-146, 2014;
3. Smythe J., Moss F., McClintock P.V.E., Observation of noise-induced phase transition with an analog simulator, Phys. Rev. Lett. vol 51; N 12, P.1062-1065, 1983;

## **Динамика нагрева твердого тела под действием электронного пучка**

*Машков К. В.<sup>1</sup>, Заморянская М. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: kvmashkov@gmail.com

Нагрев твердого тела при облучении электронным пучком является важным эффектом, так как при низкой теплопроводности тела (малых значениях коэффициента теплопроводности), может составлять сотни градусов. Учитывать это необходимо, например, при исследовании катодолуминесцентных свойств твердого тела, т.к. температура образца влияет на интенсивность люминесценции, приводит к спектральному сдвигу полос люминесценции и изменению времен затухания и разгорания излучательных полос. Нагрев происходит в результате взаимодействия электронов пучка с атомами твердого тела. При этом налетающий электрон передает часть энергии твердому телу. Часть данной энергии расходуется в полупроводниках (ПП) и диэлектриках для возбуждения оптических переходов с излучением квантов света, а также на фоновое возбуждение (возбуждение колебаний решетки) — нагрев образца. Измерение температуры в области взаимодействия электронного пучка с образцом невозможно из-за малых ее размеров. Оценка температуры нагрева образца в результате его облучения электронным пучком проводилась ранее, однако динамика нагрева этой локальной области ранее не изучалась.

В данной работе продемонстрирован расчет нагрева образца электронным пучком с определением области нагрева, и получения временных зависимостей изменения температуры в такой области и определения времени достижения максимальной температуры нагрева. Для расчета взаимодействия электронного пучка с образцом применялся метод определения плотности потерянной энергии на один электрон по методу Монте-Карло в модели однократного рассеяния и строилось распределение плотности потерянной энергии в образце. Из полученных данных моделировался нагрев образца для определения пространственного распределения температуры и временных зависимостей изменения температуры. Моделирование заключалось в решении стационарной и нестационарной задачи теплопроводности аналитическим и численными методами. Сравнение полученных решений для стационарного подхода показало хорошее совпадение. Численно было получено нестационарное решение и построены зависимости нагрева образца от времени.

## Список литературы

1. J.I. Goldstein, D. E. Newbury, Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis, Third Edition, Kluwer academic/plenum publishers, New York 10013-1578;

## Многочастичные эффекты в оптическом поглощении $\text{LiN}_3$

Филиппов С. И.<sup>1</sup>, Гордиенко А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КемГУ

Эл. почта: filippov\_sem@kemsu.ru

Азид лития  $\text{LiN}_3$  является наиболее простым среди модельных объектов для исследования процессов быстрого разложения, механизмы которых предполагают важную роль электрон-дырочного взаимодействия. Основой описания этих эффектов является уравнение Бете-Солпитера (BSE) и в настоящей работе оно используется для изучения электронных и оптических свойств  $\text{LiN}_3$ .

Как показано в [1, 2], для решения задачи расчета спектра  $\varepsilon_2$  может быть эффективно использован рекурсивный метод полиномиальных моментов (КРМ, [3]), при этом не требуется вычисление полного набора собственных значений двухчастичного гамильтониана  $\mathbf{n}^{2p}$ , а формула для мнимой части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2(\bar{\omega})$  записывается в виде:

$$\varepsilon_2(\bar{\omega}) \approx \frac{1}{\pi \sqrt{1 - \bar{\omega}^2}} \left[ g_0 + 2 \sum_{n=1}^{M_{\text{max}}} g_n \mu_n T_n(\bar{\omega}) \right],$$

где  $\bar{\omega}$  — энергия,  $T_n(x)$  — полиномы Чебышева первого рода, а  $\mu_n$  — полиномиальные моменты, вычисляемые как

$$\mu_n = \langle P | T_n(\bar{\mathbf{H}}^{2p}) | P \rangle, \quad \langle c\nu\mathbf{k} | P \rangle = \frac{\langle \nu\mathbf{k} | \mathbf{e} \cdot \mathbf{p} | c\mathbf{k} \rangle}{E_{c\mathbf{k}} - E_{\nu\mathbf{k}}}.$$

Данный метод был успешно применен к расчету оптических спектров и карт электронной плотности в различных соединениях, в том числе в бинарных и тройных фторидах [1, 2, 4].

С целью исследования эффекта электрон-дырочного взаимодействия спектры мнимой части диэлектрической проницаемости для различных поляризаций были вычислены в двух вариантах: в приближении невзаимодействующих электронов и дырок (IPA) и с учетом многочастичных эффектов (BSE).

Выполненные расчеты показали, что для кристалла  $\text{LiN}_3$ , также, как и для других известных одновалентных азидов, характерна выраженная оптическая анизотропия [5]. Учет экситонного возбуждения приводит к заметному красному смещению спектра и перестройке его структуры для обеих поляризаций, при этом наибольший эффект, как и для других ионных кристаллов [1, 2, 6], заключается в изменении структуры края поглощения. Поэтому для дальнейшего исследования взаимодействия кристалла  $\text{LiN}_3$  с оптическим излучением был выбран уровень энергии  $E = 7,7$  эВ вблизи края оптического поглощения, соответствующий скорректированному расчетному значению ширины запрещенной зоны  $E_g$  [7].

Рассчитанное распределение квадрата модуля двухчастичной функции  $\Psi(r_1, r_2)$  для данного уровня при положении дырки на центральном атоме азота показало, что основная часть электронной плотности находится в пределах центральной ячейки, но, в отличие от полной валентной плотности, здесь наблюдается перераспределение заряда, связывающее концевые атомы азота центрального и соседнего азид-анионов. Исходя из полученного распределения можно, таким образом, предположить, что механизм инициирования реакции разложения за счет поглощения света, содержит стадию «объединения» трех ближайших анионов с их последующим распадом на три молекулы  $N_2$  и свободный атом азота, который может участвовать в последующих стадиях.

Таким образом, в настоящей работе впервые получены данные о структуре оптических спектров  $LiN_3$  и изменениях в электронном строении, обусловленных поглощенным излучением и эффектом электрон-дырочного взаимодействия. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о справедливости предположений [5], относящихся к роли экситонов в реакциях разложения азидов щелочных металлов, а также предложить альтернативный вариант механизма инициирования реакции для этого типа энергетических материалов.

#### Список литературы

1. Gordienko A.B., Filippov S.I., Kernel polynomial method as an efficient  $O(N_2)$  scheme for optical spectra calculations including electron-hole interaction, *Phys. Status Solidi (b)* 251, 628–632 (2014);
2. Гордиенко А.Б., Филиппов С.И., Расчет характеристик оптического поглощения фторидов с учетом многочастичных эффектов, *Журн. структ. хим.* 56, 4 (2015);
3. A. Weiße, G. Wellein, A. Alvermann, H. Fehske, The kernel polynomial method, *Rev. Mod. Phys.* 78, 275–306 (2006);
4. Филиппов С.И., Гордиенко А.Б., Электронные свойства  $NaMgF_3$  и  $KMgF_3$  с учетом электрон-дырочного взаимодействия, *Сб. тез. ВНКСФ-21 (Омск)*, 177–178 (2015);
5. Deb S. K., Ultraviolet Absorption Spectra of Alkali Metal Azides, *J. Chem. Phys.* 35, 2122–2127 (1961);
6. Martienssen W., The optical absorption edge in ionic crystals, *J. Phys. Chem. Solids* 8, 294–296 (1959);
7. Gordienko A.B., Poplavnoi A.S., The Application of ab-initio Linear Combination of Pseudo-Atomic-Orbital Scheme for the Electronic Structure of Lithium Azide ( $LiN_3$ ), *Phys. Status Solidi (b)* 202, 941–949 (1997);

## Функции Ванье тройных полупроводников со структурой халькопирита

Филиппов Д. И.<sup>1</sup>, Гордиенко А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КемГУ

Эл. почта: filippovdaniil@gmail.com

Локализованные функции Ванье [1] могут служить альтернативой функциям Блоха, которые очень часто выбираются за основу базиса для расчетов электронной

структуры кристаллов. Использование базиса Ваннье может оказаться очень полезным при решении многих прикладных задач, в частности — при расчетах электронных свойств неперриодических систем, а также для упрощения вычислений, для которых стандартные расчетные методы приводят к необходимости использования очень густых сеток в  $k$ -пространстве [2].

Целью настоящей работы было применение базиса Ваннье в задачах изучения электронного строения полупроводниковых кристаллов со структурой халькопирита.

Обобщенной функцией Ваннье для группы из  $J$  изолированных зон называется результат унитарного преобразования блоховских функций  $\psi_{m\mathbf{k}}$  следующего вида ( $\mathbf{R}$ -узел прямой решетки кристалла):

$$|\mathbf{R}n\rangle = \frac{V}{(2\pi)^3} \int_{BZ} e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} \sum_{m=1}^J U_{mn}^k \psi_{m\mathbf{k}} d\mathbf{k}.$$

Для однозначного определения функции Ваннье необходимо ввести дополнительный критерий, который позволит определить матрицу унитарного преобразования  $U_{mn}^k$ . В данной работе использовался критерий пространственной локализации функций Ваннье [3], который заключается в минимизации функционала следующего вида:

$$\Omega = \sum_n (\langle \mathbf{0}n | r^2 | \mathbf{0}n \rangle - \langle \mathbf{0}n | \mathbf{r} | \mathbf{0}n \rangle^2).$$

Располагая базисом функций Ваннье для определенной группы зон, можно с очень малыми затратами получать интерполяционную структуру последней, используя преобразование Фурье и процедуру диагонализации:

$$H_{\mathbf{k},nm}^W = \sum_{\mathbf{R}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} \langle \mathbf{0}n | \hat{H} | \mathbf{R}m \rangle, \quad H_{\mathbf{k},nm}^H = \left[ U_{\mathbf{k}}^T H_{\mathbf{k}}^W U_{\mathbf{k}} \right]_{nm} = \delta_{nm} \bar{E}_{nq}.$$

Эффективность метода следует из того, что число функций Ваннье  $J$  для ячейки, определяющее ранг матриц

$U_{mn}^k$ , гораздо меньше числа базисных функций, используемых при аналогичных первопринципных расчетах [2]. Применительно к данной работе, для  $k$ -сетки  $4 \times 4 \times 4$  расчет валентной области зонной структуры кристалла  $AgGaSe_2$  вышеописанным методом прошел в  $\approx 1664$  раза быстрее аналогичного расчета из первых принципов.

Расчеты проводились как в локальном приближении LDA (PZ81 [4]), так и в градиентном GGA (ТВ-mBJ [5]). Для каждого объекта исследования проводился расчет электронной структуры в рамках теории функционала плотности в базисе численных псевдоатомных орбиталей (ПАО, [6]). После этого выбирались изолированные группы зон для вычисления функций Ваннье и проводился расчет последних. Наконец, используя базис полученных функций, для объектов исследования проводилась интерполяция зонной структуры [2] для выбранных групп зон, включая случай полной интерполяции с размерностью исходного базиса ПАО. Все рассматриваемые в данной работе кристаллы имеют структуру халькопирита с пространственной группой симметрии  $I-42d$ . Зонные структуры объектов исследования содержат 26 зон в валентной области, для которых можно выделить 3 изолированных группы. Полученные для кристалла  $CuBS_2$  значения функционала дисперсии координаты в минимуме при использовании  $k$ -сетки  $2 \times 2 \times 2$  (случай  $J=26$ ) составили  $\Omega_{LDA} = 60,105 \text{ \AA}^2$  и  $\Omega_{GGA} = 58,493 \text{ \AA}^2$  соответственно. Различие в полученных значениях функционала дисперсии координаты (которое наблюдалось и для остальных соединений) объясня-

ется более локализирующим характером градиентного потенциала [5] по сравнению с локальным. 16 полученных функций Ваннье для расчета с рассмотрением всей валентной области кристалла имеют вид гибридизованных  $sp^3$ -орбиталей с центрами на межатомных связях, а 10 остальных функций имеют вид  $d$ -орбиталей, локализованных на двух неэквивалентных атомах меди. В работе также показано, что для каждого объекта исследования можно очень точно интерполировать валентную область зонного спектра уже при использовании первопринципной  $k$ -сетки  $4 \times 4 \times 4$  (для сетки  $2 \times 2 \times 2$  наблюдаются значительные отклонения от первопринципного расчета, которые происходят в силу существенного перекрывания реплик функций Ваннье в соответствующей расширенной ячейке), а также возможен вариант интерполяции всей зонной структуры с размерностью исходного базиса ПАО.

Таким образом, в настоящей работе впервые вычислены наборы функций Ваннье для тройных полупроводниковых кристаллов со структурой халькопирита, а также исследованы различные варианты интерполяции их зонной структуры, как для отдельных групп зон, так и для полной зонной структуры.

#### Список литературы

1. Wannier G.H., The Structure of Electronic Excitation Levels in Insulating Crystals, Phys. Rev., Vol. 52, P. 191–197, 1937;
2. Marzari N., Mostofi A.A., Maximally localized Wannier functions: Theory and applications, Rev. Mod. Phys., Vol. 84, P. 1419–1475, 2012;
3. Marzari N., Vanderbilt D., Maximally localized generalized Wannier functions for composite energy bands, Phys. Rev. B., Vol. 56, P. 12847–12865, 1997;
4. Perdew J.P., Zunger A., Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems, Phys. Rev. B., Vol. 23, P. 5048–5079, 1981;
5. Tran F., Blaha P., Accurate Band Gaps of Semiconductors and Insulators with a Semilocal Exchange-Correlation Potential, Phys. Rev. Lett., Vol. 102, P. 226401, 2009;
6. Jansen R.W., Sankey O.F., Ab-initio linear combination of pseudo-atomic- orbital scheme for the electronic properties of semiconductors: results for ten materials, Phys. Rev. B., Vol. 36, P. 6520–6531, 1987;

## Численное моделирование ТДС-спектра в нелинейной краевой задаче термодесорбции водорода

Костикова Е. К.<sup>1</sup>, Заика Ю. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИПМИ

Эл. почта: fedorova@krc.karelia.ru

В рамках технологических задач водородного материаловедения (включая проект ITER) ведется интенсивный поиск различных по назначению конструкционных материалов с заранее заданными пределами водородопроницаемости. Одним из экспериментальных методов является термодесорбционная спектрометрия (ТДС). Образец, предварительно насыщенный водородом, дегазируется в условиях вакуумирования и монотонного нагрева. С помощью масс-спектрометра регистрируется десорбционный поток, позволяющий судить о характере взаимодействия изотопов водорода с твердым телом. Интерес представляют такие параметры переноса как коэффициен-



ты диффузии, растворения, десорбции, ... В докладе представлены распределенная нелинейная краевая задача термодесорбции и численный метод моделирования ТДС-спектра, требующий лишь интегрирования нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) относительно невысокого порядка.

Рассмотрим перенос водорода в образце тестируемого металла или сплава (пластине толщины  $\ell$ ). Нагрев относительно медленный, практически равномерный. Для диффузии примем стандартное уравнение:

$$c_t(t, x) = D(T)c_{xx}(t, x), \quad (t, x) \in Q_{t_x},$$

где  $t$  — время,  $Q_{t_x} = (0, t_x) \times (0, \ell)$ ;  $c(t, x)$  — концентрация диффундирующего водорода (атомарного);  $D$  — коэффициент диффузии. Зависимость  $D$  от текущей температуры  $T(t)$  соответствует закону Аррениуса (с предэкспоненциальным множителем  $D_0$  и энергией активации  $E_D$ ):  $D = D_0 \exp\{-E_D / [RT(t)]\}$ .

Пластина контактирует с газообразным  $H_2$  и поверхность является существенным потенциальным барьером. С учетом (де)сорбционных процессов краевые условия моделируются следующим образом:

$$\begin{aligned} c(0, x) &= \bar{c}(x), \quad x \in [0, \ell], \quad t \in [0, t_x], \\ c_0(t) &= g(T)q_0(t), \quad c_\ell(t) = g(T)q_\ell(t), \\ \dot{q}_0(t) &= \mu s(T)p_0(t) - b(T)q_0^2(t) + Dc_x(t, 0), \\ \dot{q}_\ell(t) &= \mu s(T)p_\ell(t) - b(T)q_\ell^2(t) - Dc_x(t, \ell), \\ b(T) &= b_0 \exp\{-E_b[RT]^{-1}\}, \quad s(T) = \dots \end{aligned}$$

Здесь:  $c_0(t) \equiv c(t, 0)$ ,  $c_\ell(t) \equiv c(t, \ell)$  — граничные объемные концентрации диффундирующего атомарного водорода;  $q_0(t)$ ,  $q_\ell(t)$  — концентрации на поверхностях ( $x = 0, \ell$ );  $g(T)$  — параметр локального равновесия между концентрациями на поверхности и в приповерхностном объеме;  $\mu$  — кинетический коэффициент;  $s(T)$  — параметр, отражающий тот факт, что только малая часть «налетающего» водорода окажется в форме атомов на поверхности материала;  $p_0(t)$ ,  $p_\ell(t)$  — давления молекулярного газа  $H_2$ ;  $b(T)$  — коэффициент десорбции.

Если с обеих сторон пластины поддерживать постоянное давление насыщения  $\bar{p}$  молекулярного водорода при  $T = \text{const}$ , то через некоторое время установится равновесная концентрация  $\bar{c}$  растворенного атомарного диффузионно подвижного водорода. Из граничных условий модели, приравнявая производные к нулю, получаем  $\bar{c} \propto \sqrt{\bar{p}}$ . Таким образом, модель соответствует диапазону адекватности закона Сивертса.

Требуется численно моделировать ТДС-спектр (зависимость плотности десорбционного потока от текущей температуры  $T(t)$ ). В работе получено нелинейное интегро-дифференциальное уравнение нейтрального типа, описывающее динамику поверхностной концентрации. Это позволяет при моделировании ТДС-спектра вместо численного решения нелинейной краевой задачи с динамическими граничными условиями использовать процедуру интегрирования конечной системы ОДУ. При решении обратной задачи параметрической идентификации разработанный алгоритм дает существенную экономию вычислительных ресурсов, позволяя «просканировать» широкий диапазон значений параметров за приемлемое время. Приведены результаты

вычислительных экспериментов, использующих данные по водородопроницаемости никеля и конструкционной стали.

## **Зонная структура спектра одномерного фотонного кристалла с метаматериалами**

*Правдин К. В.<sup>1</sup>, Попов И. Ю.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИТМО

Эл. почта: [construeman@gmail.com](mailto:construeman@gmail.com)

Метаматериалы (negative index material, NIM) – это искусственные среды, демонстрирующие необычные оптические эффекты за счет внедрения в них специальной периодической структуры. Одним из таких эффектов является отрицательное преломление. Этот эффект привлекает большое внимание исследователей – в основном за счет идеи его применения при создании суперлинзы [1]. Кроме суперлинзы, эффект интересен при изучении слоистых систем, так как позволяет изменять их оптические свойства за счет добавления слоев NIM [2].

Периодическая слоистая система с NIM (NIM-система) может рассматриваться как модель одномерного фотонного кристалла (one-dimensional photonic crystal, 1DPC). Фотонный кристалл представляет собой структуру с показателем преломления, периодически зависящим от пространственных координат. Ряд недавних исследований посвящен изучению 1DPC, состоящих из слоев с отрицательным и положительным показателем преломления [2, 3]. Однако большинство этих исследований рассматривают недиспергирующие системы. Поэтому изучение диспергирующих слоистых NIM-систем представляет особый интерес.

Так, в рассмотренном нами недавно 1DPC [4] слои NIM описываются в соответствии с моделью Лоренца [5] как диспергирующие среды. Было проведено исследование зонной структуры спектра оператора Максвелла и изучена ее зависимость от параметров системы. С точки зрения реального применения рассмотренная модель может быть полезна при создании различных оптических покрытий, фильтров электромагнитного излучения и других оптических устройств. Однако их производство и эффективное использование со слоями вакуума весьма затруднительно. Поэтому в данной работе мы ставим задачу исследовать 1DPC со слоями метаматериалов, демонстрирующих при различных условиях положительный и отрицательный показатели преломления в соответствии с моделью Лоренца. Нас интересует зонная структура спектра оператора Максвелла и ее зависимость от параметров системы.

### Список литературы

1. Pendry J.B., Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.*, 85, pp. 3966-3969, 2000;
2. Feng X., Li H., Enlargement of the omnidirectional reflectance gap in one-dimensional photonic crystal heterostructure containing double negative index material, *Eur. Phys. J. D.*, 67, pp. 40157-7, 2013;
3. Pandey G.N., Thapa K.B., Srivastava S.K., Ojha S.P., Band structures and abnormal behavior of one dimensional photonic crystal containing negative index materials, *PIER M*, 2, pp. 15-36, 2008;

4. Pravdin K.V., Popov I.Yu., Photonic crystal with negative index material layers, *Nanosystems: Phys., Chem., Math.*, 5, №5, pp. 626-643, 2014;
5. Gralak B., Tip A. J., Macroscopic Maxwell's equations and negative index materials, *Math. Phys.*, 51, №5, pp. 052902-28, 2010;

## **Обобщенная математическая модель разгона поршня продуктами сгорания с осесимметричным канале переменного сечения**

*Быков Н. В.<sup>1,3</sup>, Власова Н. С.<sup>3</sup>, Нестеренко Е. А.<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>ФИЦ ИУ РАН

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша

<sup>3</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана

Эл. почта: bykovnv@bk.ru

Задачи математического моделирования движения различных сплошных сред по каналам, которые могут иметь изменяющуюся площадь сечения, возникают во многих областях науки и техники. В частности, в военной и космической отраслях существует насущная потребность в создании средств разгона тел до высоких скоростей в направляющих каналах. В качестве источника энергии в таких средствах как правило используются высокоэнергетические материалы; наиболее часто в этой роли выступают пороховые составы, реже — взрывчатые. Существует также большой класс установок, в которых используется электромагнитная энергия.

В каждой из конструкций разгонных установок может использоваться тот или иной набор сред, занимающий весь объем канала. Изучаемый объем разбивается на расчетные блоки, каждый из которых занимает свою пространственную область в канале. В каждом из блоков находится определенная среда, описываемая той или иной математической моделью. Различные среды разделены инеционными перегородками, которые движутся под действием разностей давлений в прилегающих к ним точках соответствующих сред.

Предложено разнообразное количество математических моделей разной степени сложности и детализации, которые вписываются в данную обобщенную схему. Выбор той или иной модели определяется требованиями к точности получаемого решения, производительностью вычислительных средств, степенью достоверности исходных данных, а также рядом других обстоятельств.

Модель поведения продуктов сгорания состоит из блоков моделей воспламенения, моделей горения и моделей движения продуктов сгорания. Модель воспламенения описывается либо мгновенным воспламенением, либо моделью воспламенения с учетом теплопроводности элементов. Моделью горения является геометрический закон газообразования. В качестве моделей движения продуктов сгорания рассматриваются термодинамические или нульмерные модели, газодинамические однофазные и двухфазные модели.

Движение пластических сред может быть описано как в рамках моделей несжимаемой жидкости, так и идеальной сжимаемой жидкости со специальным эмпирическим уравнением состояния, либо может быть использована модель вязкопластической неньютоновской жидкости.

Моделями газовых сред служат модели идеального газа и модели невязкого газа со специальным уравнением состояния.

Все эти блоки моделей завязаны на модели взаимодействия среды со стенками канала и модели учета сопротивления движению поршня.

Список литературы

1. Быков Н.В., Нестеренко Е.А. Математическое моделирование и визуализация внутрикамерных процессов в баллистических установках с гидродинамическим эффектом // Научная визуализация. 2015. Т. 7. №1. С. 65-77;
2. Быков Н.В., Владимиров В.С., Зеленцов В.В.внутренней баллистики систем высокоскоростного метания // Оборонная техника, 2011. №8. С.3-9;

## Численное моделирование электрического взрыва проводников

*Ряховский А. И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: alexey.i.ryakhovskiy@mail.ioffe.ru

В работе исследуются возможности численного моделирования электрического взрыва в установках для получения наночастиц металлов и их оксидов. Электрическим взрывом проводников называют явление резкого расширения вещества в ходе интенсивного джоулева нагрева металла импульсом электрического тока. Для получения нанопорошков обычно используются металлические проволоочки диаметром 0.1-1 мм и длиной 50-200 мм. или тонкостенные металлические оболочки [Коваленко, Калинин, 2.14]. Процесс ЭВП состоит из нескольких стадий и характеризуется многочисленными фазовыми превращениями и физическими явлениями, механизм которых до конца не изучен.

К основным этапам электрического взрыва относятся:

1. *нагрев металла в твердом состоянии;*
2. *плавление;*
3. *нагрев металла в жидком состоянии;*
4. *интенсивное парообразование, образование слоев различной плотности;*
5. *взрыв, гидродинамическое расширение, нарушение проводимости;*
6. *образование системы плазменная корона – жидкостно-паровой kern;*
7. *ионизация, шунтирующий разряд в парах продуктов ЭВП.*

Наибольшее внимание уделено стадии процесса, при которой металл взорванного проводника находится в состоянии плотной горячей плазмы. Для описания данной стадии используется система уравнений магнитной гидродинамики:

$$\begin{aligned} \rho_t &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}), (\rho \mathbf{v})_t = -\nabla \cdot [\rho \mathbf{v} \mathbf{v}^T + (p + \frac{1}{2} \mathbf{B}^2) \mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{B} \mathbf{B}^T], \mathbf{B}_t = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), e_t \\ &= -\nabla \cdot [(\frac{\gamma}{\gamma - 1} p + \frac{1}{2} \rho \mathbf{v}^2) \mathbf{v} + n(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}]. \end{aligned}$$

Эта система дополняется уравнением состояния и формулами для расчета транспортных коэффициентов. Выбор подходящих выражений для описания транс-

портных свойств и состояния вещества так же является объектом исследования. В работе были рассмотрены различные подходы к решению данной системы. Наилучших результатов удалось добиться, используя центральные разностные схемы [Balbas et al, 2004].

Другими важными аспектами исследования является моделирование динамики и изменения состояния вещества на стадии плавления и испарения, а также нуклеация и молекулярные процессы, отвечающие непосредственно за формирования наночастиц. Эффективность различных методов математического моделирования была исследована в применении к отдельным этапам процесса. Были предложены версии гибридных методов VOF, метода лагранжевых частиц и др.

В качестве основного уравнения для металла в состоянии плазмы и жидкостно-паровой смеси используется уравнение Хомкина и Шумихина [Khomkin, Shumikhin, 2014]. Расчеты с использованием данного уравнения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными в интересующих нас диапазонах термофизических параметров. Из вышеупомянутой статьи также позаимствованы модели тепло- и электропроводности, обладающие теми же преимуществами.

Нами был разработан набор солверов для интегрируемой платформы OpenFOAM, в которых реализованы соответствующие методы и численные схемы. Кроме того, в вычислительную среду были перенесены соответствующие уравнения состояния и модели транспортных коэффициентов. Различные термофизические модели были сравнены в применении к МГД-расчетам. Созданные инструменты позволяют моделировать процесс ЭВП с «холодного старта» до разлета и конденсации продуктов взрыва. Полученные результаты были сравнены с имеющимися экспериментальными данными и одномерной полностью лагранжевой моделью.

#### Список литературы

1. Balbas J., Tadmor E., Cheng-Chin W., Non-oscillatory central schemes for one- and two-dimensional MHD equations, *Journal of Computational Physics*, 201, pp. 261–285, 2004;
2. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В., Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. Энергоатомиздат: 1990;
3. Khomkin A.L.m Shumikhin A.S., Equation of state, composition and conductivity of dense metal-vapor plasma, *High Temperature*, vol. 52 №3, 326-336, 2014;
4. Kovalenko A.N., Kalinin N.V., Thermodynamic instability of compound and formation of nanosized particles nearby the critical point of phase generating media, *NANOSYSTEMS: PHYSICS, CHEMISTRY, MATHEMATICS*, 5 (2), 258-293, 2014;

# НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ И ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

---

## Эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик-полупроводник

Калитуха И. В.<sup>1,2</sup>, Коренев В. Л.<sup>2</sup>, Акимов И. А.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ

<sup>2</sup>ФТИ

<sup>3</sup>Университет Дортмунда

Эл. почта: kalitukha@gmail.com

В последние десятилетия активно проводятся исследования в области спиновой физики — спинтроники. Это связано с перспективой создания устройств, комбинирующих стандартную микроэлектронику со спин-зависимыми явлениями. Одним из направлений спинтроники является интегрирование магнетизма в полупроводниковую архитектуру современных компьютеров. Возможным путем объединения магнитной памяти и полупроводниковой логики является разработка устройств на гибридных структурах ферромагнетик-полупроводник (ФМ-ПП) [1], которые изготавливались бы в рамках одной технологии. В такой структуре возникает эффект близости — сильное обменное взаимодействие спиновых систем ФМ и полупроводника [2]. Уникальность такой связанной системы заключается в возможности разделения функций хранения и управления: хранение спина осуществляется в ФМ, а управление спином можно организовать с помощью полупроводника. Одно из достоинств такого подхода заключается в возможности независимого выбора из большого числа ферромагнитных материалов и парамагнитных полупроводников.

В данной работе рассматривается эффект близости и связанные с ним свойства в гибридной структуре кобальт — квантовая яма (КЯ) в образцах  $\text{Co}/\text{CdMgTe}/\text{CdTe}/\text{CdMgTe}/\text{GaAs}$ . Исследовались структуры с толщиной пленки кобальта от 0 до 16 нм; толщиной барьера  $\text{CdMgTe}$  между кобальтом и КЯ от 0 до 54 нм; толщиной КЯ  $\text{CdTe}$  10 нм. Исследования проводились методом поляризационной фотoluminesцентной (ФЛ) спектроскопии и время-разрешенной поляризационной ФЛ спектроскопии.

В процессах генерации-рекомбинации в гибридных структурах ФМ-ПП основными являются переходы между зоной тяжелых дырок и зоной проводимости. При накачке линейно поляризованным светом в КЯ рождаются неполяризованные носители. Они поляризуются вдоль или против направления суммарного магнитного поля (внешнего магнитного поля и эффективного обменного поля ФМ). Согласно правилам отбора, рекомбинация поляризованного носителя дает циркулярно поляризованный фотон. Прикладывая к образцу магнитное поле в геометрии Фарадея, мы пере-

магничиваем ферромагнитную пленку и, соответственно, количественно изменяем поляризацию носителей, что фиксируется через степень циркулярной поляризации ФЛ.

Магнитополевая зависимость степени циркулярной поляризации ФЛ из КЯ демонстрирует нелинейный рост с насыщением в поле 40 мТл, тогда как в полупроводнике без ферромагнитного слоя намагниченность отдельных носителей заряда крайне мала и линейна по магнитному полю. Данный вид зависимости свидетельствует об обменном взаимодействии спиновых систем в структуре ФМ–ПП, т. е. об эффекте близости. Слабая линейная зависимость степени циркулярной поляризации ФЛ из подложки GaAs от внешнего магнитного поля говорит о том, что наблюдаемый эффект не является следствием циркулярного дихроизма, что также доказывает эксперимент с модуляцией поляризации в канале возбуждения.

Степень циркулярной поляризации ФЛ в насыщении плавно убывает с увеличением толщины барьера между кобальтом и КЯ в диапазоне от 7 до 40 нм, при 54 нм насыщение отсутствует. Это говорит о том, что обменное взаимодействие дальнотяствующее, характерный масштаб составляет несколько десятков нанометров.

Эффект близости ослабевает с увеличением температуры и пропадает при 30 К. В диапазоне мощностей накачки от 2 до 20 мВт зависимости степени циркулярной поляризации от внешнего магнитного поля имеют одинаковую форму. Следовательно, мощность накачки и температура влияют на спиновую систему полупроводника, но не влияют на магнитные свойства ферромагнетика.

Результаты время-разрешенной поляризационной спектроскопии ФЛ показывают, что в КЯ за счет обменного взаимодействия со спиновой системой ферромагнетика поляризуются дырки.

Таким образом, в гибридной структуре кобальт–КЯ CdTe наблюдается дальнотяствующее обменное взаимодействие спиновой системы ФМ и дырок в КЯ. Дальнотяствие указывает на новый механизм обменного взаимодействия, не связанный с перекрытием волновых функций дырок в квантовой яме и d-электронов в ферромагнетике.

#### Список литературы

1. Захарченя Б. П., Коренев В. Л., Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику, Успехи физических наук, 48, 603–608, 2005;
2. Рожанский И.В., Аверкиев Н.С., Lähderanta E., Configuration interaction in delta-doped heterostructures, Физика низких температур, 39, 40–47, 2013;

## **Магнитный линейный дихроизм фотоэмиссии электронов из сверхтонких пленок силицидов переходных металлов**

*Гребенюк Г. С.<sup>1</sup>, Гомоюнова М. В.<sup>1</sup>, Пронин И. И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: georgijmail@gmail.com

Сверхтонкие (~1 нм) магнитные пленки силицидов переходных металлов, сформированные на поверхности кремния, представляют большой интерес, как для

фундаментальной науки, так и практических приложений в области магнетоэлектроники и спинтроники. Много внимания в последние годы, в частности, уделялось синтезу пленок силицидов железа, кобальта и марганца на кремнии. Были изучены процессы взаимодействия атомов Fe, Co и Mn с поверхностью Si, а также реакции, протекающие в данных системах при повышенных температурах. Однако создание магнитных структур на основе этих металлов требует также детального знания магнитных свойств сверхтонких слоев синтезируемых силицидов, сведений о которых в литературе очень мало. Целью настоящей работы было восполнить этот пробел и найти корреляции между изменениями фазового состава поверхности пленок в процессе синтеза и их магнитными свойствами.

Пленки силицидов железа, кобальта и марганца нанометровой толщины формировались на атомарно-чистых кремниевых подложках в условиях сверхвысокого вакуума методом твердофазной эпитаксии. Анализ элементного и фазового состава пленок проводился методом фотоэлектронной спектроскопии высокого энергетического разрешения с использованием синхротронного излучения. Эксперименты были выполнены на накопительном кольце HZB BESSY II. Основные измерения проводились при энергии фотонов, равной 135 eV, которая соответствует максимальной поверхностной чувствительности спектров Si 2*p* и 3*p* электронов металлов. Магнитные свойства пленок анализировались *in situ* с помощью эффекта магнитного линейного дихроизма (МЛД) в фотоэмиссии Fe 3*p*, Co 3*p* и Mn 3*p* электронов. Эффект состоит в том, что при регистрации электронов в узком телесном угле вдоль нормали к поверхности образца энергетическое положение и форма 3*p* линии оказываются зависящими от направления намагниченности пленки в плоскости поверхности образца. Намагничивание образцов проводилось непосредственно в вакуумной камере спектрометра.

Показано, что при комнатной температуре начальные стадии формирования интерфейсов металл-кремний протекают сходным образом для исследованных систем. Росту металлической пленки предшествует образование интерфейсного моносилцида и рост островковой пленки твердого раствора металл-кремний либо богатого металлом силицида. Ферромагнитное упорядочение исследованных систем носит пороговый характер и наступает после напыления различных доз металла: для кобальта это 0.6 nm, для железа – 0.7 nm, а для марганца данное значение варьируется в пределах от 0.5 до 2 nm в зависимости от грани кремния и условий напыления. Причем, величина эффекта МЛД в случае Mn значительно ниже, чем для Fe и Co. Твердофазные реакции в системе Co/Si начинаются при ~250°C, когда в приповерхностной области формируется ферромагнитный силицид Co<sub>3</sub>Si. Рост температуры до 360°C приводит к исчезновению Co<sub>3</sub>Si и появлению немагнитного моносилцида CoSi. Реакции в системе Fe/Si начинаются при более низких температурах (около 100°C). При этом наблюдается перестройка пленки железа в пленку ферромагнитного силицида Fe<sub>3</sub>Si. Отжиг до 200°C приводит к трансформации Fe<sub>3</sub>Si в немагнитную фазу ε-FeSi. Термостимулированные процессы в системе Mn/Si, проявляющиеся после отжига образца при 150°C, не приводят к формированию ферромагнитных силицидов марганца с температурой Кюри выше комнатной.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-02-00398) и Российско-Германской лаборатории в HZB BESSY.



## **Повышение квантовой эффективности каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе псевдоморфных наногетероструктур, выращенных методом МОСГФЭ, за счет фотоэффекта в массиве InAs квантовых точек**

Салий Р. А.<sup>1</sup>, Минтаиров С. А.<sup>1</sup>, Надточий А. М.<sup>1</sup>, Паюсов А. С.<sup>1</sup>,  
Брунков П. Н.<sup>1</sup>, Неведомский В. Н.<sup>1</sup>, Калюжный Н. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Эл. почта: rino.art@gmail.com

В настоящее время полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе каскадных псевдоморфных GaInP/Ga(In)As/Ge гетероструктур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГФЭ), демонстрируют высокие значения КПД преобразования солнечной энергии в электричество и являются наиболее перспективными для промышленного производства приборами [1]. Однако существует фундаментальная проблема, ограничивающая возможность приближения КПД таких ФЭП к теоретическому пределу. Это несогласованность токов, генерируемых субэлементами каскадного ФЭП, что является следствием неоптимальных значений ширин запрещенных зон материалов его изорешеточной структуры. Широкая спектральная характеристика нижнего Ge субэлемента обуславливает избыточную генерацию неравновесных носителей, в то время как средний субэлемент на основе GaInAs ограничивает ток всей структуры. Сохранить преимущества псевдоморфного роста, решив при этом проблему дисбаланса фотогенерированных токов, можно путем использования в GaInAs субэlementе квантово-размерных объектов – квантовых точек (КТ), не влияющих на изменение параметра решетки матрицы субэлемента, но расширяющих его спектральную чувствительность.

### ***Актуальность и практическая значимость:***

В данном исследовании решалась актуальная проблема разработки технологии формирования массивов КТ методом МОСГФЭ. В отличие от известных технологий создания КТ методом молекулярно пучковой эпитаксии [2], МОС-гидридная технология ориентирована на создание каскадных ФЭП. Также разработанные и исследованные GaAs ФЭП с InAs КТ представляют интерес с точки зрения создания ФЭП с промежуточной зоной (intermediate-band, IB), в которых предлагается идея создания однопереходного ФЭП, эквивалентного прибору каскадного типа [3].

### ***Методика эксперимента:***

Все экспериментальные и приборные структуры получены методом МОСГФЭ на лабораторной установке с реактором горизонтального типа, в ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Изучение топографии поверхности образцов с «незакрытыми» одиночными слоями КТ проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). С помощью метода фотолюменесценции (ФЛ) исследовались оптические свойства КТ в зависимости от структурных и ростовых параметров: условий осаждения и количества материала InAs КТ, условий формирования GaAs «подслоя», толщины и параметров роста «покрывающего» GaAs слоя и т.д. Для изучения температурных зависимостей спектров ФЛ образцы исследовались в гелиевом криостате. Одиночные слои и массивы КТ также исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

**Основные результаты:**

- исследованы особенности роста в рассогласованной системе InAs-GaAs методом МОСГФЭ, в том числе на подложках с различной степенью разориентации поверхности;
- найдены зависимости интенсивности ФЛ от ключевых параметров роста, в том числе: определены оптимальные количества осаждаемого InAs материала для обеспечения максимальной интенсивности ФЛ КТ при различных скоростях осаждения InAs и параметрах закрывающего GaAs слоя;
- показано критическое влияние параметров роста GaAs «закрывающего» слоя на оптические свойства InAs КТ;
- с помощью исследования гетероструктур с КТ методами AFM, ТЕМ и ФЛ при различных температурах и интенсивностях накачки показано многомодальное распределение точек по размеру;
- разработаны и созданы методом МОСГФЭ наногетероструктуры GaAs ФЭП с многослойными массивами КТ и изготовлены ФЭП на их основе, измерены и проанализированы их вольт-амперные и спектральные характеристики;
- продемонстрирован значительный прирост фотогенерированного тока, достигнутый за счет фотоэффекта в массиве InAs КТ, который составил  $0.592 \text{ мА/см}^2$  для стандартизированного наземного спектра AM1.5D и  $0.815 \text{ мА/см}^2$  для спектра AM0.

**Благодарность:**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки, Договор № 14.В25.31.0020 (Постановление № 220).

Список литературы

1. Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta and Ewan D. Dunlop. Prog. Photovolt: Res. Appl. 22, p.701 (2014);
2. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д, Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры Обзор, ФТП, 32(4), с. 385, (1998);
3. Luque A., Marti A., Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels, Physical Review Letters 78, 5014 (1997);

## Спектроскопические свойства коллоидных растворов суперпарамагнитных наночастиц $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2$

Смердов Р. С.<sup>1</sup>, Бочарова Т. В.<sup>1</sup>, Гареев К. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>СПбГЭТУ

Эл. почта: rostofan@gmail.com

Развитие современных методов медицинской диагностики таких как магнитно-резонансная томография, позитронная эмиссионная томография, рентгеновская компьютерная томография потребовало дальнейших исследований в области контрастирующих агентов [1]. Композитные суперпарамагнитные наночастицы могут рассматриваться как негативные контрастирующие  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Более того, благодаря прису-

щей им биологической совместимости, магнитные наночастицы также могут быть использованы как магнитные метки для доставки лекарственных средств [2]. Оптические свойства тонких пленок магнетита также представляют интерес: такие пленки демонстрируют поглощение в УФ – и значительное пропускание в видимом диапазоне, что позволяет использовать наноразмерные слои магнетита в качестве перспективного материала для оптоэлектроники [3].

Задачами исследования являлись: определение параметров спектров оптического поглощения коллоидных растворов магнитных наночастиц, построение модели структуры композитных наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ , выявление влияния облучения образца на его магнитные свойства. Для измерения спектров оптического поглощения образцов был использован Specord® 40 Analytik Jena. Измерения проводились при температуре 300К. Спектры ЭПР были получены на ЭПР-спектрометре JEOL.

Вид спектров поглощения коллоидных растворов свидетельствует об идентичности их химического состава. При этом очевидно изменение концентрации наночастиц магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , осажженных в ходе реакции Массарта на поверхности гелевого скелета  $\text{SiO}_2$ , наибольшая концентрация наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  обнаружена при использовании раствора тетраэтоксисилана (TEOS) в изопропанолe с концентрацией TEOS 60 об.%.

В результате программной обработки спектров поглощения обнаружены шесть характерных полос поглощения в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах, имеющих максимумы поглощения:  $25130 \text{ см}^{-1}$ ;  $26220 \text{ см}^{-1}$ ;  $27300 \text{ см}^{-1}$ ;  $28480 \text{ см}^{-1}$ ;  $29530 \text{ см}^{-1}$ ;  $30480 \text{ см}^{-1}$ . Полуширина полос остается практически неизменной. Выдвинуто предположение, что наличие данных полос связано с образованием кластеров  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  шести характерных размеров на поверхности гелевой матрицы  $\text{SiO}_2$ . С целью оценки характерных размеров кластеров используется формула Г. Мие [4], где  $K_{max}$  – максимум поглощения на соответствующей длине волны,  $\Gamma$  – полуширина полосы поглощения ( $\text{см}^{-1}$ ),  $A=1,25 \times 10^2 \text{ эВ/мм}$  — оптическая константа,  $R$  – радиус коллоидных наночастиц,  $n$  – концентрация наночастиц ( $\text{см}^{-3}$ ),  $K_{max} = A n 4 \pi R^3 / 3$ .

Оценочный радиус кластеров, полученный по этой формуле,  $R = 1,9 \text{ нм}$ ,  $1,8 \text{ нм}$ ,  $2,07 \text{ нм}$ ,  $1,5 \text{ нм}$ ,  $2,57 \text{ нм}$ ,  $3,02 \text{ нм}$  соответственно для полос поглощения кластеров  $25130 \text{ см}^{-1}$ ;  $26220 \text{ см}^{-1}$ ;  $27300 \text{ см}^{-1}$ ;  $28480 \text{ см}^{-1}$ ;  $29530 \text{ см}^{-1}$ ;  $30480 \text{ см}^{-1}$  (при концентрации TEOS 60 об.%).

В спектре ЭПР наблюдается слабо асимметричная линия в области  $g$  - фактора 2,04 при напряженности поля  $H = 3450 \text{ Гс}$ , ширина линии  $\Delta H \approx 680 \text{ Гс}$ . Спектр ЭПР поглощения в области  $g$  - фактора 4,3 не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в изучаемом порошке. Подобный сигнал наблюдался в работе [5], посвященной изучению температурной и частотной зависимостям магнитных свойств суперпарамагнитных свойств наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Установленный размер частиц 1,1 нм. Выдвигается предположение, что большая ширина линии связана с эффектом релаксации, возникающим благодаря наноразмерам. Следует отметить, что подобная широкая полоса наблюдалась в спектре ЭПР аморфной системы  $x \text{ Fe}_3\text{O}_4 (100-x) \text{ SiO}_2$ , полученной по золь-гель технологии при  $x = 0,5 - 2$  [6].

В спектре  $\gamma$ -облученного образца отчетливо проявляется на левом крыле полосы с  $g$  - фактором 2,04 менее интенсивный сигнал в области  $g$  - фактора 2,7. Можно предполагать, что воздействие ионизирующего излучения на изучаемые объекты сопровождается образованием радиационных дефектов силикатной матрицы и изменением зарядового состояния ионов переменной валентности. Анализ ЭПР-спектров доказывает, что дефекты, связанные с группировкой  $\equiv \text{Si}-\text{O} \cdot$  отсутствуют. Следова-

тельно, можно ожидать, что изменяется характер взаимодействия в ансамбле магнитных наночастиц.

Список литературы

1. NaH Bin, Inorganic nanoparticles for MRI contrast agents *Adv. Mater.* 21, 2133–2148, 2009;
2. Liao Z, Wang H, Lv R, Polymeric liposomes-coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles as contrast agent for targeted magnetic resonance imaging of cancer cells, *Langmuir*, 437-440, 2011;
3. Chang-Neng, Magnetic and Optical Properties of Isolated Magnetite Nanocrystals, *Materials Transactions*, 48, 5, 21-25, 2007;
4. Kreibig U, Small Silver Particles in Photosensitive Glass: Their Nucleation and Growth, *Appl. Phys.*, 10, 255-264, 1976;
5. Y. Köseoğlu B. Aktas, ESR studies on superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles, *Phys. Stat. Sol.*, 1, 3516–3520, 2004;
6. K. Tanaka, ESR study of a sol-gel-derived amorphous Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 94, 366, 1987;

## Синтез композитных структур на основе тригональных кристаллов GaBO<sub>3</sub> и FeBO<sub>3</sub>

Мустафаева С. М.<sup>1</sup>, Матвиенко М. П.<sup>1</sup>, Могиленец Ю. А.<sup>1</sup>, Максимова Е. М.<sup>1</sup>, Наухацкий И. А.<sup>1</sup>, Стругацкий М. Б.<sup>1</sup>, Ягупов С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КФУ им. В.И.Вернадского

Эл. почта: Safika-1993@mail.ru

Тонкая пленка бората железа представляет значительный интерес для применения в магнитооптике, магнитоакустике и в качестве уникального модельного объекта для исследований эффектов поверхностного магнетизма и магнитного резонанса. Известно, что кристаллы GaBO<sub>3</sub> и FeBO<sub>3</sub> имеют структуру кальцита [1], а рассогласование параметров их решеток составляет величину близкую к 2 %. Вышесказанное дает возможность использовать GaBO<sub>3</sub> в качестве подложки для синтеза магнитной пленки FeBO<sub>3</sub>.

Для получения тонкой магнитной пленки бората железа на подложке бората галлия выбран метод жидкофазной эпитаксии. Экспериментально определены технологические параметры кристаллизации, которые позволили синтезировать на предварительно выращенных диамагнитных монокристаллах бората галлия [2] тонкую магнитную пленку FeBO<sub>3</sub>.

Список литературы

1. Bernal I., Struck C.W., Whit J.G., New transition metal borates with calcite structure, *Acta Crystallographica*, V.16, №8, p.849-850, 1963;
2. Стругацкий М.Б., Ягупов С.В., Постывей Н.С., Селезнева К.А., Милюкова Е.Т., Ягупов В.С., Монокристаллы Fe<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>BO<sub>3</sub> для исследования в физике твердого тела, *Ученые записки ТНУ, Серия «Физико-математические науки»*, Т. 24 (63), No. 2, с.169-174, 2011;

## Энергетический спектр InSb/AlAs квантовых точек

Румынин К. М.<sup>1</sup>, Абрамкин Д. С.<sup>2</sup>, Бакаров А. К.<sup>2</sup>, Гутаковский А. К.<sup>2</sup>,  
Шамирзаев Т. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НГУ

<sup>2</sup>ИФП СО РАН

Эл. почта: kur9tko@ya.ru

Теоретические расчёты [1] показывают, что в гетеросистеме InSb/AlAs можно ожидать формирование квантовых точек (КТ) с энергетическим спектром первого рода и непрямой запрещённой зоной. Разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов приводит к длительному времени жизни экситона [2]. Это делает такие КТ перспективными объектами для исследования динамики долгоживущих локализованных экситонов, в частности процессов релаксации спина экситона в КТ. Целью работы является экспериментальное исследование энергетического спектра КТ, сформированных в гетеросистеме InSb/AlAs.

Гетероструктуры с InSb/AlAs КТ были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Исследование кристаллического строения гетероструктур с КТ, проведённое методом просвечивающей электронной микроскопии, показало, что, несмотря на большое рассогласование параметров решёток (12.6%), перемешивание материалов снижает рассогласование и приводит к формированию псевдоморфно напряжённых КТ, состоящих из твёрдого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ .

Были проведены расчёты энергетического строения КТ в зависимости от состава твёрдого раствора. В расчётах учитывалось влияние перемешивания материалов и упругих деформаций на положение энергетических зон. Показано, что в зависимости от состава твёрдого раствора КТ могут иметь энергетическое строение, как первого, так и второго рода. КТ с энергетическим строением первого рода имеют основное электронное состояние в  $X_{xy}$  долине зоны проводимости  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ . Экспериментальное исследование энергетического строения КТ было проведено методом спектроскопии стационарной и время-разрешённой фотолюминесценции (ФЛ). Род энергетического строения определялся по характеру смещения полосы ФЛ в зависимости от плотности мощности возбуждения ( $P$ ). Отсутствие смещения полосы ФЛ, пропорционального  $P^{1/3}$ , характерного для структур с энергетическим строением второго рода [3], указывает на то, что полученные КТ имеют энергетическое строение первого рода. Длительное затухание ФЛ КТ первого рода, вплоть до 100 мкс, указывает на то, что такие КТ имеют непрямую запрещённую зону в пространстве квазиимпульсов. Из сопоставления результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными, был оценён состав твёрдого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$  полученных КТ ( $x=0.2\div 0.5$ ,  $y=0\div 0.2$ ). Таким образом, показано, что в гетеросистеме InSb/AlAs возможно формирование КТ с энергетическим строением первого рода и непрямой запрещённой зоной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 13-02-00073 и 14-02-31102), стипендиальной программы Президента РФ (№ СП-985.2013.5) и программы Министерства Образования и Науки РФ (№ 16.552.11.7091).

Список литературы

1. Т.С. Шамирзаев, Полупроводниковые гетероструктуры первого рода с непрямой зоной проводимости, ФТП, 45, 97, 2011;

2. T.S. Shamirzaev, J. Debus, D.S. Abramkin, D. Dunker, D.R. Yakovlev, D.V. Dmitriev, A.K. Gutakovskii, L.S. Braginsky, K.S. Zhuravlev, and M. Bayer, Exciton recombination dynamics in an ensemble of (In,Al)As/AlAs quantum dots with indirect band-gap and type-I band alignment, *Phys. Rev. B*, 84, 155318, 2011;
3. N.N. Ledentsov, J. Böhrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg, S.V. Ivanov, B. Ya. Meltser, S.V. Shaposhnikov, I.N. Yassievich, N.N. Fadeev, P.S. Kop'ev, and Zh.I. Alferov, Radiative states in type-II GaSb/GaAs quantum wells, *Phys. Rev. B*, 52, 14058, 1995;

## Структурно-морфологические особенности ультратонких эпитаксиальных пленок InSb в матрице AlAs

Колотовкина Д. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НГУ

Эл. почта: koldarya@yandex.ru

Одной из потенциально интересных систем является гетеросистема с квантовыми точками InSb в матрице AlAs. Как показывают теоретические расчеты [1], в таком случае реализуется непрямозонная энергетическая структура первого рода, что позволяет исследовать механизм спиновой релаксации экситона. Для интерпретации будущих экспериментальных результатов необходимы структурные данные системы InSb/AlAs, которые в настоящий момент практически отсутствуют в литературе. Поэтому цель данной работы заключалась в определении структурно-морфологических особенностей эпитаксиальных слоев в широкозонной матрице AlAs с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Объектом исследования являлась гетеросистема GaAs-AlAs-InSb-AlAs-GaAs (001), выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на установке RIBER COMPACT 21T. Для исследования были выбраны 6 образцов, имеющих различные условия МЛЭ: варьировались порядок чередования, количество циклов осаждения In-Sb и время осаждения потоков индия и сурьмы на каждом цикле. Эффективная ожидаемая толщина эпитаксиального слоя InSb зависела от условий роста и находилась в диапазоне 1.3-2.0 монослоя. Образцы препарировались в виде поперечных срезов (ПС) по плоскости (110) методом малоуглового ионного травления (использовались ионы Ag<sup>+</sup>) и в виде планарных фольг по плоскости (001) методом химического травления со стороны подложки в стандартном травителе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O в отношении 3:1:1. Установлено, что при осаждении из молекулярных потоков In и Sb на поверхность AlAs и последующем осаждении молекулярных потоков Al и As в матрице AlAs формируется эпитаксиальная пленка твердого раствора In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>Sb<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> в виде сплошного (смачивающего) слоя с мелкими и крупными островками. Смачивающий слой является когерентно сопряженным с кристаллической решеткой матрицы. Средняя толщина этого слоя зависит от условий осаждения и варьируется в диапазоне 3 – 4 нм при статистическом отклонении порядка 0.5 нм. В предположении закона Вегарда была произведена оценка химического состава твердого раствора In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>Sb<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> в смачивающем слое, возможные значения концентрации In (x) и Sb (y) находятся в диапазоне до x ≈ y ≈ 0.2 включительно. Для мелких островков характерен черно-белый контраст, типичный для когерентных включений, что указывает на когерентное сопряжение кристаллических решеток матрицы и мелких островков. В режимах дифракционного контраста на изображении

ях крупных островков визуализируется параллельный муаровый узор. Это позволяет говорить о различии значений постоянной решетки матрицы и постоянной решетки кристаллической структуры, формируемой в области крупного островка. Обрывы муаровых полос и нарушения их прямолинейности связаны с наличием дефектов структуры в объеме этих островках. Образование дефектов структуры, вероятнее всего, связано с релаксацией упругих напряжений, вызванных различием параметров кристаллической решетки сопрягаемых материалов [2]. В ходе исследования выявлено наличие однородно распределенных на поверхности смачивающего слоя мелких островков в одном образце, при данных условиях МЛЭ формирование крупных релаксированных островков замечено не было. Для остальных образцов когерентные мелкие островки были локализованы вблизи крупных островков. В предположении закона Вегарда и полной релаксации гетероэпитаксиальных напряжений была проведена оценка возможного химического состава твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ , формирующегося в области крупных некогерентных островков. Для визуализации дислокаций несоответствия (ДН) на гетерограницах использовался метод геометрической фазы [3]. Вектора Бюргерса были определены по классической методике с использованием контура Бюргерса. Было установлено, что основной тип ДН – это  $60^\circ$ -дислокации с наклонными векторами Бюргерса типа  $a/2$ . Анализ карт распределения межплоскостных расстояний показал, что ядра ДН являются расщепленными. Каждая ДН представлена двумя близко расположенными  $60^\circ$ -ными дислокациями с суммарным вектором Бюргерса  $a/2[1-10]$ , лежащим в плоскости границы раздела.

#### Список литературы

1. Шамирзаев, Т.С. Полупроводниковые гетероструктуры первого рода с не прямой зоной проводимости. Физика и техника полупроводников. стр. 97-103, 2011 г., Т. 45, 1;
2. Gutakovskii A.K., Stenin S.I., Zakharov B.G. The formation of partial misfit dislocation during heteroepitaxy. Phys. Stat. Sol. (a). pp. 299-304, 1981, Vol. 67;
3. Гутаковский А.К., Чувилин А.Л., Се Ahn Song. Применение высоко разрешающей электронной микроскопии для визуализации и количественного анализа полей деформации в гетеросистемах. Известия РАН, сер. физ., т.71, № 10, 2007, с. 1464–1470; ISSN 1062-8738, Bulletin of the RAS: Physics, 2007, Vol. 71, No. 10, pp. 1426–1432;

## **Ионный синтез нанокристаллов InSb в имплантированных ионами In<sup>+</sup> и Sb<sup>+</sup> захороненных пленках SiO<sub>2</sub>**

*Дзюбина Л. Л.<sup>1,2</sup>, Черков А. Г.<sup>1</sup>, Володин В. А.<sup>1,2</sup>, Тыщенко И. Е.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НГУ

<sup>2</sup>ИФП СО РАН

Эл. почта: lubovdz00@gmail.ru

Интерес к синтезу нанокристаллов InSb вызван рядом фундаментальных и практических задач. Например, наблюдение квантово-размерного эффекта в нанокристаллах InSb возможно в широком диапазоне размеров нанокристаллов. Это обусловлено большим значением боровского радиуса экситона, который в InSb состав-

ляет около 68 нм, который в свою очередь определяется маленькими значениями эффективной массы электронов и дырок, а также большим значением диэлектрической проницаемости. Однако, создание наноразмерных объектов InSb на основе кремния осложнено большим рассогласованием их постоянных решётки (~ 18%). Решение этой проблемы может быть достигнуто в условиях метода ионно-лучевого синтеза [1]. Особенностью ионного синтеза InSb в плёнках SiO<sub>2</sub> является то, что атомы индия и сурьмы обладают сильно различающимися коэффициентами диффузии [2, 3]. При этом генерируемые дефекты могут приводить к ускорению или замедлению их диффузии. Целью данной работы было изучение особенностей процесса ионно-лучевого синтеза нанокристаллов InSb в захороненном слое SiO<sub>2</sub>.

Методами высокоразрешающей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и комбинационного рассеяния света были изучены процессы образования новой фазы во встроенных слоях SiO<sub>2</sub> структуры кремний-на-изоляторе, имплантированных ионами In<sup>+</sup> и Sb<sup>+</sup> с энергией 200 кэВ дозой  $8 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, при последующем высокотемпературном отжиге в интервале температур 500-1100 °С. Установлено, что формирование нанокристаллов InSb происходит, начиная с температуры отжига 900 °С, при которой диффузионная длина атомов Sb становится сравнимой со средним расстоянием между имплантированными атомами. Был проведён анализ распределения нанокристаллов по стехиометрическому составу на разных глубинах. Анализ показал, что нанокристаллы с чёткой кристаллической структурой и наибольшим размером (~ 26 нм) сосредоточены на глубине средних пробегов ионов R<sub>p</sub>. На глубинах, больших R<sub>p</sub> и меньших R<sub>p</sub>, формируются нанокластеры меньших размеров, в составе которых преобладает индий. Полученные результаты объяснены в рамках известных представлений о диффузионных свойствах атомов индия и сурьмы в матрице SiO<sub>2</sub>.

Методом комбинационного рассеяния света были обнаружены пики рассеяния на частотах, близких к частотам продольного и поперечного оптических фононов в фазе InSb, но сдвинутые на ~ 6 см<sup>-1</sup> в высокочастотную область относительно их значений в монокристаллическом антимониде индия. Это свидетельствует о наличии напряжений сжатия в синтезированных нанокристаллах. На основе полученных данных сделано предположение о том, что формирование фазы InSb происходит через расплав растущего зародыша.

#### Список литературы

1. И.Е. Тысченко, М. Фельсков, А.Г. Черков, В.П. Попов. Ионный синтез нанокристаллов InSb в захороненном слое SiO<sub>2</sub> структуры кремний на изоляторе. Физика и техника полупроводников, т. 48, в. 9, стр. 1228-1233, 2014;
2. А.Н. van Ommen. Diffusion of ion-implanted Sb in SiO<sub>2</sub>. J. Appl. Phys., vol. 61, no. 3, pp. 993-997, 1987;
3. А.Н. van Ommen. Diffusion of ion-implanted In and Ti in SiO<sub>2</sub>. J. Appl. Phys., vol. 57, no. 12, pp. 5220-5225, 1985;



## Многослойный нейтронный монохроматор-поляризатор на основе железа

Чжоу З. Л.<sup>1</sup>, В. Г. Сыромятников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>ПИЯФ, НИЦ КИ

Эл. почта: kyawzawlinn.49@gmail.com

### Аннотация

В данной работе предложен многослойный нейтронный монохроматор-поляризатор, состоящий из 490 чередующихся слоев железа и ниобия. Каждый слой *Fe* и *Nb* имеет толщину 25 Å. Использование тонких слоев в периоде структуры позволит получать отраженные брэгговские пики с высоким разрешением по длине волны. Наличие одинаковых толщин слоев в периоде позволяет избежать брэгговских пиков четных порядков. В работе приводятся параметры первого брэгговского пика для восьми модельных нейтронных монохроматоров-поляризаторов на основе железа и кобальта. Расчетные кривые показывают, что первый брэгговский пик, отраженный от структуры *Fe/Nb* имеет относительную полуширину 1.1%, максимальный коэффициент отражения 0.997 и поляризующую эффективность 0.999. Приводятся также первые экспериментальные кривые коэффициента отражения нейтронов от структуры *Fe/Nb* в зависимости от переданного импульса.

## Химический состав и ранние стадии графитизации деагрегированных частиц детонационного наноалмаза

Шестаков М. С.<sup>1</sup>, Алексенский А. Е.<sup>1</sup>, Байдакова М. В.<sup>1</sup>, Дидейкин А. Т.<sup>1</sup>, Швидченко А. В.<sup>1</sup>, Шнитов В. В.<sup>1</sup>, Кидалов С. В.<sup>1</sup>, Вуль А. Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: mikhail.shestakov@gmail.com

Недавно показано, что эффективная деагрегация детонационного наноалмаза (ДНА) может быть проведена после низкотемпературного отжига на воздухе [1] или в атмосфере молекулярного водорода [2]. Гидрозоли ДНА — многообещающие субстанции для медицинских и биотехнологических систем из-за малых размеров, безвредности и способности деагрегированных частиц ДНА присоединять и переносить различные молекулы и функциональные группы [3].

Мы провели всестороннее исследование структуры и химического состава наноалмазов деагрегированных после отжига в водороде или кислороде методами XPS, NEXAFS и FTIR. Кроме того, оба наноалмаза подверглись отжигу в высоком вакууме с повышением температуры. Несмотря на различия в химическом составе оба типа ДНА частиц демонстрируют следы формирования  $sp^2$ -фазы при существенно низких температурах (420 °С и выше). Эта температура значительно ниже той, что была опубликована ранее [4]. Это низкотемпературное формирование  $sp^2$ -фазы может лежать в основе обоих существующих процессов термической деагрегации ДНА (в атмосферах водорода и кислорода).

Кроме того, оба наноалмаза, а также исходный очищенный ДНА были подвергнуты ожигу в вакууме при различных условиях. Влияние этого процесса на свойства поверхности ДНА были изучены методиками FTIR и DLS.

Мы полагаем, данные о химическом составе обоих типов деагрегированных наноалмазов могут открыть новые пути применения этого уникального материала.

Это исследование было частично поддержано РФФИ (проект 14-12-00795).

#### Список литературы

1. Aleksenskii A., Eydelman E., Vul', A. Deagglomeration of detonation nanodiamonds, *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, 3, 68 (2011);
2. Williams O., Hees A., Dieker C., Jager W., Kirste L. Nebel C. Size-dependent reactivity of diamond nanoparticles, *ACS Nano*, 4, 4824 (2010);
3. Vul' A.Ya., Dideikin A. T., Aleksenskiy A.E., Baidakova M. V. Detonation Nanodiamonds. Synthesis, Properties and Applications. In: «Nanodiamond» Ed. Oliver A Williams, RSC Press pp. 27 — 48 (2014);
4. Petit, T., Arnault, J. C., Girard, H. A., Sennour, M., & Bergonzo, P. Early stages of surface graphitization on nanodiamond probed by X-ray photoelectron spectroscopy. *Physical Review B*, 84(23), 233407 (2011);

## Влияние диссипации на спектр плазмонных резонансов в нанокompозитах металл-диэлектрик

Олехно Н. А.<sup>1,2</sup>, Бельтюков Я. М.<sup>1</sup>, Паршин Д. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбАУ НОЦ НТ

<sup>3</sup>СПбПУ

Эл. почта: olekhnon@gmail.com

Бинарные нанокompозиты, представляющие собой матрицу из диэлектрика или полупроводника с металлическими включениями, обладают рядом интересных оптических свойств, связанных с присутствием в таких системах поверхностных плазмонных резонансов. Неупорядоченные композиты применяются в спектроскопии комбинационного рассеяния и при создании биохимических сенсоров [1], а также для создания оптических фильтров и в устройствах фотовольтаики. Системы с упорядоченным расположением металлических включений рассматриваются как основа для создания оптических метаматериалов [2].

Одна из моделей, широко применяемая для анализа распределения полей и спектральных свойств плазмонных резонансов в неупорядоченных нанокompозитах состоит в сведении уравнений Максвелла для исходного композита к эквивалентной электрической сети в виде решетки, связи которой представляют собой комплексные импедансы [3]. Резонансы в такой сети отвечают плазмонным резонансам в исходном нанокompозите. Как показано нами ранее, в простейшем представлении, когда для описания диэлектрической проницаемости металла используется Друде-модель  $\varepsilon_m = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$ , а проницаемость диэлектрика считается постоянной и равной  $\varepsilon_d$ , металлическим включениям отвечают области решетки, заполненные параллельными контурами из индуктивности  $L_m = 4\pi / a\omega_p^2$  и емкости  $C_m = a / 4\pi$ , где  $a$  — посто-

янная решетки эквивалентной сети,  $\omega_p$  — плазменная частота металла, а диэлектрическим промежуткам — области решетки, заполненные емкостями  $C_d = \varepsilon_d a / 4\pi$ . Ранее в литературе использовалась модель, в которой металлическим участкам сопоставлялись чисто индуктивные связи [4]. Последнее представление верно только в области низких частот  $\omega \ll \omega_p$ .

В данной работе уравнения Максвелла для случая произвольного бинарного нанокompозита, диэлектрические проницаемости компонент которого  $\varepsilon_1(\omega)$  и  $\varepsilon_2(\omega)$  являются произвольными функциями частоты, сведены нами к обобщенной задаче на собственные значения

$$|A_1 + \varepsilon_2(\omega) / \varepsilon_1(\omega) A_2| = 0,$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — матрицы смежности первой и второй компонент композита, дискретизированных на заданной решетке, дополненные по правилу сумм: их матричные элементы  $A_{ij}$  равны 1, если узлы решетки  $i$  и  $j$  соединены связью соответствующего типа, и 0 в противном случае. Диагональные элементы  $A_{ii} = -\sum_j A_{ij}$ . Такое представление позволяет использовать для описания спектра композита произвольные модели диэлектрических функций компонент и устанавливает прямое соответствие между всеми такими задачами: собственные числа задачи определяются только геометрией сети, выраженной в виде матриц  $A_1$  и  $A_2$ , а их связь с резонансными частотами системы задается выражением  $\varepsilon_1(\omega) / \varepsilon_2(\omega)$ , определяемым конкретным видом диэлектрических проницаемостей. Поэтому, достаточно численно исследовать спектры в наиболее простой LC-модели нанокompозитов металл-диэлектрик. Спектральная плотность резонансов в таких сетях с одинаковыми значениями элементов подробно описана в [4], явления, возникающие при учете флуктуаций значений элементов рассмотрены в [5].

Отдельного рассмотрения требует учет диссипации, приводящий к комплексным собственным значениям. В простейшем случае, когда одна компонента композита представляет собой бездиссипативный диэлектрик с проницаемостью  $\varepsilon_d$ , а другая — металл с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega},$$

где  $\gamma$  — обратное время затухания плазмона, связь между частотами собственных мод диссипирующей системы  $\omega$  и частотами тех же мод, но без учета диссипации  $\omega_0$  может быть получена в явном виде и задается выражением

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma}{2\omega_0}\right)^2 + i\frac{\gamma}{2}}.$$

Аналогичные выражения получены при учете поглощения в диэлектрике, однако они имеют более сложный вид.

#### Список литературы

1. Климов В.В., Наноплазмоника, М.: Физматлит, 480 с., 2007;
2. Sarychev A.K., Shalaev V.M., Electrodynamics of metamaterials, World Scientific, 247 p., 2007;

3. Sarychev A.K., Shalaev V.M., Electromagnetic field fluctuations and optical nonlinearities in metal-dielectric composites, *Physics Reports*, 335, 275-371, 2000;
4. Jonckheere Th., Luck J.M., Dielectric resonances of binary random networks, *J. Phys. A*, 31, 3687-3717, 1998;
5. Olekhno N.A., Beltukov Y.M. and Parshin D.A., Resonances in random reactance networks with fluctuating entries, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 572, 012037, 2014;

## **Новый эталон размеров для динамического рассеяния света на основе детонационных наноалмазов**

*Коняхин С. В.<sup>1,2</sup>, Швидченко А. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

<sup>2</sup>СПб АУ РАН

Эл. почта: kon@mail.ioffe.ru

Динамическое рассеяние света является мощным неразрушающим методом для анализа размеров частиц, широко применяющимся в физике, химии, био- и нанотехнологии. Данный метод позволяет получать информацию о размерах частиц и молекул (например, молекул белка) в жидких средах, что чрезвычайно важно в биомедицинских исследованиях. Методом динамического рассеяния света можно измерять размеры частиц в широком диапазоне: от долей нанометров до нескольких микрометров. Однако данный метод имеет и ряд ограничений. Одним из основных ограничений метода (вообще говоря, фундаментальным) является прямая пропорциональность между интенсивностью рассеянного света и квадратом объема частицы, на которой происходит рассеяние. В случае, когда имеется коллоидный раствор с частицами, размеры которых отличаются на порядок, интенсивность рассеянного света от одной крупной частицы будет в миллион раз выше интенсивности рассеянного света от более мелкой частицы. Эта проблема становится наиболее актуальной, когда речь идет об исследовании частиц размером менее 10 нм. Даже крайне малое количество имеющихся в растворе частиц более крупного размера может существенно исказить результаты измерений. Поэтому крайне важно проводить калибровку приборов именно в этом диапазоне размеров частиц (до 10 нм). Однако существующие на данный момент эталоны размеров не позволяют проводить калибровку в этой области. Создание такого эталона позволит более точно определять размеры частиц в указанном диапазоне.

Как известно, распределения частиц по размерам в гидрозолях детонационных наноалмазов оказываются сильно уширенными. Это связано с тем, что в гидрозолях присутствуют как отдельные кристаллиты размером около 4.5 нм, так и их агрегаты. Выделение монодисперсной фракции из частиц размером 4.5 нм химически, при помощи фильтрации или центрифугирования в мягких условиях достигнуто не было. Применение ранее обычных центрифуг не позволяло получить поля, достаточные для выделения монодисперсной 4.5 нм фракции наноалмазов. Применение ультрацентрифуги для фракционирования наноалмазов упоминается в литературе в единственном исследовании, основанном на методе градиента плотности [1], существенно отличающемся от применяемого в данном исследовании дифференциального центрифугирования.

В работе описывается создание и характеристика нового эталона размеров для метода динамического рассеяния света на основе устойчивых гидрозолей частиц детонационного наноалмаза [2], имеющих узкое распределение по размерам в диапазоне от 3 до 8 нм, с использованием метода ультрацентрифугирования. Показано что пригодными для создания эталона являются только химически дезагрегированные ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Существующие на данный момент гидрозолы ультрадисперсных алмазов лазерного синтеза [3] и наноалмазов, полученных размалыванием [4], а также детонационных наноалмазов без предварительной дезагрегации для создания эталона оказываются непригодными. Характеристика полученных образцов эталона ведется при помощи спектрофотометрии, рентгеновской дифракции, а также атомно-силовой микроскопии.

#### Список литературы

1. W. Peng, R. Mahfouz, J. Pan, Y. Hou, P.M. Beaujuge and O.M. Bakr, Gram-scale fractionation of nanodiamonds by density gradient ultracentrifugation, *Nanoscale*, (2013), 5, 5017;
2. Aleksenskiy, A.E., E.D. Eydelman, and A.Ya Vul. «Deagglomeration of detonation nanodiamonds» *Nanoscience and Nanotechnology Letters* 3.1 (2011): 68-74;
3. М.В. Байдакова, Ю.А. Кукушкина, А.А. Ситникова, М.А. Яговкина, Д.А. Кириленко, В.В. Соколов, М.С. Шестаков, А.Я. Вуль, В. Zousman, O. Levinson, Структура наноалмазов, полученных методом лазерного синтеза, *Физика твердого тела*, 2013, том 55, вып. 8, с. 1633;
4. Osawa, Eiji. «Monodisperse single nanodiamond particulates» *Pure and Applied Chemistry* 80.7 (2008): 1365-1379;

## Исследование фотоиндуцированной деградации в тандемных фотопреобразователях на основе a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H

Титов А. С.<sup>1,2</sup>, Абрамов А. С.<sup>1,2</sup>, Андроников Д. А.<sup>1,2</sup>, Емцев К. В.<sup>1,2</sup>,  
Семенов А. Ф.<sup>1,2</sup>, Терукова Е. Е.<sup>1,2</sup>, Яковлев С. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Эл. почта: titovoz@gmail.com

При помощи тонкопленочных фотопреобразователей (ФП) на основе тонких слоев аморфного, a-Si:H, и микрокристаллического,  $\mu$ c-Si:H, гидрогенизированного кремния возможно получить наименьшую стоимость ватта вырабатываемой электроэнергии [1], даже при том, что коэффициент полезного действия ФП на основе кристаллического кремния и материалов A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> в 2–3 раза выше [2, 3]. Это достигается, прежде всего, за счет невысокой себестоимости таких ФП, обусловленной относительной простотой технологией и малым расходом полупроводниковых материалов. Однако, характерной особенностью тонкопленочных ФП с аморфными слоями является фотоиндуцированная деградация — постепенное ухудшение фотоэлектрических характеристик при воздействии солнечного излучения [4]. Повышения эффективности выпускаемых солнечных элементов можно добиться двумя подходами – повы-

шение первоначальной эффективности солнечных элементов и повышение итоговой эффективности за счет уменьшения деградации модулей.

В данной работе решалась задача исследования фотоиндуцированной деградации ФП на основе тандемной структуры a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H с двумя фотоактивными p-n-переходами. Использование 2-х каскадной схемы позволяет увеличить эффективность фотопреобразования за счет увеличения спектральной чувствительности ФЭП, путем использования в качестве поглотителей света материалов с разной шириной запрещенной зоны, а также за счет уменьшения потерь на термализацию фотоносителей вследствие разделения поглощения света разной длины волны на два фотопреобразующих каскада. Исследованные ФП были получены по технологии компании TEL Solar (бывш. Oerlikon Solar), Швейцария, методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. В работе использовались стандартные (базовые) рецепты и рецепты, модифицированные Научно-Техническим Центром тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. Иоффе (НТЦ). В рамках работы проводилась оптимизация степени кристалличности собственного слоя нижнего (микрористаллического) каскада.

Для исследования световой деградации структур из полноразмерных модулей вырезались тестовые образцы ФП размером  $100 \times 100$  мм, в которых методом лазерного скрайбирования выделялась фотоактивная часть размером  $60 \times 66$  мм с площадью открытой поверхности  $37.95 \text{ см}^2$ , состоящая из 10 фотоэлектрических ячеек равной площади, соединенных последовательно. Исследование деградации солнечных элементов происходит на установке исследования световой деградации (LSB), в которых модули непрерывно находятся под искусственным освещением. В практике создания a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H тонкопленочных ФП оценки уровня фотоиндуцированной деградации их фотоэлектрических характеристик проводят при освещенности  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и температуре не более  $50\text{--}60^\circ\text{C}$  с общей продолжительностью облучения не менее 1000 ч [5]. Поскольку очень важно поддерживать определенную температуру для насыщения солнечных ячеек, то выделяемое ими тепло должно рассеиваться равномерно. Для этого в качестве держателя образцов используется алюминиевая пластина с водяным охлаждением.

В ходе испытаний измерены спектральные и вольтамперные характеристики образцов. Анализ полученных результатов показал, что деградация образцов из модифицированных рецептов при облучении солнечным светом значительно уменьшилась при сохранении и даже увеличении первоначальных характеристик модулей относительно базовых рецептов.

#### Список литературы

1. V. Fthenakis, S. Gualtero, R. van derMeulen, H.C. Kim, Comparative Life-cycle Analysis of Photovoltaics Based on Nano-materials: A Proposed Framework, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., v. 1041, p. 25, 2008;
2. M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop, Progr. in Photovolt., Res. Appl., 20, p. 606, 2012;
3. R.R. King, A. Boca, W. Hong, X.-Q. Liu, D. Bhusari, D. Larrabee, K.M. Edmondson, D.C. Law, C.M. Fetzer, S. Mesropian, N.H. Karam., Band-Gap-Engineered Architectures for High-Efficiency Multijunction Concentrator Solar Cells, Proc. 24th EU PVSEC (Hamburg) p. 55, 2009;
4. A. Shah, Thin-film silicon solar cells, EPFL Press, 2010;

5. International Electrotechnical Commission, “Thin film terrestrial photovoltaic (PV) modules — design qualification and type approval.” IEC 61646 ed. 2, Final Draft International Standard, Geneva, Switzerland, 2007;

## Структурные изменения в жидком Ga-In эвтектическом сплаве в условиях наноконфайнмента

Нефедов Д. Ю.<sup>1</sup>, Чарная Е. В.<sup>1</sup>, Haase J.<sup>2</sup>, Michel D.<sup>2</sup>, Кумзеров Ю. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>Univ Leipzig, Fac Phys & Geophys, D-04103 Leipzig, Germany

<sup>3</sup>ФТИ

Эл. почта: iverson89@yandex.ru

Исследования жидкостей в условиях ограниченной геометрии в последнее время представляют значительный интерес. Особенно привлекают внимание исследователей изучение возможностей реализации фазовых переходов в таких системах.

Цель данной работы состоит в исследовании жидкого Ga-In сплава, введенного в опаловую матрицу. Для обоих изотопов галлия были получены экспериментальные данные в температурном диапазоне от 77 до 293 К в магнитных полях 9.4, 11.7 и 17.6 Т на импульсных ЯМР спектрометрах Bruker Avance 400, 500 и 750 МГц. Были проведены измерения времени спин-решеточной релаксации, положения и формы линии.

Кристаллизация эвтектического сплава происходит постепенно. В области температур частичной кристаллизации наблюдаются аномальные эффекты. В частности, в температурном диапазоне от 155 до 143 К появляются 2 компонента линии ЯМР. Обе компоненты соответствуют жидкому сплаву, имеют различные сдвиги Найта и времена релаксации  $T_1$ .

Известно, что в некоторых жидкостях, таких как например вода, наблюдаются фазовые переходы из одной структурной фазы в другую [1]. Tien и др. [2] представили результаты ЯМР измерений, проведенных в переохлажденном Ga в порах опала. Появление двух пиков интерпретировалось как результат существования двух различных жидких состояний галлия в температурном диапазоне от 260 до 220 К. В [3] при помощи метода молекулярной динамики было показано существование перехода от галлия высокой плотности к галлию низкой плотности в условиях переохлаждения.

В данной работе из поведения сдвига Найта галлия в Ga-In сплаве видно, что ЯМР линия расщепляется на 2 компонента. При дальнейшем охлаждении низкочастотная компонента уменьшается и исчезает, что может соответствовать замерзанию сплава в соответствующем состоянии, а высокочастотная компонента становится более интенсивной. Можно сказать, что по мере понижения температуры происходит перекачка интенсивности из низкочастотной компоненты в высокочастотную. Существование двух компонент линии ЯМР свидетельствует о неоднородности электронной системы Ga-In сплава, что согласуется с предположением о структурных изменениях в расплаве.

Список литературы

1. P.H. Poole, F. Sciortino, and H. E. Stanley, Phase-behavior of metastable water, Nature (London), 360, 324-328, 1992;
2. C. Tien, E.V. Charnaya, W. Wang, Y.A. Kumzerov, and D. Michel, Possible liquid-liquid transition of gallium confined on opal, Phys. Rev. B, 74, 024116, 2006;
3. Jara D.A. C., Fontana Michelon M., Antonelli A. and de Koning M., J., Theoretical evidence for a first-order liquid-liquid phase transition in gallium, Chem. Phys., 130, 221101, 2009;

## Исследование слоёв ZnO, полученных методом спрей-пиролиза

Семенова А. А.<sup>1</sup>, Лашкова Н. А.<sup>1</sup>, Матюшкин Л. Б.<sup>1</sup>, Сомов П. А.<sup>2</sup>,  
Максимов А. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

<sup>2</sup>ЗАО «Светлана-Рост»

Эл. почта: anime\_girl\_spb@mail.ru

Оксид цинка ZnO – прямозонный полупроводник n-типа электропроводности с шириной запрещенной зоны 3,38 эВ. Основная структурная модификация – вюрцит [1, 2].

Наноструктуры на основе ZnO применяются в качестве газовых сенсоров [3], прозрачных электродов для различных оптоэлектронных приборов и устройств. Слои оксида цинка могут применяться как зародышевые слои при формировании наностержней оксида цинка [4], так и сами по себе – в качестве активных слоев пьезоэлектрических наногенераторов и солнечных элементов [5].

Формирование пленок ZnO может проводиться различными методами: магнетронное распыление, ионное или молекулярное напыление (SILAR), спрей-пиролиз, золь-гель технология [6, 7], синтез пленок в тлеющем разряде и др.

Одним из наиболее перспективных методов является спрей-пиролиз. Спрей-пиролиз – метод получения порошков и тонких пленок, основанный на термическом разложении раствора, содержащего ионы синтезируемого вещества [8]. Параметрами, влияющими на свойства получаемых пленок, являются температура синтеза, время распыления, расстояние от сопла аэрографа до подложки, давление, состав и концентрация раствора. На электрической плите расположены стеклянные подложки, на которые при помощи пневматического аэрографа производится распыление раствора. Газ-носитель подается при помощи компрессора через воздушный фильтр и регулятор давления. Распыляемый раствор поступает из делительной воронки. Распыляемый раствор содержит дигидрат ацетата цинка  $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$  (10 мл), изопропиловый спирт  $C_3H_7OH$  (30 мл), уксусную кислоту  $CH_3COOH$  (1 мл). Пиролиз раствора проводился на стеклянных и кремниевых подложках при температуре 380-385 °С в течение различного времени (15 с, 30 с, 2 мин., 3 мин., 5 мин., 7 мин., 8 мин. и 36 мин.) при расстоянии от сопла аэрографа до поверхности подложек 30 см. Давление устанавливалось 1,4 бара. Полученные образцы отжигались в течение пяти минут при температуре 500 °С в муфельной печи, после чего проходили процедуру медленного охлаждения до комнатной температуры. В результате были получены



оптически однородные пленки, толщина которых, измеренная методом эллипсометрии, составляла от нескольких нм до 100 нм в зависимости от времени синтеза.

Полученные пленки были исследованы с помощью TESCAN MIRA LMU (растровый электронный микроскоп (РЭМ) при ускоряющем напряжении 10 кВ). На основании РЭМ-данных были определены средние размеры зерен (от 20 до 160 нм) в зависимости от времени синтеза.

Морфологические особенности и параметры шероховатости были исследованы методами атомно-силовой микроскопии (АСМ NTEGRA Thermo NT-MDT). В работе использовались зондовые датчики с алмазоподобным покрытием DCP11, т.к. для проведения исследований материалов с различными свойствами предъявляются специальные требования к рабочим параметрам зондов и методикам на основе АСМ [9]. Проведен сравнительный анализ параметров шероховатости для серии полученных образцов, установлены зависимости средней шероховатости от времени нанесения пленки.

Также с помощью проводящих методик АСМ были изучены электрофизические свойства исследуемых объектов (сканирующая микроскопия сопротивления растекания и силовая микроскопия пьезоотклика).

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 16.2112.2014/К.

#### Список литературы

1. Jagadish C., Pearton S.J., Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures: Processing, Properties, and Applications, Elsevier Science, 2006, p. 589;
2. Ali Z., Kang D.J. // ZnO Nanostructures: Current Status and Future Prospects In: Handbook of Functional Nanomaterials. V.2 Characterization and Reliability. NY: Nova Science Publ. Inc. 461(2014). p.359;
3. Грачева И.Е., Максимов А.И., Мошников В.А., Плех М.Е., Автоматизированная установка для измерения газочувствительности сенсоров на основе полупроводниковых наноконструктов, Приборы и техника эксперимента, №3, с. 143-146, 2008;
4. Бобков А.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Сомов П.А., Тербуков Е.И., Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов, ФТП, т.49 №10, с.1402-1406, 2015;
5. Саченко А.В., Крюченко Ю.В., Бобыль А.В., Костылев В.П., Тербуков Е.И., Богданов Д.А., Панайотти И.Е., Соколовский И.О., Орехов Д.Л., Анализ возможностей реализации высоких значений эффективности фотопреобразования в tandemных гетеропереходных тонкопленочных солнечных элементах, ПЖТФ, т. 41 №10, с.42-49, 2015;
6. Бобков А.А., Исследование микроструктуры и сенсорных свойств наноструктурированных слоев оксида цинка, Молодой ученый, №7, с.115-118, 2014;
7. Сомов П.А., Максимов А.И., Гидротермальный синтез наноструктур оксида цинка, Молодой ученый, №8, с.255-259, 2014;
8. Лашкова Н.А., Максимов А.И., Матюшкин Л. Б., Мошников В.А., Рябко А.А., Сомов П.А., Туленин С.С., Локальные электрофизические свойства проводящих пленок ZnO, Бутлеровские сообщения, т.42 №6, с.48-53, 2015;
9. Пермяков Н.В., Расширение функциональных возможностей зондов атомно-силовых микроскопов электрохимическими методами, Молодой ученый, №12, с.10-14, 2012;

## Сенсоры высоких температур на основе 4H-SiC структур диодов Шоттки

Деменский А. Н.<sup>1</sup>, Ерохин С. Ю.<sup>1</sup>, Краснов В. А.<sup>1</sup>, Шутов С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ

Эл. почта: lab23@ukrpost.net

Диодные сенсоры температуры (ДСТ) относительно давно выпускаются промышленностью и широко применяются в различных сферах деятельности человека [1]. Лидером разработок ДСТ все еще остаются приборы на основе кремния, что не в последнюю очередь связано с технологической освоенностью данного полупроводникового материала. Однако, высокотемпературный предел работы (ТМ) Si ДСТ ограничен невысоким значением ширины запрещенной зоны  $E_g$  (~1,12 эВ, 300 К) и значительной величиной концентрации собственных носителей заряда (~ $10^{10}$  см<sup>-3</sup>, 300 К). Это является причиной быстрого роста токов утечки ДСТ с повышением температуры. Известная концепция совершенствования ДСТ состоит в переходе к разработкам на базе широкозонных полупроводниковых материалов. Одной из альтернатив кремниевым ДСТ могут быть приборы на основе карбидокремниевых структур диодов Шоттки (ДШ) широкозонного политипа 4H-SiC [2], активно разрабатываемых для силовой электроники [3].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния основных физических и электрических параметров структур ДШ на величину ТМ.

Опытные образцы ДСТ изготавливали с применением структур материала 4H-SiC фирмы Cree Inc. Концентрация электронов в n-слое  $n \approx (1...2) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, толщина слоя ~ 10 мкм. Шоттки-контакт n-Si/Ni имел диаметр ~ 250 мкм. Структуры со сформированными контактами герметизировали с помощью гелевой силиконовой композиции.

Нами измерены зависимости прямого падения напряжения на диоде ( $U$ ) от температуры ( $T$ ) среды испытаний при фиксированном токе через диод  $I = I_i$ , т.е.  $U(T, I_i) \mid I_i = const.$ , так называемые термометрические характеристики (ТМХ) ДСТ. Данные характеристики оказались квазилинейными во всем исследованном диапазоне температур (300-550 К). При этом наклон ТМХ к оси температур  $s = dU / dT$ , или токовая термочувствительность, изменяется при варьировании прямого тока через диод. ТМХ такого типа, а соответственно и ВАХ (вольтамперные характеристики), как известно [4], свидетельствуют о доминировании в процессе токопереноса термоэлектронной эмиссии. Основываясь на положениях теории термоэлектронной эмиссии, (см. например [5]), получаем выражения для ТМХ  $U(T, I_i) \equiv U$  и термочувствительности  $s$  в виде

$$U = \frac{\Phi_B}{q} - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{SA^* T^2}{I} \right),$$

$$s = \frac{1}{q} \frac{d\Phi_B}{dT} + \frac{qU - \Phi_B}{qT} - \frac{2nk}{q},$$

где  $\Phi_B$  – высота барьера Ме-полупроводник,  $n$  – фактор идеальности ВАХ диода (в наших экспериментах  $n \approx (0,99 - 1,02)$ ),  $S$  – площадь контакта Шоттки (Ме-

полупроводник),  $A^*$ - постоянная Ричардсона,  $q$  – элементарный заряд,  $k$  – постоянная Больцмана. Приведенные зависимости позволили вычислить значения  $\Phi_B \approx 1,55$  эВ и  $A^* \approx 36$  А/см<sup>2</sup>·К<sup>2</sup>.

Считая, что  $U(T_M) \approx \frac{nkT_M}{q}$ , получим соотношение для теоретического значения ТМ

$$T_M = \frac{\Phi_B}{nk \left( 1 + \ln \frac{SA^*T_M^2}{I} \right)},$$

В таблице приведены значения ТМ и  $s$ , вычисленные по формулам (3) и (2) и соответствующие экспериментальные значения, полученные обработкой ТМХ, снятых при различных значениях прямого тока.

Проведенные нами исследования позволили заключить следующее.

Для реализации ДСТ с высокими значениями ТМ необходимы 4Н-SiC ДШ с высоким потенциальным барьером,  $\Phi_B \geq 1,2$  эВ. В этом случае возможно получить приборы с устойчивым доминированием термоэлектронной эмиссии в процессах токопереноса носителей заряда.

Высокотемпературный предел функционирования ДСТ на основе 4Н-SiC ДШ значительно превосходит аналогичный показатель кремниевых ДСТ и также превышает значения ТМ выпускаемых серийно ДСТ AlGaAs [1, 6]. Этому способствуют как высокие значения ФВ (см. формулу (3)), так и значения  $n$ , близкие к 1 в исследованных ДСТ.

Величины  $s$  ДСТ на основе 4Н-SiC ДШ сопоставимы со значениями  $s$  ДСТ на основе Si и AlGaAs и подчиняются закономерностям, установленным ранее [7, 8]. Однако отметим, что для уточнения зависимостей  $s$  от электрофизических параметров ДСТ на основе 4Н-SiC ДШ необходимо проведение дополнительных исследований.

Таблица

$I, A$	Расчет		эксперимент	
	$T_M, K$	$s, мВ/К$	$T_M, K$	$s, мВ/К$
$10^{-4}$	1071,38	-1,41	971,88	-1,5
$10^{-5}$	934,37	-1,60	861,44	-1,7
$10^{-6}$	828,34	-1,82	768,10	-1,9
$10^{-7}$	749,32	-2,03	725,77	-2,0
$10^{-8}$	678,13	-2,24	657,55	-2,2
$10^{-9}$	618,92	-2,45	602,18	-2,4
$10^{-10}$	569,47	-2,66	553,60	-2,6
$10^{-11}$	527,72	-2,88	512,97	-2,8

Список литературы

1. <http://www.lakeshore.com/Products/Cryogenic-Temperature-Sensors/Pages/default.aspx>;
2. Josan I., Boianceanu C., Brezeanu G. et. al., Extreme environment temperature sensor based on silicon carbide Schottky Diode, Труды Int. Semicond. conf. CAS 2009 IEEE, pp. 525 – 528, 2009;
3. Иванов П.А., Грехов И.В., Ильинская Н.Д. и др., Высоковольтные (3.3 кВ) JBS-диоды на основе 4Н-SiC, ФТП, т. 45, вып. 5, С. 677-681, 2011;

4. Иванов П.А., Грехов И.В., Потапов А.С. и др., Об “избыточных” токах утечки в высоковольтных диодах Шоттки на основе 4H-SiC, ФТП, т. 44, вып. 5, С. 680-683, 2010;
5. Sze S. M., Physics of Semiconductor Devices, WILEY-INTERSCIENCE, 3rd Edition, P. — 154, 2006;
6. Шварц Ю.М., Шварц М.М., Микроэлектронные термодиодные сенсоры экстремальной электроники, Технология и конструирование в электронной аппаратуре, №3, С. 30-33, 2005;
7. Kulish N.R., Shwarts Yu. M., Borblik V.L. et. al., Self-consistent method for optimization of parameters of diode temperature sensors, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, V. 2, N 2. P. 15-27, 1999;
8. Ерохин С.Ю., Краснов В.А., Шварц Ю.М., Шутов С.В., Зависимость предельных характеристик широкозонных диодных сенсоров температуры от параметров полупроводникового материала, Труды XI Межд. конф. Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов. Ч. 2. Курск, С. 325 – 332, 2014;

## **Исследование структурных особенностей CoFe — нанотрубок, полученных методом темплатного синтеза**

*Шлимас Д. И.<sup>1</sup>, Козловский А. Л.<sup>1</sup>, Алешова Н. Е.<sup>1</sup>, Мейримова Т. Ю.<sup>1</sup>, Кадыржанов К. К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ЕНУ им. Л.Н. Гумилева

Эл. почта: Shlimas@mail.ru

В связи с широким применением нанотехнологий в различных областях науки, промышленности, медицины делает актуальным вопрос их получения. Среди огромного количества различных методик получения наноструктур следует отметить метод темплатного синтеза, суть которого заключается в осаждении нужного металла в поры шаблонной матрицы посредством электрохимического осаждения. Данный метод является доступным и практичным, а также позволяет осуществлять контроль за формой, размерами и химическим составом синтезируемых наноструктур [1-3].

Интерес к подобным структурам обусловлен тем фактом, что при достижении некоторого характерного размера хотя бы по одной из трех размерностей (длина, ширина, высота) они приобретают нехарактерные свойства для этого вещества, и отличаются от его свойств в «макромире».

В данной работе рассмотрено получение CoFe — нанотрубок. В качестве шаблонных матриц применялись ПЭТФ мембраны с плотностью пор  $4.0E+07$ , диаметрами пор 400 нм, высота шаблона составляла 12 мкм. Процесс синтеза проводился в потенциостатическом режиме при разности потенциалов от 1.25 В до 2.0 В с шагом 0,25 В из электролита следующего состава:  $CoSO_4 \times 7H_2O$  (110 г/л),  $FeSO_4 \times 7H_2O$  (110 г/л),  $H_3BO_3$  (25 г/л),  $C_6H_8O_6$  (3 г/л). Варьирование процентным содержанием железа осуществлялось посредством изменения потенциала осаждения. Исследование структурных особенностей проводилось методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, рентгенодифрактометрического анализа. Оценка толщины стенок осуществляется методами газопроницаемости.

ЭДА анализ позволил установить атомное соотношение кобальта и железа в наноструктурах, осажденных при различных потенциалах, которое для  $U = 1.25$  В составило  $\text{Co}_{31}\text{Fe}_{69}$ , для  $U = 1.5$  В –  $\text{Co}_{35}\text{Fe}_{65}$ , для  $U = 1.75$  В —  $\text{Co}_{38}\text{Fe}_{62}$ , и для  $U = 2.0$  В –  $\text{Co}_{45}\text{Fe}_{55}$ . При увеличении разности потенциалов атомное соотношение металлов в полученных нанотрубках смещается в пользу кобальта, потенциал восстановления кобальта из раствора электролита преобладает над потенциалом восстановления железа.

Изменение атомного соотношения металлов в наноструктурах напрямую влияет на проводящие свойства нанотрубок. Контролируя геометрию пор и элементный состав наноструктур, можно получать нанотрубки с заданными параметрами, которые в дальнейшем применимы в качестве базовых элементов наноэмиттеров.

Данная работа была выполнена в рамках проекта Министерства образования и науки Республики Казахстан, № 45 от 12. 02.2015 г.

#### Список литературы

1. J.C. Hulteen, C.R. Martin J. Mater. Chem. 1997, V.7, p.1075;
2. S.K. Chakarvarti, J. Vetter. Radiation Measurments, 1998, V.29, p.149-159;
3. L. Piraux, S. Dubous, S. Demoustier-Champagne. Nuclear Instr. Meth. Phys. Res.1997, V.B 131, p.357;

## **ЯМР исследования сегнетоэлектрического перехода в объемном и наноструктурированном $\text{KN}_2\text{PO}_4$**

Ускова Н. И.<sup>1</sup>, Барышников С. В.<sup>2</sup>, Подорожкин Д. Ю.<sup>1</sup>, Чарная Е. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>БГПУ [Благовещенский педагогический университет], АмГУ [Амурский государственный университет]

Эл. почта: yskoval6@mail.ru

В данной работе изучалось влияние размерного эффекта на температуру структурного фазового перехода в дигидрофосфате калия (KDP) методом ЯМР. В качестве объектов исследования были использованы следующие образцы  $\text{KN}_2\text{PO}_4$ : объемный поликристаллический образец,  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  внедренный в пористое стекло с размером пор 7-8 нм и  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  внедренный в мезопористую силикатную матрицу MCM-41 с размером пор 3,7 нм.

Исследовались температурные зависимости положения и формы линий в диапазоне от 290 до 100 К. Положение линии ЯМР резко меняется при изменении структуры KDP для объемного образца и KDP в порах MCM-41. Это позволило определить температуру сегнетоэлектрического фазового перехода. Для заполненного пористого стекла значительное изменение положения линии не было выявлено. Ниже фазового перехода, с понижением температуры, также наблюдается резкое увеличение ширины линии для объемного образца и KDP в порах MCM-41. Кроме того, ниже фазового перехода появляется асимметрия формы линии, обусловленная изменением при фазовом переходе анизотропной составляющей тензора химического сдвига. Исходя из аппроксимации формы линии, рассчитаны изотропная и анизотропная части тензоров химического сдвига, фактор асимметрии. Выявлены различия в ха-

рактуре температурных зависимостей между объемным образцом и KDP, внедренным в пористую матрицу MCM-41.

Показано, что изотропная составляющая тензора химического сдвига не изменяется при фазовом переходе. Однако между изотропными сдвигами для объемного образца и наночастиц в порах MCM-41 имеется разница около 3 ppm. Скачок анизотропной составляющей тензора химического сдвига для объемного образца и KDP в порах MCM-41 происходит при температуре около 122 К, но для KDP в порах MCM-41 ниже точки фазового перехода с понижением температуры анизотропия химического сдвига возрастает медленнее, чем для объемного образца, что свидетельствует о размытии фазового перехода в условиях наноконфайнмента.

## Исследование влияния термического отжига на проводящие свойства Zn-нанотрубок

Мейримова Т. Ю.<sup>1</sup>, Козловский А. Л.<sup>1</sup>, Алешова Н. Е.<sup>1</sup>, Шлимас Д. И.<sup>1</sup>,  
Кадыржанов К. К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЕНУ им. Л.Н. Гумилева

Эл. почта: tanay\_91@mail.ru

В последние годы огромный интерес проявляется к использованию различных трековых мембран в качестве шаблонных матриц для формирования одномерных наноструктур из различных металлов и сплавов в виде нанопроволок и нанотрубок. Одним из наиболее популярных и перспективных методов получения наноструктур является метод электрохимического осаждения, основанный на использовании пористых материалов, в нашем случае – трековых мембран на основе ПЭТФ. Интерес к данному методу обусловлен его относительной простотой и доступностью. Одним из главных достоинств электрохимического осаждения является возможность контролировать геометрическую форму и размеры получаемых массивов, а также широкий спектр материалов, которые могут быть использованы в данной методике [1-4].

В данной работе представлены результаты исследований металлических Zn – нанотрубок, полученных путем электрохимического осаждения в шаблонные матрицы, в качестве которых использовались трековые мембраны на основе ПЭТФ с плотностью пор  $4.0E+07$ , диаметрами пор 400 нм, высота шаблона составляла 12 мкм. Процесс осаждения проводился в потенциостатическом режиме при разности потенциалов 1.75 В. Раствор электролита:  $ZnSO_4 \times 7H_2O$  (360 г/л),  $NH_4Cl$  (30 г/л),  $NaC_2H_3O_2 \times 3H_2O$  (15 г/л),  $C_6H_8O_6$  (120 г/л). Исследование структурных особенностей проводилось методами растровой электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, рентгенодифрактометрического анализа. Анализ ЭДА спектров выявил, что нанотрубки состоят на 99,5 % из цинка, в структуре не наблюдается оксидных соединений, 0,5% соответствовало примеси золота, которое использовалось в качестве проводящего слоя, напыленного на шаблонную матрицу перед электрохимическим осаждением. Рентгенодифрактометрическое исследование показало, что исследуемые образцы обладают кристаллической структурой с гексагональной примитивной ячейкой с параметрами кристаллической решетки  $a = 2,6655 \pm 0,0006 \text{ \AA}$  и  $c = 4,9231 \pm 0,0045 \text{ \AA}$ . Размер кристаллитов, рассчитанный по уравнению Шеррера, составил 29,34 нм.

Проведены исследования по определению влияния термического отжига на проводящие свойства полученных наноструктур. Термический отжиг проводился при температуре 200°C в течение 30, 90 и 210 мин. До  $t_{\text{отж}}=90$  мин проводимость наноструктур увеличивается, что связано с изменением дефектной структуры. При  $t_{\text{отж}} > 90$  мин проводимость резко падает, сопротивление нанотрубок возрастает. С увеличением времени отжига, согласно РЭМ – изображениям, наблюдается деградация структуры при  $t_{\text{отж}} > 90$  мин.

Данная работа была выполнена в рамках программы целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан № 561 от 07.04. 2015г.

#### Список литературы

1. Deiss, E.; Holzer, F.; Hass, O. *Electrochim. Acta* 2002, 47, 3995–4010;
2. Wang, J.G.; Tian, M.L.; Kumar, N.; Mallouk, T.E. *Nano Lett.* 2005, 5, 1247–1253;
3. Wang, J.G.; Tian, M.L. *Microsc. Microanal.* 2004, 10, 358–359;
4. Zhu, Y.-C.; Bando, Y. *Chem. Phys. Lett.* 2003, 372, 640–644;

## **Дефектная структура, механические свойства и термостабильность наноструктурного титана, полученного при различных видах прокаток**

*Нарыкова М. В.<sup>1</sup>, Бетехтин В. И.<sup>1</sup>, Кадомцев А. Г.<sup>1</sup>, Колобов Ю. Р.<sup>2</sup>, Sklenicka V.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>2</sup>НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии», г. Белгород

<sup>3</sup>Institute of Physics of Materials AS CR, Brno, Czech Republic

Эл. почта: Maria.Narykova@mail.ioffe.ru

Широкая сфера применения титана обуславливает повышенный интерес к исследованию особенностей структуры этого материала в его высокопрочном нанокристаллическом состоянии. Одной из причин, ограничивающей его применение, является его недостаточная термическая стабильность, поэтому изучение влияния термического воздействия на структуру и свойства нанокристаллического титана является достаточно актуальной задачей [1].

В данной работе представлены результаты исследования дефектной структуры и термической стабильности нанокристаллического (НК) и субмикрокристаллического (СМК) титана ВТ1-0. Измельчение зерна титана до нано- и субмикронных размеров было проведено с применением двух различных методов интенсивной (мегапластической) деформации (ИПД). Первый способ заключался в криопротатке ВТ1-0 при температуре, близкой к температуре жидкого азота [2]. Второй способ ИПД состоял в определенном сочетании поперечно-винтовой и продольной прокаток [3].

Установлено, что в результате криодеформирования происходит сильное измельчение зерен: максимальный размер кристаллитов, имеющих двойниковую природу [2], не превышает 160 nm, а их средний размер составляет 40 nm. При использовании поперечно-винтовой и продольной прокаток средний размер зерна в СМК титане составил 180 nm.

Формирование НК и СМК структур с использованием указанных способов прокаток приводит к значительному (более чем в два раза) повышению предела прочности и текучести по сравнению с исходным состоянием. Но для криодеформированных образцов предел прочности увеличился более заметно – от 420 до 945 МПа, для СМК титана — до 850 МПа. Условный предел текучести составил 860 и 640 МПа соответственно для НК и СМК образцов. Однако при испытаниях на растяжение в режиме ползучести ( $s=200$  МПа,  $T=673$  К) долговечность НК титана оказалась более чем в 3 раза ниже, чем для СМК титана. Пластичность НК титана также оказалась существенно ниже – всего 6% (для СМК структуры — 12.5%).

В данной работе исследовалась микротвердость образцов титана в исходном крупнозернистом, НК и СМК состояниях в широком диапазоне температур и длительности отжига – от 45 минут до 100 часов. В крупнозернистом состоянии микротвердость титана ВТ1-0 составила 1900 МПа, после криодеформирования и поперечно-винтовой прокатки соответственно 2900 и 2700 МПа. Исследование термостабильности показало следующее. Микротвердость НК титана после отжига в течении 10 часов при температурах 573, 673, 773, 973 и 1073 К составила соответственно 2530, 2380, 1720, 1340 и 1350 МПа. Для СМК титана наибольшее падение микротвердости, также, как и для НК, обнаружено при  $T=773$  К. Увеличение продолжительности отжига при всех исследуемых температурах до 100 часов мало повлияло на изменение микротвердости для обоих типов образцов, хотя тенденция к уменьшению микротвердости с ростом времени отжига для НК титана оказалось более заметной, чем для СМК титана.

Анализ данных показал, что ультрамелкозернистое (УМЗ) состояние, сформированное при различных видах прокаток, остается достаточно стабильным при температурах вплоть до 673 К (даже при длительных временах отжига). Стремительное падение микротвердости обнаружено при  $T = 773$  К, когда уже после отжига в течении 1 часа величина микротвердости составляет всего 1720 МПа и становится даже ниже, чем в состоянии поставки, независимо от режима получения (прокатки) и, соответственно, структурных особенностей УМЗ титана – размера зерна, состояния границ и их разориентаций, а также степени дефектности (разуплотнения) материала.

Таким образом, предел прочности и текучести полученного при криопробатке НК титана несколько больше, чем для приготовленного при поперечно-винтовой прокатке СМК титана, однако термостабильность, пластичность и механическая устойчивость (долговечность) СМК титана несколько превышает эти характеристики НК титана. Анализируются возможные причины полученных различий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-12-30010).

#### Список литературы

1. Андриевский Р.А. Термическая стабильность консолидированных металлических наноматериалов. Успехи химии. Т. 83. Вып. 4. С. 365-375. 2014;
2. Москаленко В.А., Бетехтин В.И., Кардашев Б.К. и др. Механические свойства и структурные особенности нанокристаллического титана, полученного при криопробатке. ФТТ. Т.26. Вып. 8. С. 1539-1545. 2014;
3. Бетехтин В.И., Колобов Ю.Р., Sklenicka V. и др. Исследование влияния дефектной структуры на статическую и длительную прочность субмикросталлического титана ВТ1-0, полученного после пластической деформации при винтовой и продольной прокатках. ЖТФ. Т.85. Вып.1. С. 66-72. 2015;



## Технология создания сверхтвердых покрытий на основе тонких пленок $\text{AlMgB}_{14}$

Юзвюк М. Х.<sup>1</sup>, Гришин А. М.<sup>1,2</sup>, Путролайнен В. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПетрГУ

<sup>2</sup>KTH Royal Institute of Technology

Эл. почта: qesada21@gmail.com

Поверхностное упрочнение является одним из способов снижения износа. В настоящее время существует несколько методов упрочнения поверхностей режущих инструментов, среди них наклеп, нанесение антифрикционных покрытий, наплавка, химико-термическая обработка материала и другое. Стоит отметить, что перечисленные способы упрочнения обладают рядом недостатков, таких как тяжелые условия труда, низкая производительность, непостоянство качества наплавленного слоя и т.д.

Одним из главных направлений в области защиты инструмента от износа и сохранения его геометрии при повышенных режимах обработки можно назвать разработку и нанесение износостойких покрытий. Наиболее распространенным на данный момент износостойким покрытием является нитрид титана  $\text{TiN}$ , чье значение твердости достигает 20.1 ГПа по шкале Виккерса.

Одним из перспективных материалов является  $\text{AlMgB}_{14}$ . Твердость этого материала достигает 51 ГПа.

Первые пленки  $\text{AlMgB}_{14}$  были получены методом импульсного лазерного осаждения (PLD) [1]. Однако наиболее перспективным методом получения пленок является метод вакуумного магнетронного распыления, так как он позволяет наносить тонкопленочные покрытия практически любой площади и конфигурации. В связи с этим следующие попытки осаждения пленок  $\text{AlMgB}_{14}$  предпринимались с использованием высокочастотного (RF) магнетронного распыления [2-5]. Несмотря на это, результаты, полученные для пленок, осажденных данным методом, остаются весьма ограниченными.

Целью данной работы является разработка технологии получения сверхтвердого покрытия на основе тонких пленок  $\text{AlMgB}_{14}$  и технологии его нанесения на поверхности различного типа.

Для получения пленок  $\text{AlMgB}_{14}$  используется метод высокочастотного магнетронного распыления с единой мишени, реализуемый на установке AJA Orion 5. Для получения гладкой однородной пленки необходимого стехиометрического состава с определенными свойствами производится подбор параметров напыления: мощности разряда, температуры подложки, расстояния мишень-подложка, рабочего давления и времени напыления. При получении образцов использовались следующие параметры осаждения: мощность разряда – 50 – 200 Вт, температура подложки – 200 – 400°C, расстояние мишень-подложка – 10 – 30 мм, давление 2 – 5 мТорр, время напыления – 30 мин – 1 час.

Для контроля шероховатости и стехиометрического состава используются соответственно оптическая и электронная микроскопия с энергодисперсионным анализом. Результаты показывают, что полученные на данном этапе пленки неоднородны и не обладают необходимым стехиометрическим составом: помимо основных составляющих – Al, Mg и B – в состав пленки входят посторонние элементы, такие как C, N, O.

Для получения надежных характеристик прочности в полученных тонких пленках были проведены измерения нанотвердости и модуля Юнга.

Измерение нанотвердости производится на настольном нанотвердомере NHT2-TTX методом Оливера-Фарра. Максимальная нагрузка при наноиндентировании для одного из последних образцов составляла 20 мН, время приложения нагрузки и ее снятия – 30 с, длительность выдержки под нагрузкой – 0 с, индентор был выполнен в виде алмазной пирамиды Берковича. Образец продемонстрировал значение нанотвердости, достигающее 37-39 ГПа, модуль упругости – 245-270 ГПа, индекс пластичности достигает значения 0.14 и выше. Считается, что чем больше индекс пластичности, тем большей износостойкостью обладает материал [6].

Таким образом, на данном этапе работы получены образцы пленок  $\text{AlMgB}_{14}$ , исследован их стехиометрический состав и получены результаты измерения нанотвердости. Планируется дальнейшая оптимизация параметров получения пленки с точки зрения улучшения основных характеристик и отработка технологии нанесения получаемых покрытий на поверхности различного типа.

#### Список литературы

1. Tian Y., Bastawros A.F., Lo C. C. H., Constant A.P., Russell A.M., Cook B.A., Superhard self-lubricating  $\text{AlMgB}_{14}$  films for microelectromechanical devices, *Appl. Phys. Lett.*, 83, 2781, 2003;
2. Wu Z., Bai Y., Qu W., Wu A., Zhang D., Zhao J., Jiang X., Al–Mg–B thin films prepared by magnetron sputtering, *Vacuum* 85, 541–545, 2010;
3. Yan C., Zhou Z.F., Chong Y.M., Liu C.P., Liu Z.T., Li K.Y., Bello I., Kutsay O., Zapfen J.A., Zhang W.J., Synthesis and characterization of hard ternary  $\text{AlMgB}$  composite films prepared by sputter deposition, *Thin Solid Films* 518, 5372, 2010;
4. Liu W., Meng Q.-S., Miao Y., Chen F.-H., Hu L.-F., Preparation and characterization of Al-Mg-B thin films by magnetron sputtering, *Adv. Mat. Res.* 465, 112, 2012;
5. Grishin A.M., Khartsev S.I., Böhlmark J., Ahlgren M., Ultra-hard  $\text{AlMgB}_{14}$  coatings fabricated by RF magnetron sputtering from a stoichiometric target, *Pis'ma v ZhETF*, vol.100, iss.10, pp.766–773, 2014;
6. Штанский Д.В., Кулинич С.А., Левашов Е.А., Moore J.J., Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок, *Физика твердого тела*, том 45, вып. 6, с 1122–1131, 2003;

## Исследование деформации монокристаллов $\text{SrTiO}_3$ и $\text{BaTiO}_3$ вследствие обратного флексоэлектрического эффекта

Румянцева Е. Д.<sup>1</sup>, Залесский В. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: oed1990@gmail.com

Исследован характер неоднородной деформации тонких монокристаллических пластин  $\text{SrTiO}_3$  и  $\text{BaTiO}_3$  при приложении однородного электрического поля. Интерференционным методом определен вид неоднородной деформации (изгиб, прогиб). Проведена оценка величины обратного флексоэлектрического тензора.

В  $\text{BaTiO}_3$  показано, что на характер неоднородной деформации влияет доменная структура кристалла. В  $\text{SrTiO}_3$  обнаружена деформация прогиба и показан ее гистерезис в зависимости от поля. Гистерезис обусловлен механической релаксацией. Флексоэлектрический эффект отражает взаимосвязь между поляризацией диэлектрика и неоднородной деформацией (градиентами деформации) диэлектрического кристалла [1]. Этот электромеханический эффект впервые экспериментально установлен группой Э.В. Бурсиана в тонких монокристаллических пластинах  $\text{BaTiO}_3$  [2, 3]. Исследования в этой области представляют интерес для интегральной микроэлектроники и для разработки устройств микроэлектромеханических систем (см. обзор [4]). Прямой флексоэлектрический эффект представляет собой линейный полярный отклик на градиент деформации кристалла или нанопленки. Менее изучен обратный флексоэлектрический эффект, при котором поляризация внешним электрическим полем вызывает неоднородную деформацию [2-5]. Обратный флексоэлектрический эффект может быть в первом приближении описан тензором четвертого ранга. Одной из главных задач в области флексоэлектричества является определение флексоэлектрических коэффициентов и их зависимости от основных термодинамических параметров. Обратный флексоэлектрический эффект в кристаллах  $\text{BaTiO}_3$  должен сопровождаться искажением элементарной ячейки с симметрией  $4/m\bar{m}m$  в симметрию  $4mm$ , т.е. изначально тетраэдрическая (или кубическая) ячейка должна переходить в ячейку в виде усеченной пирамиды [2]. Для протяженного кристалла такая геометрия должна приводить к другому виду неоднородной деформации — деформации прогиба. В большинстве экспериментальных флексоэлектрических измерениях рассматривается деформация изгиба [2-5], при этом более сложные виды деформаций не изучались. В настоящей работе с помощью микроскопа-интерферометра более детально исследована неоднородная деформация (деформация изгиба и прогиба) при поляризации внешним полем для классического сегнетоэлектрика  $\text{BaTiO}_3$  и родственного пьезоэлектрического материала  $\text{SrTiO}_3$ . Получены зависимости неоднородной деформации от прикладываемого поля и оценены величины обратных флексоэлектрических коэффициентов. В неполяризованном монокристалле  $\text{BaTiO}_3$  обнаружена сложная деформация изгиба, существенно зависящая от доменной структуры. Поляризация внешним полем  $\text{BaTiO}_3$  приводила к другому виду деформации – прогибу. Такая же деформация наблюдалась в  $\text{SrTiO}_3$ . При этом обнаружена релаксация деформации и измерены ее параметры.

#### Список литературы

1. Коган Ш.М., Пьезоэлектрический эффект при неоднородной деформации и акустическое рассеяние носителей тока в кристаллах, Физика Твердого Тела, 5, 2829-2831, 1963;
2. Бурсиан, Э.В., Нелинейный кристалл титанат, М.: Наука, 296, 1974;
3. Бурсиан Э.В., Зайковский О. И., Макаров К.В., Поляризация сегнетоэлектрической пластины изгибом, Изв. АН СССР. Сер. физ., 33, 1098-1101, 1969;
4. Zubko, P., Catalan, G., and Tagantsev, A., Flexoelectric Effect in Solids, Annual Review of Materials Research, 43, 387-421, 2013;
5. Залесский В.Г., Румянцева Е.Д., Обратный флексоэлектрический эффект в монокристалле  $\text{SrTiO}_3$ , Физика Твердого Тела, 56, 1301-1303, 2014;

## **Кристаллизация пленок аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) при облучении фемтосекундными лазерными импульсами**

*Петров М. А.*<sup>1,2</sup>, Белик В.П.<sup>1</sup>, Васютинский О.С.<sup>1</sup>, Кукин А.В.<sup>1</sup>, Попов Р.С.<sup>1,2</sup>,  
Теруков Е.И.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф.Иоффе

<sup>2</sup>СПбПУ

<sup>3</sup>ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе»

Эл. почта: petrovichml@list.ru

Кристаллизация аморфного гидрогенизированного кремния, широко используемого в тонкопленочной солнечной энергетике, позволяет существенно улучшить стабильность и КПД солнечных элементов. Одним из методов кристаллизации, который продолжает исследоваться и совершенствоваться, является облучение аморфного кремния импульсными лазерами [1, 2]. В настоящей работе исследовалась возможность кристаллизации пленок a-Si:H при облучении импульсами фемтосекундного лазера.

Использованный в работе перестраиваемый титан-сапфировый лазер Mai Tai HP (Spectra Physics) имел следующие характеристики: рабочий спектральный диапазон 690 – 1040 нм, длительность импульса 80 фс, частота повторения импульсов 80МГц. Средняя мощность лазерного пучка имела максимальное значение 2,3 Вт на длине волны 800 нм и плавно уменьшалась к краям диапазона (1,3 Вт на 700 нм и 0,8 Вт на 1000 нм).

Данным лазером, входящим в состав экспериментального стенда, облучались образцы с пленкой a-Si:H толщиной 100 нм, нанесенной на стеклянную пластину. Излучение лазера фокусировалось на образец сферической линзой с фокусным расстоянием 70 мм, что позволяло получать облученное пятно в фокусе размером 21 мкм. Распределение плотности энергии в фокусном пятне имело гауссовскую форму, соответствующую пространственной моде TEM<sub>00</sub>. В процессе исследования варьировались следующие характеристики облучения образца: длина волны лазерного излучения, мощность лазерного пучка, размер фокусного пятна, время экспозиции.

На выходе из лазера лазерный пучок проходил через ослабитель/светоделиитель, состоящий из кристаллического поляризатора (призма Глана) и полуволновой фазовой пластинки. Отношение интенсивностей отраженного и прошедшего через поляризатор пучков могло плавно варьироваться вращением полуволновой пластинки без изменения остальных параметров пучков, что позволяло изменять плотность энергии пучка на поверхности образца.

Время облучения (экспозиция) образца устанавливалась с использованием механизма установки выдержки зеркального фотоаппарата Zenit E, в задней стенке которого было сделано отверстие для выхода лазерного пучка. Механизм позволял устанавливать выдержки (экспозицию) 1/30, 1/60, 1/125, 1/250 и 1/500 секунды, а также произвольную выдержку в ручном режиме.

Облученные образцы исследовались с помощью оптической микроскопии, дававшей информацию о структуре поверхности пленки, а также посредством спектроскопии комбинационного рассеяния с использованием рамановского спектрометра

LabRam HR800. При этом появление пика в рамановском спектре на частоте  $520 \text{ см}^{-1}$  свидетельствовало об образовании кристаллического кремния.

Результаты проведенных исследований продемонстрировали возможность кристаллизации тонких пленок аморфного кремния под действием фемтосекундных импульсов лазера. Показано, что эффект кристаллизации аморфного кремния носит ярко выраженный пороговый характер, зависящий от величины плотности энергии в импульсе. При установлении плотности энергии в импульсе на 1–2 % меньше порога, образование кристаллического кремния не наблюдалось независимо от величины времени облучения.

Также установлено, что величина пороговой плотности энергии в импульсе зависит от длины волны излучения лазера. На длине волны 800 нм пороговая плотность энергии составляла  $1,6 \text{ мДж/см}^2$ , на 750 нм —  $1 \text{ мДж/см}^2$ , на длине волны 900 нм пороговой плотности энергии достичь не удалось несмотря на то, что была получена плотность энергии в импульсе  $3,7 \text{ мДж/см}^2$ .

Показано, что область длин волн 740 – 760 нм предпочтительна для получения наиболее качественных результатов кристаллизации аморфного кремния. В этой области длин волн были получены оптимальные параметры излучения лазера, варьируя мощность пучка в пределах 1,5–2 Вт и величину расфокусировки пучка в широких пределах и продемонстрированы зоны облучения с достаточно равномерной кристаллизацией кремния. Данный эффект достигался при величине плотности энергии в импульсе порядка  $(1,5 – 1,6) \text{ мДж/см}^2$ .

#### Список литературы

1. Navak В.К., Gupta М.С, Femtosecond-laser-induced-crystallization and simultaneous formation of light trapping microstructures in thin a-Si:H films., Appl. Phys.A. V.89, P.663-666, 2007;
2. Емельянов А.В., Казанский А.Г., Кашкаров П.К., Коньков О.И., Теруков Е.И., Форш П.А., Хенкин М.В., Кукин А.В., Veresna М., Kazansky P, Влияние фемтосекундного лазерного облучения пленок аморфного гидрогенизированного кремния на их структурные, оптические и фотоэлектрические свойства., Физика и техника полупроводников, том 46, вып. 6, с. 769 – 773, 2012;

## **Разработка системы поточного синтеза полупроводниковых и металлических наночастиц**

*Рыжов О. А.<sup>1</sup>, Матюшкин Л. Б., Мбванче Р. К.*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: o.a.ryzhov@gmail.com

Синтез монодисперсных наночастиц представляет интерес для многих практических применений в силу проявления наночастицами не характерных для объемных тел физических эффектов. Так, нанокристаллы полупроводника могут проявлять перестройку спектров поглощения и люминесценции, связанные с квантоворазмерными эффектами, а в наночастицах металлов реализуются эффекты локализованного плазмонного резонанса. Изменение размера и формы частиц позволяет тонко настраивать резонансную электронную систему наночастиц.

Традиционный синтез монодисперсных наночастиц в химической колбе имеет ряд недостатков, ограничивающих возможность масштабирования подобных систем для промышленных приложений. В предлагаемой работе рассматривается макет установки для синтеза наночастиц в сегментированном потоке жидкость/жидкость [1]. Реактор поточного типа в сравнении с традиционным синтезом в химической колбе способен увеличить скорость синтеза ККТ без существенных отличий в качестве продукта [2]. Кроме очевидного превосходства таких реакторов в крупномасштабном производстве, они обладают рядом дополнительных преимуществ: а) более эффективный контроль тепло- и массопереноса, б) возможность управления скоростью охлаждения, в) лучшая воспроизводимость синтеза, г) более низкий расход реагентов.

В предлагаемом прототипе реактора поточного синтеза можно выделить четыре основных блока: 1) система задания скоростей потоков жидкости-носителя и реагирующих веществ. в виде модулей шприцевых насосов [3], 2) капиллярная система, 3) система контроля температуры, 4) система первичной диагностики фотолюминесценции полупроводниковых наночастиц. Конструкционно сочленение всех элементов установки выполнено при помощи 3D-печати [4]. Управление аппаратным комплексом осуществляется при помощи персонального компьютера с программой, написанной в среде LabVIEW.

Экспериментально продемонстрирована возможность синтеза полупроводниковых (на примере CdSe) и металлических наночастиц (Ag), проявляющих эффект плазмонного резонанса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-15-00324).

#### Список литературы

1. Aleksandrova O.A., Matyushkin L.B., Moshnikov V.A., Ryzhov O.A. A Flow Reactor for Synthesis of Nanoparticles with a System of Optical Diagnostics, Proceedings of the 2015 IEEE North West Russia Section. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. February, 2-4, P. 13, 2015;
2. Nightingale A.M., de Mello J.C. Segmented flow reactors for nanocrystal synthesis, *Adv. Mater.*, V. 25. P. 1813–1821, 2013;
3. Рыжов О. А. Прецизионный шприцевой насос для дозирования микрообъемов, *Молодой ученый*, №11, С. 425-428, 2015;
4. Матюшкин Л.Б., Пермяков Н.В. Применение технологии 3D-печати в обеспечении профессионально ориентированной подготовки кадров в интересах nanoиндустрии, *Биотехносфера*, № 3, С. 38-47, 2013;

## Фрактальный и мультифрактальный анализ наноструктурированных материалов на основе системы Zn-Sn-O

Абрашова Е. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Эл. почта: katabr@mail.ru

Фракталы характеризуют объекты, отличные от идеальных, с точки зрения геометрии. Основной мыслью фрактального представления объектов является их самоподобие, пусть и хаотичное в общем случае, на любом уровне рассмотрения.

Без таких форм представления невозможно адекватное описание геометрических объектов, например, таких как самоорганизующиеся структуры и стохастических процессов.

Фракталы могут быть регулярными и нерегулярными, математическими и физическими. В идеальном случае математический регулярный фрактал обладает бесконечным самоподобием, является инвариантным относительно растяжения или обладает дилатационной симметрией. В реальных ситуациях область применимости фрактальной теории ограничена по размеру сверху и снизу, а также характеризуется введением элемента случайности в алгоритм формирования фрактального множества.

Однако реальные физические объекты не могут быть описаны идеальными математическими регулярными фракталами, так как являются неоднородными, а также имеют ограничения размеров сверху и снизу.

Для получения адекватных характеристик таких систем более разумно использование понятия мультифрактала [1].

В работе проведен анализ поверхности структур материалов на основе системы Zn-Sn-O на предмет границ применимости мультифрактального подхода для прогнозирования появления перколяционного кластера в нанопористых структурах. Образцы в виде наноструктурированных тонких пленок были сформированы методом золь-гель [2, 3]. Изображения поверхности были получены с использованием «полуконтактной» колебательной методики атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью нанолaborатории *NTegra Thermo*. Были проанализированы спектры обобщенных фрактальных размерностей, в частности зависимости хаусдорфовой, инфомационной и корреляционных размерностей от масштаба рассматриваемых изображений. А также был проведен анализ функции мультифрактального спектра на предмет поиска границ применимости подхода, основанного на фрактальном и мультифрактальном анализе исследуемого объекта.

Работа выполнена в рамках госзадания (проектная часть) № 16.2112.2014/К.

### Список литературы

1. С.В. Божокин, Д.А. Паршин, Фракталы и мультифракталы, Уч.пособ., М., Ижевск, 2001, 128с.;
2. А.И. Максимов, В.А. Мошников, Ю.М. Таиров, О.А. Шилова // Основы золь-гель-технологии нанокomпозитов / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007, 260 с.;
3. А.И. Максимов, В.А. Мошников, Ю.М. Таиров, О.А. Шилова // Основы золь-гель-технологии нанокomпозитов / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007, 260 с.;

## Температурная зависимость диэлектрических потерь в композитах на основе полиэтилена и титаната бария

Шатихина И. В.<sup>1</sup>, Кастро Р. А.<sup>1</sup>, Кононов А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>РГПУ им. А.И. Герцена

Эл. почта: shatihina0@mail.ru

Введение мелкодисперсного наполнителя неорганического происхождения существенно модифицирует структуру и свойства полимерных композитов за счет образования граничного нанослоя вблизи частиц наполнителя и межфазных взаимодействий [1]. Это определяет особенности временного распределения локального поля в отдельных областях полимерной системы и температурно-частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости. Целью данной работы явилось установление особенностей температурной зависимости диэлектрических потерь в полимерных композитах на основе полиэтилена и титаната бария, проявления различных фаз сегнетоэлектрической керамики.

Объектом исследования являлись полимерные композиты на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД). В качестве наполнителя использовался порошкообразный титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ . Образцы представляли собой тонкие слои толщиной 0.3 - 0.5 мм и диаметром 20.0 мм. Измерения диэлектрических спектров проводились на спектрометре «Консерт 81» компании Novocontrol Technologies GmbH&Co в интервале температур от 173 до 323 К (точность 0,5 К).

Обнаружено, что внедрение керамики  $\text{BaTiO}_3$  в состав полимера вызывает появление двух максимумов на температурной зависимости диэлектрических потерь в области средних частот и низких частот. При этом положение максимумов зависит от процентного содержания  $\text{BaTiO}_3$ . Для композита с наибольшей концентрацией керамики (20 %), на частоте  $10^3$  Гц, максимумы обнаружены при температурах  $T = 187.5$  К и  $T = 310$  К. Существование двух экстремальных температур может быть связано с фазовыми переходами в титанате бария. В данном случае вероятно речь идет о проявлении структурных особенностей трех фаз: ромбоэдрической, ромбической и тетрагональной [2]. Согласно полученным экспериментальным результатам, наименьшие изменения тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ , наблюдаются при ромбической фазе. Переход от тетрагональной к ромбической фазе при понижении температуры сопровождается резким уменьшением энергии активации обнаруженного процесса диэлектрической релаксации (с 0.80 эВ до 0.55 эВ), а также изменением характера распределения релаксаторов по временам релаксации (от симметричного к несимметричному распределению в рамках приближения Гавриляк-Негами).

Как известно, переход в ромбическую фазу, сопровождается изменением симметрии и диэлектрическими аномалиями. При  $T \approx 273$  К направления и значения смещений атомов скачкообразно изменяются. Атомы Ti и O смещены вдоль одного из 12 эквивалентных в кубической фазе направлений типа  $\langle 110 \rangle$  (диагональ грани ячейки). Элементарная ячейка принимает форму прямого параллелепипеда с высотой  $b$ , в основании которого ромб со сторонами  $a = c$  и тупым углом  $\beta$ , мало отличающимся от  $90^\circ$ . Такая ячейка с осевыми векторами  $a$ ,  $b$  и  $c$  является моноклинной [3]. В этой фазе кристалл относится к ромбической пространственной группе симметрии  $C2/m$ . Смещения атомов такого же порядка величины, что и в тетрагональной фазе. Можно предположить, что обнаруженные закономерности перехода в ромбическую фазу являются следствием существования моноклинной ячейки, и могут быть ис-



пользованы для идентификации моноклинной фазы в других твердых соединениях, содержащих титанат бария.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-02-99476.

#### Список литературы

1. Гефле О.С., Лебедев С.М., Ткаченко С.Н. Поведение полимерных композиционных материалов с наполнителем из сегнетоэлектрической керамики в электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. Т 308 №4. С 64-68. 2008;
2. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов.: Учебник для вузов. 3-е изд. Стер. – СПб.: Изд-во Лань. – 424 с. 2002;
3. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. – М.: Мир. – 555 с.: ил. 1965;

## **Выращивание методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур со слоями оксидов и их исследование методом рентгеновского магнито-циркулярного дихроизма**

*Петрова Ю. Ю.<sup>1</sup>, Сутурин С. М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>БГТУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: angel9932@yandex.ru

Существует большой интерес к оксидам железа, как для фундаментальных, так и для практических соображений. В настоящей работе нами была исследована возможность получения эпитаксиальных слоев оксидов железа ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) на поверхности слоев  $\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Интерес к таким слоям связан с разнообразием физических свойств этих материалов (уникальные биохимические, магнитные, каталитические и др. св-ва), которые делают их пригодными для конкретных технических и биомедицинских приложений. Среди указанных оксидов железа есть как ферримагнитные ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), так и антиферромагнитные материалы ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), как проводящие ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), так и диэлектрические ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) материалы. Тонкие пленки оксидов железа являются частично прозрачными для видимого света. Каждый оксид железа имеет свой цвет (оранжевый, желтый или серый), насыщенность которого зависит от толщины слоя. Метастабильный редко встречающийся полиморф  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$  является ферроэлектриком и мультиферроиком, и, к тому же, обладает уникально высоким полем магнитокристаллической анизотропии. Имея возможность комбинировать слои оксидов железа в одной гетероструктуре на полупроводниковой подложке (в том числе с встроенной квантовой ямой), можно создавать приборы с интересными магнитными, электрическими и оптическими свойствами.

В данной работе рост оксидов железа производился методом лазерной эпитаксии из мишени  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  в атмосфере газов: кислорода, азота или аргона. Разработанный в группе метод трехмерной дифракции быстрых электронов использовался для

контроля кристаллической структуры растущей пленки (левый рисунок). Было показано, что в зависимости от условий роста – температуры подложки, выбора буферного газа, давления в камере — можно эпитаксиально стабилизировать один из четырех оксидов ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Были установлены режимы, при которых пленка одной фазы трансформируется в другую фазу.

Методом магнитооптического эффекта Керра были исследованы кривые намагничивания выращенных пленок. Подтверждено, что слои ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) имеют узкую петлю перемагничивания с коэрцитивным полем 200-400 Э (правый рисунок). В слоях  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$  были измерены широкие петли перемагничивания, природа которых в настоящее время устанавливается. Исследования ферромагнитных и ферроэлектрических свойств слоев  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$  запланированы. Морфология всех пленок была исследована с помощью атомно силовой микроскопии. Подтверждена значительная гладкость поверхности и однородность пленки. Шероховатость (от минимума до максимума) колеблется от 1 до 3 нм на полях в десятки микрон. Следует отметить уникальность получения материала  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$  в виде сплошного слоя. Достигнуты хорошие условия формирования  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$  в диапазоне размеров несколько десятков нанометров. В литературе в основном представлены наночастицы, и лишь в одной работе речь идет о пленках [Gich, M., et al. (2014). *Advanced Materials*, 3(111), 4645–4652. doi:10.1002/adma.201400990].

#### Список литературы

1. R.M. Cornell, U. Schwertmann, *The Iron Oxides*, 29.

## Исследования спинодального распада в образце твердого раствора арсенида-селенида галлия методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей при энергиях вблизи краев поглощения As и Se

Шарков М. Д.<sup>1</sup>, Бойко М. Е.<sup>1</sup>, Бобыль А. В.<sup>1</sup>, Бойко А. М.<sup>1</sup>, Конников С. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: mischar@mail.ioffe.ru

Образец твердого раствора  $GaAs_{0.7}Se_{0.3} / GaAs$ , выращенный методом жидкофазной эпитаксии, был исследован с помощью методики МУРР (малоугловое рассеяние рентгеновских лучей) при энергиях анализирующего пучка 11.89 кэВ и 12.66 кэВ, незначительно превышающих К-края As (11.87 кэВ) и Se (12.65 кэВ), а также при  $\text{Cu } K_{\alpha 1}$ -излучении. На основе полученных данных МУРР показано, что в образце происходит спинодальный распад на отдельные фазовые компоненты GaAs и GaSe.

Сравнение данных МУРР, полученных при разных величинах длины волны, позволило установить связь между размерами и химическим составом, по крайней мере, двух разных типов компонент, формирующих образец  $GaAs_{0.7}Se_{0.3}$ . Было показано, что в образце  $GaAs_{0.7}Se_{0.3} / GaAs$  образуется мозаичная структура. Определены пространственные характеристики и химический состав двух разных типов компонент образца  $GaAs_{0.7}Se_{0.3}$ : GaAs (ячейки размером примерно  $350 \times 350 \times 25$  нм) и GaSe

(ячейки примерно  $350 \times 350 \times 15$  нм). Показано, что исследуемый образец может включать в себя компоненты с линейной геометрией, не содержащие мышьяка.

На примере изучения спинодального распада в соединении  $GaAs_{0.7}Se_{0.3} / GaAs$  продемонстрировано, что методика прикраевого МУРР позволяет изучать доменную структуру образца, устанавливая связь между, с одной стороны, формой и размерами доменов и, с другой стороны, их химическим составом.

## Синтез коллоидных нанокристаллов селенида цинка, легированных марганцем

Никифорова А. В.<sup>1</sup>, Мазинг Д. С.<sup>1</sup>, Александрова О. А.<sup>1</sup>, Мошников В. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

<sup>2</sup>СПбПУ

Эл. почта: [nikiforova.angelina804@gmail.com](mailto:nikiforova.angelina804@gmail.com)

Коллоидные квантовые точки (ККТ) в последнее время привлекают много внимания благодаря своим уникальным оптическим свойствам. Они являются перспективным материалом для оптоэлектроники и биомедицины [1, 2]. При этом активное развитие получили технологии синтеза нанокристаллов на основе халькогенидов металлов, в особенности халькогенидов кадмия. На протяжении уже долгого времени халькогениды кадмия являются материалом, на основе которого синтезируют коллоидные квантовые точки, но по причине того, что кадмий относится к тяжелым металлам с высокой токсичностью, таким как ртуть и свинец, применение таких частиц оказывается ограниченным. В свете расширения области использования КТ замена соединений кадмия более безвредными соединениями цинка может стать решением проблемы токсичности НЧ. Селенид цинка обладает шириной запрещенной зоны 2,7 эВ при комнатной температуре, и нанокристаллы на его основе характеризуются яркой люминесценцией в фиолетовой и синей областях спектра. Как и в случае с частицами селенида кадмия эффективность излучения может быть повышена за счет нанесения оболочки более широкозонного сульфида цинка.

Диапазон излучения ККТ на основе селенида цинка может быть расширен до желтой и оранжевой областей спектра путем внесения легирующей примеси марганца. Такие структуры вызывают дополнительный интерес в связи с магнитными свойствами, которые возникают вследствие легирования [3], а также другим характером излучения. Помимо большого Стоксова сдвига, фотолюминесценция легированных нанокристаллов халькогенидов цинка отличается большими временами жизни и повышенной термостабильностью [4].

В данной работе ККТ селенида цинка были синтезированы инъекционным методом в водной и органической средах. Для синтеза в водной среде меркаптокислоты использовались в качестве стабилизатора и комплексообразователя, водорастворимые соли – в качестве источников цинка и селена. Органический синтез был произведен в неполярной некоординирующей среде октадецена с использованием элементарного селена и солей жирных кислот в качестве анионного и катионного прекурсоров соответственно. Легирование осуществлялось одновременно с нуклеацией нанокристаллов. Также были синтезированы ККТ со структурой ядро – оболочка (в качестве ядер выступали легированные нанокристаллы селенида цинка, а в качестве оболочки – сульфид цинка). ККТ были исследованы методами спектроскопии поглоще-

ния и фотолюминесценции. По итогам серии опытов получены образцы, характеризующиеся краем поглощения около 400 нм, фотолюминесценцией с максимумом в пределах длин волн 585 – 600 нм и полушириной пика в диапазоне от 57 до 100 нм.

Исследования выполнены в рамках гранта Российского научного фонда (проект №14–15–00324).

#### Список литературы

1. Мусихин С.Ф., Александрова О.А., Лучинин В.В., Максимов А.И., Матюшкин Л.Б., Мошников В.А., Полупроводниковые коллоидные наночастицы в биологии и медицине, Биотехносфера, № 5–6, С. 40–48, 2012;
2. Мошников В.А., Александрова О.А., Дробинцева А.О., Кветной И.М., Крылова Ю.С., Мазинг Д.С., Матюшкин Л.Б., Мусихин С.Ф., Полякова В.О., Рыжов О.А., От лазерной оптической микроскопии до флуоресцентной микроскопии высокого разрешения, Коллоидные квантовые точки — биомаркеры в поисковых научных исследованиях, Биотехносфера, № 6, С. 16–30, 2014;
3. Jing L., Ding K., Kershaw S.V., Kempson I.M., Rogach A.L., Gao M., Magnetically engineered semiconductor quantum dots as multimodal imaging probes, *Adv. Mater.*, Vol. 6, P. 6367–6386, 2014;
4. Pradhan N. and Peng X., Efficient and Color-Tunable Mn-Doped ZnSe Nanocrystal Emitters: Control of Optical Performance via Greener Synthetic Chemistry, *J. Am. Chem. Soc.*, № 129 (11), P. 3339–3347, 2007.

## Эффекты резистивного переключения в композитных плёнках полимер-частицы графена (оксида графена)

*Крылов П. С.<sup>1,2</sup>, Берестенников А. С.<sup>1,2</sup>, Алёшин А. Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбАУ НОЦ НТ

Эл. почта: alapaulus@gmail.com

За последние годы было получено большое количество органических и гибридных (органика-неорганика) материалов, обладающих эффектом резистивного переключения, которые могут применяться для создания гибких ячеек памяти [1]. В большинстве работ в качестве гибридных материалов для резистивной памяти использовались композиты полимеров с полупроводниковыми или металлическими частицами [2]. В последнее время графен из-за своих уникальных электрических свойств, таких как возможность реализации эффективного (вплоть до баллистического) транспорта носителей заряда при комнатной температуре и высокая подвижность носителей, рассматривается как перспективный материал для использования в электронных устройствах. В частности, композитные материалы на основе графена, а также его производной – оксида графена (GO), могут использоваться для создания ячеек резистивной энергонезависимой памяти.

В настоящей работе нами исследовались эффекты резистивного переключения и памяти в композитных плёнках на основе полифункциональных полупроводниковых полимеров – производных карбазола (PVK) и флуорена (PFD), а также диэлектрического полимера – поливинилхлорида (PVC), и частиц графена и GO. Полимеры

использовались в качестве матриц, в которую были заключены частицы. Вольт-амперные характеристики композитных слоёв снимались на постоянном токе при комнатной температуре в сэндвич геометрии (с верхним Al и нижним ITO электродами). Эффект памяти для таких структур состоит в резком изменении проводимости: при подаче определённого напряжения на электроды образец переходит из низкопроводящего состояния («выключено») в высокопроводящее («включено»).

При переключении наблюдалось резкое, на 2-3 порядка, увеличение тока через образец. Образец остаётся в высокопроводящем («включённом») состоянии при приложении обратного напряжения, при многократном сканировании как при положительном, так и при отрицательном смещении на электродах, и также не падает в низкопроводящее состояние с течением длительного времени. Это означает, что для таких структур реализуется энергонезависимая одноразовая память (write once read many – WORM). Напряжение переключения для исследованных нами образцов в среднем на порядок ниже, чем пороговые напряжения для подобных композитов, полученные в других работах [1]. Эффект переключения наблюдался и при освещении образцов «белым» светом.

Механизм резистивного переключения в системе полимер-частицы графена (GO) до конца не выяснен. По аналогии с работой [3] мы полагаем, что возникновение проводящего канала между нижним и верхним электродами связано с присутствием вакансий кислорода, а также электронных ловушек в частицах графена и GO, формирующих проводящий канал. Присутствие вакансий кислорода в частицах GO, а также графена (наличие вакансий кислорода в нём связано с тем, что он был получен путём высокотемпературного восстановления из GO) может указывать на частичное восстановление частиц GO, и в связи с этим на преобладание  $sp^2$ - над  $sp^3$ -гибридизацией, что может приводить к возникновению проводящего канала в плоскости графена (GO). Частицы графена и GO работают в качестве ловушек для инжектированных из электродов носителей заряда, которые создают локальное электрическое поле внутри композитного слоя, приводящее к изменению проводимости плёнки [4]. Рассмотренный нами эффект переключения в данных материалах позволяет создавать на основе таких структур одноразовые ячейки памяти с электрической записью информации, а также полевые транзисторы [5].

#### Список литературы

1. Wen-Peng Lin, Shu-Juan Liu, Tao Gong, Qiang Zhao, Wei Huang, Polymer-Based Resistive Memory Materials and Devices, *Advanced Materials*, 26, 570-606, 2014;
2. T.A. Skotheim, J.R. Reynolds, *Handbook of Conducting Polymers*. 3rd ed. CRC Press, NY. P.620., 2007;
3. D. Joung, A. Chunder, L. Zhai, S.I. Khondaker, Space charge limited conduction with exponential trap distribution in reduced graphene oxide sheets, *Applied Physics Letters*, 97, 093105, 2010;
4. П.С. Крылов, А.С. Берестенников, А.Н. Алешин, А.С. Комолов, И.П. Щербakov, В.Н. Петров, И.Н. Трапезникова, Эффекты переключения и памяти в композитных пленках полупроводниковых полимеров с частицами графена и оксида графена, *ФТТ*, 8, 1639-1644, 2015;
5. Andrey N. Aleshin, Igor P. Shcherbakov, Alexei S. Komolov, Vasily N. Petrov, Irina N. Trapeznikova, Poly(9-vinylcarbazole)-graphene oxide composite field-effect transistors with enhanced mobility, *Organic Electronics*, 16, 186-194, 2015;

## Оптическая визуализация тонких пленок графена на прозрачных подложках

Рабчинский М. К.<sup>1,2</sup>, Дидейкин А. Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>БГТУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: maxhaer@mail.ru

С момента своего открытия в 2004 году, графен, представляющий собой двумерную кристаллическую решетку атомов углерода, до сих пор остается одним из наиболее интенсивно исследуемых наноматериалов вследствие его уникальных свойств [1, 2]. На сегодняшний день разработаны различные методики его получения — методом механического расщепления, жидкофазным расслоением, методом химического осаждения из газовой фазы и др. [3, 4]. С развитием данных методов, важным становится визуализация полученного материала и определения его структурных особенностей — наличие дефектов, количество слоев, размеры пленки и др. Это возможно с использованием таких методов как Сканирующая Электронная Микроскопия (SEM), Атомно-Силовая Микроскопия (АСМ) или Рамановская спектроскопия; однако данные методики довольно сложны и требуют специальной подготовки исследуемого образца. С другой стороны, быстрым, простым в исполнении и достаточно эффективным методом визуализации графеновых пленок является оптическая микроскопия [5, 6], которая, несмотря на простоту, также требует использования специально сформированной подложки.

В данной работе, нами предлагается метод визуализации тонких графеновых пленок, не требующий использования специально подготовленных подложек вида «кремний — оксида кремния» или «кремний — нитрид кремния», позволяющий исследовать образцы графена на доступных оптически прозрачных подложках, в частности — кварце. Предлагаемый метод основан на использовании оптической системы, в которую устанавливается подложка с образцом, и линейно поляризованного излучения подсветки. Совместно, это обеспечивает удаление отражаемого гранями подложки излучения, определяющего величину фона получаемого изображения, за пределы объектива микроскопа, сохраняя при этом неизменной интенсивность излучения, отражаемого графеновой пленкой. При наличии дополнительного экранирования всей схемы от внешнего света, использование данного подхода позволяет получать изображения образцов графена минимальной толщины (менее 5 слоев) с величиной контраста до 30%, что подтверждено проведенными расчетами и полученными экспериментальными данными. В отличие от других методик, данный подход не требует формирования специальной подложки и перемещения на нее исследуемого образца графена, или помещения подложек с образцами в жидкую среду [7], обеспечивая возможность изучения и непосредственной работы с образцами графена (установка контактов, механические воздействия и др.) на широко используемых оптически прозрачных подложках (кварц, сапфир, стекло и др.).

### Список литературы

1. Y.H. Wu, T.Yu, and Z.X. Shen. Two-dimensional carbon nanostructures: Fundamental properties, synthesis, characterization, and potential applications. *J. Appl. Phys.* 108, 071301 2010;

2. K.S. Novoselov, V.I. Falko, L. Colombo, P.R. Gellert, M.G. Schwab & K. Kim. A roadmap for graphene. *Nature*, 490, 192-200 (2012);
3. Cecilia Mattevi, Hokwon Kim, and Manish Chhowalla. A review of chemical vapour deposition of graphene on copper. *J. Mater. Chem.*, 2011, 21, 3324-3334;
4. Daniel R. Dreyer, Sungjin Park, Christopher W. Bielawski and Rodney S. Ruoff. The chemistry of graphene oxide. *Chem. Soc. Rev.*, 2010, 39, 228-240;
5. Inhwa Jung, Jong-Soo Rhyee, Jong Yeog Son, Rodney S Ruoff and Kyong-Yop Rhee. Colors of graphene and graphene-oxide multilayers on various substrates. *Nanotechnology* 23 (2012) 025708;
6. Kim J., Kim F., and Huang J. X. Seeing graphene-based sheets. *Mater. Today*, 2010, 13 28–38;
7. Hugo Gonçalves, Peter Schellenberg, Michael Belsley, Luís Alvesa, Cacilda Moura, Tobias Stauber. New optical techniques to improve the visibility of graphene on multiple substrates. *Proc. of SPIE Vol. 8001 80014G-1*;

## Структурные исследования углеродной пленки с графеновыми включениями

*Михайлина А. А.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: eniaam@list.ru

Повышенный интерес к углероду и материалам на его основе обусловлен разнообразием его аллотропных форм и широкого спектра их ценных свойств для различных отраслей науки и производства. Одним из негативных факторов разработки наукоемких технологий и исследования полученных материалов на основе наноуглерода, является достаточно высокая стоимость исходного сырья и его последующей обработки.

Природный углерод, входящий в состав шунгитовых пород, известен как недорогое сырье для широкомасштабного использования. Практически установлено, что шунгит содержит фуллереновые [1, 2] и графеновые фрагменты [3]. Данный факт открывает возможность создания новых наноструктурированных материалов, обладающих развитой поверхностью и проводящими свойствами.

Целью настоящей работы была проверка применимости технологии получения фуллереновых мембран методом сублимации в термокамере малых размеров [8] к природному углеродному материалу и исследование структурных особенностей мембран нового типа.

В качестве природного углеродсодержащего материала в работе использовался шунгит первой разновидности из месторождения Шуньга (Карелия). Данный материал имеет длительную историю исследования, вследствие чего есть большое количество данных для сравнения [4 – 6]. В последнее время большое внимание уделяется исследованиям шунгитового углерода на наноуровне [7]. Образец мембраны был получен из исходного порошка шунгита на стеклянной подложке, покрытой пленкой  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Исходный порошок шунгита последовательно измельчался с уменьшением дисперсности и промывом дистиллированной водой после каждого этапа измельчения. Показатель уровня pH конечного продукта близок к нейтральному.

На начальном этапе исследования, оценка структуры и дефектности полученного образца была произведена путем анализа спектров комбинационного рассеяния (КР). Регистрация спектров производилась при длине волны излучения 532 нм и ширине спектрального окна от  $100\text{ см}^{-1}$  до  $3500\text{ см}^{-1}$ . Метод КР был реализован на дисперсионном рамановском спектрометре Nicolet Almega XP (Thermo Scientific).

Согласно известным данным [4, 5] для шунгита характерными являются два четко выраженных пика на  $1330\text{ см}^{-1}$  (D-полоса) и  $1600\text{ см}^{-1}$  (G-полоса). Для исследуемого образца волновые числа D- и G-полос составляют  $1369\text{ см}^{-1}$  и  $1589\text{ см}^{-1}$  соответственно.

При сравнении спектра образца с данными для шунгитовых дисперсий [5], был сделан вывод о совпадении спектров по основным пикам, включая инверсию этих пиков как в спектре исследуемого образца, так и в спектре дисперсии. Таким образом, можно предположить, что тип химической связи углерода в исследуемой мембране и углерода в дисперсии не отличается.

Морфологические особенности пленки рассматривались при помощи цветного 3D лазерного сканирующего микроскопа VK-9700K (Keyence). Из анализа полученных на микроскопе снимков и их 3D-проекций был сделан вывод об однородности поверхности полученного образца. Толщина была оценена в 2 мкм.

Оценка элементного состава образца была произведена при изучении на сканирующем электронном микроскопе SU1510 (Hitachi). Также были построены карты распределения химических элементов как вдоль поверхности, так и на ее боковом скеле, уточнена толщина образца (1,5 мкм). При анализе снимков поверхности был сделан вывод о двухуровневой структурной организации. Первый уровень составляют цепочки из частиц  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Между цепочками  $\text{In}_2\text{O}_3$  и на них располагается деформированная графеновая сетка.

Для обоих структурных уровней было построено распределение частиц по размерам, рассчитанное стандартным способом по функции нормального распределения.

Из анализа снимков, полученных с оптического микроскопа, и распределению по размерам, средний размер частиц пленки  $\text{In}_2\text{O}_3$  составляет  $\sim 0,5$  мкм. Средний размер углеродных частиц, составляющих сетку между цепочками  $\text{In}_2\text{O}_3$ , составляет около 70 нм и согласуется с известными данными для водных шунгитовых дисперсий [5].

Представленные результаты свидетельствуют о том, что исследуемый образец представляет собой кристаллический объект с нановключениями, которые, согласно КР спектрам, могут быть идентифицированы как близкие к графеновым структурам.

В дальнейшем планируется произвести термоанализ для анализа фазовых переходов и модификация технологии получения мембран из природного углерода.

#### Список литературы

1. Busek P.R., Tsipursky S.J., Hettich R. Fullerenes from the Geological Environment // Science. 1992. V. 257. P. 215;
2. Коньков О.И., Теруков Е.И., Пфаундер Н. Фуллерены в шунгите / ФТТ, т.36, № 10, 3169-3171, 1994;
3. Рожкова Н.Н., Грибанов А.В. К вопросу об основном структурном элементе шунгитового углерода // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск, 2007. С. 86-89;
4. Голубев Е.А. Электрофизические свойства и структурные особенности шунгита (природного наноструктурированного углерода) // Физика твердого тела. 2013. Т. 55 № 5. С. 995-1002;



5. Рожкова Н.Н. Агрегация и стабилизация наночастиц углерода шунгитов // Экологическая химия. 2012. № 4. С. 240-251.;
6. Шунгиты – новое углеродистое сырье / Под ред. В.А. Соколова, Ю.К. Калинина, Е.Ф. Дюккиева. – Петрозаводск, 1984. – 239 с.;
7. Рожкова Н.Н., Михайлина А.А., Рожков С.С. Наноструктуры шунгитового углерода в природе, дисперсиях и гибридных материалах // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск. 2014. № 17. С. 86 – 93.;
8. Мастеров В.Ф., Приходько АВ., Коньков О.И., Давыдов В.Ю. Способ получения кристаллических фуллеренов // Патент на изобретение РФ от 11.06.97. № 2135648. Оpubл. в БИ. №24. 1999;

## **Исследование электрических свойств и дефектоскопия нанокомпозитов на основе диоксида кремния и полимеров с добавлением углеродных нанотрубок**

*Осокин К. С.<sup>1</sup>, Есеев М. К.<sup>1</sup>, Гошев А. А.<sup>1</sup>, Капустин С. Н.<sup>1</sup>, Хородек П.<sup>2</sup>,  
Кобец А. Г.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Северный Арктический федеральный университет им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт ядерной физики Польской академии наук, Краков, Польша

<sup>3</sup>Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,  
Харьков, Украина

Эл. почта: Oxygen93@ya.ru

Исследование нанокомпозитов с добавлением углеродных нанотрубок с целью функционализации свойств проводится во многих научно-исследовательских центрах [1,2]. В работах [3-5] было проведено исследование функциональных свойств нанокомпозитов с добавлением многослойных углеродных нанотрубок (УНТ) на основе матриц из диоксида кремния. Был обнаружен существенно нелинейный перколяционный характер зависимости диэлектрических свойств (проводимости и комплексной диэлектрической проницаемости) композитов от концентрации наполнителя. Исследование диэлектрических свойств наноматериалов было осуществлено при помощи метода диэлектрической релаксационной спектроскопии. Поверхностные свойства нанокомпозитов были изучены при помощи атомно-силовой и электронной микроскопии. Кроме того, было проведено исследование внутренних свойств образцов при помощи метода позитронной аннигиляционной спектроскопии на установке ЛЕРТА [6] (Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна). В настоящей работе продолжены исследования с нанокомпозитами-полимерами на основе эпокси-дной смолы с учётом ориентации нанотрубок в образцах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии и сопоставление результатов с работами других авторов [7]. На основе полученных результатов предлагаются методы диагностики и контроля функциональных свойств нанокомпозитов.

### Список литературы

1. Eletsii A.V. Carbon nanotubes. *Physiks Uspekhi*, 1997, 40(9), 899–924;
2. Eletsii A.V., Knizhnik A.A., Potapkin B.V., Kenny J.M. Electrical characteristics of carbon nanotube doped composites. *Physiks Uspekhi*, 2015, 58(3), 209–251;

3. A.A. Goshev, M.K. Eseev, S.N. Kapustin, C.S. Osokin Investigation of the dielectric properties of composites based on silicon dioxide with carbon nanotubes // Труды международной конференции «2nd International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2015” on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint–Petersburg, Russia). С. 235-236 (тезисы);
4. M.K. Eseev, A.A. Goshev, P. Horodek, S.N. Kapustin, A.G. Kobets, C.S. Osokin Methods of diagnostics of nanocomposites based on silica-reinforced carbon nanotubes // Book of Abstract «12th International Conference Advanced Carbon NanoStructures ACNS'2015» (Saint-Petersburg, Russia). С. 226;
5. M.K. Eseev, A.A. Goshev, S.N. Kapustin, A.V. Malkov, C.S. Osokin Investigation of the dielectric properties of composites based on silicon dioxide with carbon nanotubes // Journal of Physics: Conference Series, 2015. 5 pp. in print;
6. Sidorin A.A., Meshkov I., Ahmanova E., Eseev M., Kobets A., Lokhmatov V., Pavlov V., Rudakov A. and Yakovenko S. The LEPTA facility for fundamental studies of positronium physics and positron spectroscopy. Materials Science Forum, 2013, 733, 291-296;
7. Chen H. M. Awad S., Jean Y. C., Yang J., James Lee L., Positron annihilation studies in polymer nano-composites. Application of Accelerators in Research and Industry, 2011, 1336, 444-447;

## **Исследование нанопроводов оксида цинка выращенных на золь-гель слоях гидротермальным методом**

*Сомов П. А.<sup>1</sup>, Бобков А. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ЗАО «Светлана–Рост»

<sup>2</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: somovpa@yandex.ru

Оксид цинка в течение многих лет широко применялся в различных научно-технических областях. Но с развитием нанотехнологий наблюдается резкое повышение интереса к данному материалу, на основе которого могут быть созданы новые и обладающие уникальными свойствами наноматериалы [1-4].

Оксид цинка является полупроводником, с шириной запрещенной зоны 3,37 эВ. Кроме того, он имеет большую энергию связи экситонов (60MeV), что позволяет получать интенсивное УФ-свечение в диапазоне температур 373–550 К. Также оксиду цинка присущи пьезо- и пирозлектрические свойства, а, используя особенности кристаллической структуры (три быстрых направления роста и две полярные поверхности), можно эффективно управлять морфологией растущих нанобъектов [5, 6]

Благодаря совокупности все этих факторов, оксид цинка является перспективным материалом для многих направлений, таких как: солнечная энергетика [7], гибкая электроника, катализ[8-9], сенсорики [10], медицина.

Одним из методов получения ограненных нанопроводов оксида цинка, позволяющих эффективно управлять их размерами, является гидротермальный синтез [11]. Данный метод синтеза состоит из двух стадий: нанесения слоя зародышей на подложки различной природы и выращивания наностержней мягким гидротермальным методом.

Целью данной работы было изучение влияния различных зародышевых слоев на морфологию сформированных нанопроводов оксида цинка гидротермальным методом, а также исследование их электрофизических свойств.

В качестве зародышевого слоя использовались пленки нанокompозита оксида цинка и диоксида кремния полученных золь-гель технологией с различным соотношением компонентов. В качестве прекурсора оксида цинка была выбрана неорганическая соль  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ . В среде изопропилового спирта возможно получать гомогенные золи (спирт играет роль растворителя), поэтому соль в заданном соотношении растворяли в изопропиловом спирте посредством ультразвука. Затем в раствор добавляли необходимый объем тетраоксисилана. Полученный раствор созревал в течение 7 дней. После созревания раствор наносили на подложку и центрифугировали (3000 об/мин) в течение 15 с. Далее производили отжиг при температуре  $500^\circ C$  в течение 30 минут. В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния, предварительно химически очищенного от загрязнений, последовательно промытых в ацетоне, изопропиловом спирте и в дистиллированной воде, в ультразвуковой ванне.

Далее на этих подложках выращивались наностержни из растворов  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  и гексаметилентетрамина (ГМТА). Концентрация каждого реагента в растворе, используемом для роста наностержней, составляла 25 ммоль/л. Образцы помещали в раствор и выдерживали в термостате при  $85^\circ C$  в течение 1 часа. По окончании процедуры роста наностержней образцы промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе.

Морфология полученных образцов была исследована методом растровой электронной микроскопии на приборе Tescan Mira. Анализ морфологии показал образование на слоях нанокompозита оксида цинка и диоксида кремния ограниченных одномерных структур оксида.

Были исследованы электрофизические свойства полученных образцов наностержней методом спектроскопии импеданса в воздушной атмосфере и атмосфере паров изопропилового спирта. Полученные данные проанализированы посредством метода эквивалентных схем.

Построенная эквивалентная схема диаграмм Найквиста при наличии паров изопропилового спирта соответствует набору последовательно соединённых параллельных CPE-R цепочек, отвечающих соответствующему количеству неоднородных фаз.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 16.2112.2014/К.

#### Список литературы

1. Крастева Л.К. и др, Синтез и характеристика наноструктурированных слоев оксида цинка для сенсорики, ФТП, С. 564-569, Т. 47. – №. 4, 2013;
2. Божинова А.С. и др, Изучение фотокаталитических и сенсорных свойств нанокompозитных слоев  $ZnO/SiO_2$ , ФТП, Т. 47. – №. 12, С. 1662-1666, 2013;
3. Pronin I.A. et al, Theoretical and experimental investigations of ethanol vapour sensitive properties of junctions composed from produced by sol-gel technology pure and Fe modified nanostructured ZnO thin films, Sensors and Actuators A: Physical., Т. 206, С. 88-96, 2014;
4. Лашкова Н.А. и др, Анализ локальных областей полупроводниковых нанобъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии, НТВ СПбГПУ Физ. Мат. Науки, № 1(213)., С. 31-42, 2015;

5. Klingshirn C.F., Waag A., Hoffmann A., Geurts J, Zinc Oxide, Springer Berlin Heidelberg, 2010;
6. Zhu M.W., Huang N., Gong J., Zhang B., Wang Z.J.; C. Sun; X. Jiang. Applied Physics A: Materials science & Processing, 103, 159–166, 2011;
7. Бобков А.А. и др., Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов, ФТП, Т. 49. – №. 10, 1402-1406, 2015;
8. Пронин И.А., Канева Н.В., Божинова А.С. и др., Фотокаталитическое окисление фармацевтических препаратов на тонких наноструктурированных пленках оксида цинка, Кинетика и катализ, Т. 55. № 2, С. 176, 2014;
9. Божинова А.С., Канева Н.В., Кононова И.Е. и др., Изучение фотокаталитических и сенсорных свойств нанокompозитных слоев ZnO/SiO<sub>2</sub>, ФТП, Т. 47. № 12, С. 1662–1666, 2013;
10. Бобков А.А., Исследование микроструктуры и сенсорных свойств наноструктурированных слоев оксида цинка, Молодой ученый, № 7, С. 115-118, 2014;
11. Сомов П. А., Гидротермальный синтез наноструктур оксида цинка, Молодой ученый, № 8, С. 255-259, 2014;

## **Синтез легированных медью коллоидных нанокристаллов селенида цинка, люминесцирующих в сине-зеленой области спектра**

*Мазинг Д. С.<sup>1</sup>, Чернагузов И. С.<sup>1</sup>, Александрова О. А.<sup>1</sup>, Мошников В. А.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

<sup>2</sup>СПбПУ

Эл. почта: dmazing@yandex.ru

Для некоторых сфер применения коллоидные нанокристаллы ZnSe рассматриваются как более экологичная альтернатива нанокристаллам на основе халькогенидов кадмия [1], которые являются наиболее распространенными материалами для создания коллоидных квантовых точек (КТ), люминесцирующих в видимом диапазоне. Коллоидные КТ относительно широкозонного ZnSe характеризуются люминесценцией в фиолетовой и синей областях спектра. Однако диапазон может быть расширен за счет легирования нанокристаллов ионами переходных металлов, например меди и марганца [2].

В ходе данной работы в водной среде были синтезированы нанокристаллы ZnSe, легированные медью. В качестве стабилизатора была использована меркаптопропионовая кислота. Для увеличения агрегативной устойчивости и повышения эффективности фотолюминесценции полученные ядра пассивировались оболочкой более широкозонного ZnS, с использованием тиомочевины в качестве источника серы. Нанокристаллы проявляют фотолюминесценцию с максимумом в области 470-480 нм и полушириной пика около 95 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-15-00324).

## Список литературы

1. Mazing D.S., Matyushkin L.B., Aleksandrova O.A., Mikhailov I.I., Moshnikov V.A., Tarasov S.A. Synthesis of cadmium selenide colloidal quantum dots in aquatic medium // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 572. P. 012028;
2. Norris D.J., Efros A.L., Erwin S.C. Doped nanocrystals// Science. Vol. 319. № 5871. P 1776-1779;

## Локальное усиление магнитного поля в вакууме с помощью диэлектрических наноструктур

*Барышникова К. В.<sup>1</sup>, Шалин А. С.<sup>1</sup>, Гинзбург П. Б.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ИТМО

<sup>2</sup>Тель-Авивский Университет (Израиль)

Эл. почта: k.baryshnikova@phoi.ifmo.ru

Управление электромагнитными волнами на наномасштабах является важной задачей современной нанофотоники [1, 2]. Наноструктуры различных материалов и форм эффективно взаимодействуют со светом оптического диапазона [3]. Ранее изучались плазмонные наночастицы, способные локализовать электрическое поле вблизи своей поверхности [4]. Частицы из материалов с высоким показателем преломления обладают как электрическим, так и магнитным откликом, однако они локализуют поле преимущественно внутри себя, взаимодействуя со светом как резонаторы [5, 6]. При этом материал частицы может быть немагнитным, а магнитный отклик является результатом наведения кругового тока смещения внутри частицы [7]. Структура магнитного резонанса диэлектрических систем такова, что локализация магнитного поля сохраняется и в отверстии внутри частицы [8]. «Горячие пятна» магнитного поля в свободном пространстве можно эффективно использовать, возбуждая магнитные моменты частиц независимо от электрических, а также управляя движением магнитных диполей по аналогии с электрическими диполями в областях с градиентом электрического поля. В докладе освещается модовая структура магнитных резонансов диэлектрических наноплиндров, анализируется зависимость усиления магнитного поля от геометрических параметров структуры, а также производится оптимизация усиления.

## Список литературы

1. Y. Huang, X. Duan, and C.M. Lieber, Nanowires for Integrated Multicolor Nanophotonics, Small, 1, №1, pp.142-147, 2005;
2. M. Ohtsu, K. Kobayashi, T. Kawazoe, S. Sangu and T. Yatsui, Nanophotonics: Design, Fabrication, and Operation of Nanometric Devices Using Optical Near Fields, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 8, №. 4, pp. 2002;
3. L. Novotny and B. Hecht, Principles of Nano-Optics, Cambridge University Press, 2006;
4. M. Albooyeh and C.R. Simovski, Huge local field enhancement in perfect plasmonic absorbers. Optics Express, vol.20, №20, pp.21888-21895, 2012;
5. A.B. Evlyukhin, S.M. Novikov, U. Zywietz, R.L. Eriksen, C. Reinhardt, S.I. Bozhevolnyi, and B.N. Chichkov, Demonstration of Magnetic Dipole Resonances of Dielectric Nanospheres in the Visible Region, Nano Lett., 12, pp.3749-3755, 2012;

6. J.van de Groep and A.Polman, Designing dielectric resonators on substrates: Combining magnetic and electric resonances, Optics Express, vol.21, №22, pp.26285-26302, 2013;
7. C. F. Bohren, D.R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles. Wiley, 1983;
8. M.I. Bakunov, A.V. Maslov, S.M. Kuznetsova, S.N. Zhukov, Magnetic response of planar dielectric rings, 12, pp. 114-121, 2014;

## **Транспорт носителей заряда в композитных структурах на основе биоцеллюлозы, модифицированной проводящим полимером PEDOT/PSS**

*Берестенников А. С.<sup>1,2</sup>, Крылов П. С.<sup>1,2</sup>, Алешин А. Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup> СПб АУ НОЦ НТ

Эл. почта: alex.nothere@gmail.com

Биополимеры рассматриваются как альтернатива полимерам, синтезируемым из нефти, благодаря их низкой стоимости и способности к биоразложению. Композитные материалы на основе бактериальной целлюлозы (BC), модифицированной электропроводящими полимерами, могут найти применение в органической электронике и медицине [1-2]. Такие материалы перспективны для использования в качестве компонентов «электронной бумаги» и дисплеев на ее основе [3], а также биосовместимых и биоразлагаемых гибких органических светодиодов, использующих биоцеллюлозную мембрану в качестве подложки [4]. В то же время вопросы, связанные с разработкой биосовместимых ячеек памяти, имплантируемых в живую ткань, а также датчиков температуры и других электропроводящих сенсоров на основе биоцеллюлозы и проводящих полимеров, остаются пока слабо исследованными.

В данной работе [5] были получены композитные пленки на основе бактериальной целлюлозы, модифицированные проводящим полимером PEDOT/PSS. Были проведены структурные, оптические и электрические исследования свойств данных композитов. Интенсивность поглощения в пленке BC:PEDOT/PSS характеризуется достаточно однородным поглощением во всем исследованном спектральном диапазоне, включая ближний ИК диапазон. Наблюдаемый характер спектра фотолуминесценции композитной пленки BC:PEDOT/PSS определяется процессами излучательной рекомбинации носителей заряда в BC-компоненте, что хорошо согласуется с характером спектра поглощения.

Транспорт носителей заряда в полимерном комплексе PEDOT/PSS объясняется моделью туннелирования носителей между проводящими кластерами, помещенными в диэлектрическую матрицу [6]. В случае композита BC:PEDOT/PSS, на наш взгляд, механизм транспорта является более сложным и включает в себя как туннелирование носителей между проводящими кластерами полимера (PEDOT), помещенными в диэлектрическую матрицу (PSS), так и туннелирование между отдельными волокнами BC и их жгутами, покрытыми PEDOT/PSS.

Полученные результаты позволяют рассматривать пленки BC, модифицированные проводящим полимерным комплексом PEDOT/PSS, в качестве перспективного материала для биосовместимых температурных сенсоров и электродов для снятия

различных электрических характеристик в режиме реального времени, так как ВС традиционно применяется в медицине как биосовместимый материал.

#### Список литературы

1. I. Siro, D. Plackett, *Cellulose*, 17, 459–494, 2010;
2. D.A. Serqueira, A.J.M. Valente, G.R. Fihlo, H.D. Burrows, *Carbohydr. Polym.*, 78, 402–408, 2009;
3. I. Shah, R.M. Brown Jr., *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 66, 352–355, 2005;
4. C. Legnani, C. Vilani, V.L. Calil et al., *Thin Solid Films*, 517, 1016–1020, 2008;
5. Andrey N. Aleshin, Alexander S. Berestennikov, Pavel S. Krylov, Igor P. Shcherbakov et al., *Synthetic metals*, 199, 147–151, 2015;
6. P. Sheng, *Phys. Rev. B*, 21, 2180–2187, 1980;

## Влияние суперпарамагнитных наночастиц на разделение электромиграционными методами анализа

Федоров А. А.<sup>1</sup>, Буляница А. Л.<sup>1</sup>, Шмыков А. Ю.<sup>1</sup>, Красовский А. Н.<sup>1</sup>, Осмоловская Н. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИАП РАН

Эл. почта: f\_aa@mail.ru

Работа направлена на разработку нового метода разделения, основанного на принципах электромиграции, хроматографии и магнетизма. Предполагается, что такое сочетание обеспечат суперпарамагнитные наночастицы (СПНЧ), интегрированные в матрицу полимерного слоя или сорбента в кварцевой капиллярной колонке (КК), которые будут создавать магнитное поле за счет собственной намагниченности и/или под действием электрического поля. Накладываемое электрическое напряжение будет также отвечать за различную по скорости миграцию компонентов разделяемой смеси (и электроосмотический поток) в КК. Ожидается, что комбинированное воздействие электрического и магнитного полей позволит улучшить качество разделения как обладающих магнитными свойствами (например, наночастицы ряда металлов и их биоконъюгаты), так и немагнитных аналитов.

Одной из целей работы является математическое описание закономерностей влияния магнитного поля на разделение электромиграционными методами анализа. Теоретическая оценка воздействия включения СПНЧ в полимерную матрицу сорбента на электрическое и магнитное поля, является комплексной — многофакторной, и базируется на моделировании физических полей различной природы (магнитного, электрического, температурного) в анизотропных средах. Предварительные математические модели для описания нового принципа разделения связаны с использованием известных базовых уравнений, описывающих эффект от магнитных частиц (обобщенный закон Био-Савара), продольное перемещение в КК и дзета-потенциал сорбента (уравнение Пуассона-Больцмана), магнитную силу Лоренца (перпендикулярное смещение в КК) и пр.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 15-03-04643.

## Магнитные свойства сверхпроводящих нанокompозитов на основе индия в пористых диэлектрических матрицах

Михайлин Н. Ю.<sup>1</sup>, Козуб В. И.<sup>1</sup>, Кумзеров Ю. А.<sup>1</sup>, Парфеньев Р. В.<sup>1</sup>, Сысоева А. А.<sup>1</sup>, Фокин А. В.<sup>1</sup>, Шамшур Д. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: mikhailin.nik@gmail.com

Работа посвящена изучению магнитных свойств индия в пустотах диэлектрических матриц опала и пористого стекла. Подобный нанокompозит представляет собой трехмерную сетку наночастиц индия, вид которой зависит от свойств диэлектрика — в случае опала это упорядоченная структура, в пористом стекле — хаотичная. Для приготовления нанокompозитов использовалось пористое стекло с размером пор 7 нм, а также опалы с различным характерным минимальным диаметром пустот 10 нм — 45 нм. Индий вводился в поры диэлектрика из расплава под гидростатическим давлением. Нами изучалась намагниченность нанокompозитов  $m$  в зависимости от внешнего магнитного поля  $H < 14$  Т при различных температурах  $T > 1.5$  К.

Критические параметры сверхпроводящего перехода в нанокompозите, полученные на основе зависимостей  $m(H)$ , существенно превосходят соответствующие значения для массивного индия ( $T_c = 3.4$  К и  $H_c(T=0) = 280$  Ое). Так,  $T_c$  в образцах индия в пористом стекле достигает 4 К, а критическое поле  $H_c(T = 2$  К) = 15 кОе. В зависимости  $m(H)$  при всех температурах наблюдается гистерезис, связанный с захватом магнитного потока в образце. При температурах ниже 3 К наблюдаются скачки намагниченности при изменении  $H$ . Обнаружено, что количество скачков зависит от температуры, скорости развертки магнитного поля, и внутренней структуры образца. Предложена модель, качественно описывающая обнаруженный эффект. Согласно модели, при изменении магнитного поля значение тока в приповерхностном экранирующем слое в какой-то момент достигает критической величины, и происходит лавинообразное проникновение магнитного поля в образец. В результате внешнее поле оказывается распределено между ячейками сетки, и сверхпроводимость во всех ее элементах восстанавливается. При дальнейшем увеличении внешнего поля этот процесс повторяется. Отметим, что при температурах  $T < 1.75$  К картина эффекта усложняется: скачки намагниченности наблюдаются только в магнитных полях, превышающих некую пороговую величину  $H_n(T)$ .



## Оптические исследования резонансных характеристик металлических наностроек: влияние размера частиц и поляризации света

*Пилюгина Е. С.<sup>1</sup>, Щербак С. А.<sup>2</sup>, Хейслер Ф.<sup>3,4</sup>, Червинский С. Д.<sup>1,5</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>СПбАУ НОЦ НТ

<sup>3</sup>ИТМО

<sup>4</sup> Abbe Center of Photonics, Friedrich–Schiller-Universität Jena

<sup>5</sup> University of Eastern Finland

Эл. почта: Piliugina.ekaterina@gmail.com

Исследование резонансных характеристик металлических частиц субволновых размеров и процесса рассеяния ими света принципиально важно для таких областей, как нелинейная оптика [1] и фотovoltaика [2]. Большой интерес также представляет использование плазмонных структур с металлическими наностроеквыми плёнками в качестве активных элементов сенсоров на основе поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии [3]. Максимальное усиление в таких сенсорах реализуется при совпадении частоты возбуждения собственных колебаний исследуемой молекулы с частотой плазмонного резонанса (ПР) металлических наночастиц, что позволяет регистрировать единичные молекулы вещества [4]. Поэтому разработка чувствительных элементов сенсоров, спектральную область максимальной чувствительности которых возможно задавать на начальном этапе роста металлических островков, является важной задачей. В настоящей работе исследовалась связь между формой наностройка серебра и его резонансными характеристиками.

Для исследования спектральных характеристик одиночных наночастиц был выращен двумерный массив наностройков серебра с периодом 5 мкм. Островки формировались на поверхности стекла в результате последовательных процессов ионного обмена, электро-полевой термообработки и отжига стекла в восстановительной атмосфере водорода [5]. Исследование морфологии выращенных островков с помощью атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии показало, что наностройки представляют собой полуэллипсоиды (латеральные размеры от 100 до 180 нм), вытянутые в направлении, перпендикулярном поверхности стекла (высота от 80 до 160 нм). Спектры рассеяния света отдельными наностройками измерялись с помощью конфокальной темнопольной микроскопии. Наностройки возбуждались излучением галогеновой лампы с или р поляризации, направленным под скользящим углом (~22°) к поверхности образца, рассеянное излучение собиралось объективом с численной апертурой NA=0.7.

Для s-поляризованной возбуждающей волны были выявлены зависимости положения ПР от высоты и поперечного размера наноструктуры: с увеличением последнего положение ПР смещалось в длинноволновую область (от 600 до 700 нм), в то время как изменение высоты не оказывало значительного влияния на спектральные характеристики. При освещении образца р-поляризованной волной наблюдались снижение интенсивности рассеяния относительно сигнала, полученного при s-поляризации, и изменение положения максимума спектра. При повороте частицы на 90° и освещении s-поляризованным светом регистрировались схожие спектры большей интенсивности. Полученный результат обусловлен разложением поля р-поляризованной волны на нормальную к плоскости подложки и латеральную компоненты, каждая из которых возбуждает дипольное излучение. Поскольку диполь, возбужденный нормальной компонентой поля, практически не рассеивает в вертикальном направлении, откуда проводился сбор сигнала в эксперименте, регистрировалось только излучение диполя (рассеяние), возбужденного в латеральной плоскости.

Моделирование процесса рассеяния было выполнено в вычислительном пакете COMSOL Multiphysics, продемонстрировано хорошее совпадение с экспериментальными спектрами рассеяния как для s, так и для р-поляризованной возбуждающей волны.

Таким образом, независимо от поляризации возбуждающего излучения, при измерениях в стандартной геометрии, к которым относятся и измерения рамановского рассеяния, основным параметром, определяющим положение плазмонного резонанса, являются латеральные размеры наноструктуры. На основе полученной информации спектральные характеристики наноструктур могут быть заданы на стадии их изготовления, что позволяет использовать их в рамановских датчиках, предназначенных для работы с заданным аналитом или источником лазерного излучения.

#### Список литературы

1. Tsutsui Y., Hayakawa T., Kawamura G., Nogami M., Tuned longitudinal surface plasmon resonance and third-order nonlinear optical properties of gold nanorods, *Nanotechnology*, 22, 275203, 2011;
2. Atwater H.A., Polman A., Plasmonics for improved photovoltaic devices, *Nature Materials*, 9, 205-2013, 2010;
3. Dieringer J.A., McFarland A.D., Shah N.C., Stuart D.A., Whitney A.V., Yonzon C.R., Young M.A., Zhang X., Van Duyne R.P., Surface enhanced Raman spectroscopy: new materials, concepts, characterization tools, and applications, *Faraday Discuss*, 132, 9-26, 2006;
4. Camden J.P., Dieringer J.A., Wang Y., Masiello D.J., Marks L.D., Schatz G.C., Van Duyne R.P., Probing the Structure of Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Scattering Hot Spots, *Journal of the American Chemical Society*, 130, 12616-12617, 2008;
5. Chervinskii S., Sevriuk V., Reduto I., Lipovskii A., Formation and 2D-patterning of silver nanoisland film using thermal poling and out-diffusion from glass, *Journal of Applied Physics*, 114, 224301- 224305, 2013;

## Спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кристаллов $ZrO_2\text{-}Y_2O_3\text{-}Er_2O_3$

Чабушкин А. Н.<sup>1</sup>, Рябочкина П. А.<sup>1</sup>, Ляпин А. А.<sup>1</sup>, Сидорова Н. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. Н.П. Огарёва

Эл. почта: chabushkin@mail.ru

Возможность практического использования лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1.6-1.7 мкм для детектирования газов ( $CH_4$ ,  $NH_3$  и др.) привлекает исследователей к разработке лазерных систем, генерирующих излучение в данном спектральном диапазоне.

С целью получения лазерной генерации в области длин волн 1.6-1.7 мкм в настоящей работе исследованы спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кристаллов  $ZrO_2\text{-}Y_2O_3\text{-}Er_2O_3$ .

В ходе исследований выявлено, что спектральный контур усиления при значениях относительной инверсной населённости  $P=0.1$  в кристаллах  $ZrO_2\text{-}13.4\text{мол.}\%Y_2O_3\text{-}0.6Er_2O_3$  соответствует диапазону длин волн 1.6-1.7 мкм.

Выполнены исследования антистоксовой люминесценции с уровней  $^4S_{3/2}$ ,  $^4F_{9/2}$  ионов  $Er^{3+}$  при возбуждении на уровень  $^4I_{13/2}$  в кристаллах концентрационного ряда  $ZrO_2\text{-}13.4\text{ мол.}\%Y_2O_3\text{-}0.6Er_2O_3$ ,  $ZrO_2\text{-}13,6\text{мол.}\%Y_2O_3\text{-}0.4Er_2O_3$ ,  $ZrO_2\text{-}13.8\text{мол.}\%Y_2O_3\text{-}0.2Er_2O_3$ . Показано, что при данном способе возбуждения заселение вышележащих уровней происходит в результате межзонного взаимодействия. На кристаллах данного концентрационного ряда проведены генерационные эксперименты при продольной накачке волоконным лазером с длиной волны излучения 1532 нм.

## Особенности аналитического решения уравнений Максвелла для квантовой ямы под покрывающим слоем

Шапочкин П. Ю.<sup>1</sup>, Капитонов Ю. В.<sup>1</sup>, Ловцос В. А.<sup>1</sup>, Елисеев С. А.<sup>1</sup>,  
Ефимов Ю. П.<sup>1</sup>, Петров В. В.<sup>1</sup>, Овсянкин В. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: pavel.shapochkin@gmail.com

Структуры с одиночными квантовыми ямами (Single Quantum Well – SQW), основанные на полупроводниковых соединениях типа  $A^3B^5$ , привлекают внимание научного общества в течение уже нескольких десятилетий из-за наличия узких резонансных особенностей в спектре оптической восприимчивости, связанных с прямым возбуждением двумерных экситонов Ванье-Мотта. Прогресс технологии молекулярно-пучковой эпитаксии привёл к возможности создания SQW-структур высокого качества, в которых ширина экситонного резонанса приближается к своему естественному пределу [1].

Одним из важных методов исследования гетероструктур с квантовыми ямами является спектроскопия отражения [2]. В этой работе мы подробно представим аналитическое решение простейшей задачи – отражения света от одиночной тонкой квантовой ямы под покрывающим слоем.

Рассмотрим уравнения Максвелла для света с частотой  $\omega$ , падающего на поверхность образца под углом  $\vartheta_1$  из верхнего полупространства с показателем преломления  $n_1$ . Образец заполняет собой нижнее полупространство и изготовлен из диэлектрической среды с показателем преломления  $n_2$ . Образец однороден в плоскости XY, ось Z направлена по нормали к поверхности. На глубине  $z=d$  в образец расположен дельта-слой с локальной восприимчивостью  $\alpha(\omega)$ . Решение будет искажаться для плоской волны, поляризованной в плоскости падения (p-поляризация).

Аналитическое решение задачи для амплитудного коэффициента отражения выглядит следующим образом:

$$K_R(\Delta\omega) = g^2 + \frac{(1 - g^2)(1 + g^2 + 2g((1 + \gamma)\cos\phi - \nu\sin\phi))}{(\nu - g\sin\phi)^2 + (g\cos\phi + 1 + \gamma)^2},$$

где  $\gamma$  – отношение нерадиационного уширения  $\Gamma_{NR}$  (сумма однородного и неоднородного уширений) к радиационной ширине  $\Gamma_R$  экситонного резонанса,  $\phi$  – набег фазы при прохождении покрывающего слоя,  $g = \text{tg}(\vartheta_1 - \vartheta_2) / \text{tg}(\vartheta_1 + \vartheta_2)$  – характеристика угла падения,  $\nu = \Delta\omega / \Gamma_R$  – относительная отстройка частоты от резонансной.

Полученный результат позволяет предсказать появление ряда спектральных особенностей.

Если толщина покрывающего слоя квантовой ямы кратна  $\lambda/4$ , то при определённых значениях угла падения  $\vartheta$  и отношения нерадиационного уширения спектральной линии к её естественной ширине возможно добиться случая, когда коэффициент отражения структуры не зависит от частоты света:  $K_R(\omega) = g^2$ . Спектр отражения будет выглядеть так, как будто свет с квантовой ямой не взаимодействует. При этом в области резонанса происходит резкое изменение фазы отраженного света, структура работает в режиме интерферометра Жири-Турнуа.

При заданной паре геометрических параметров ( $d, \vartheta$ ) можно подобрать соотношение  $\gamma$  таким, что при определённой частоте  $\omega_{RT}$  произойдёт полное просветление структуры. Из-за высокой чувствительности к входным параметрам эксперимента этот эффект может быть использован в качестве модулятора монохроматического света на частоте  $\omega_{RT}$  путём быстрого изменения  $\gamma$ . Характерное время модуляции может достигать до сотен пикосекунд.

Эти особенности поведения спектра были успешно продемонстрированы для тонких GaAs/InGaAs квантовых ям с малым процентом индия. Методика проведения эксперимента позволяет регулировать требуемые параметры. В процессе эпитаксиального роста образца создаётся структура с градиентом покрывающего слоя, что позволяет найти область с необходимой толщиной  $d$ . Вращением криостата можно задать угол падения света  $\vartheta$ . Соотношение  $\gamma$  регулируется при помощи изменения нерадиационного уширения спектральной линии одним из двух доступных механизмов. Регулировка температуры образца в пределах от 8 до 300K изменяет однородное уширение резонанса из-за рассеяния экситонов на фононах. Воздействие на образец мощной локальной лазерной накачки увеличивает однородное уширение за счёт рассеяния экситонов на фотоиндуцированных квазичастицах.

Результатом работы является аналитическое решение задачи по отражению света от тонкой квантовой ямы под покрывающим слоем и экспериментальное подтверждение предсказанных особенностей поведения спектрального состава отраженного света.

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного Центра СПбГУ «Нанофотоника» (<http://photon.spbu.ru>).

Исследование поддержано РФФИ, исследовательские проекты N. 14-02-31617 mol a и 15-02-07668 a.

Список литературы

1. S.V. Poltavtsev, Yu.P. Efimov, Yu.K. Dolgikh, S.A. Eliseev, V.V. Petrov, V.V. Ovsyankin, Extremely low inhomogeneous broadening of exciton lines in shallow (In,Ga)As/GaAs quantum wells, Solid State Communications, 199, 47-51, 2014;
2. E.L.Ivchenko, Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures, Alpha Science: Harrow, UK, 2005;

## Исследование спектрально-люминесцентных свойств наноразмерных кристаллов $Y_{1-x}Yb_xPO_4$ и $Y_{1-x}Yb_xPO_4 \cdot 0.8H_2O$ ( $x = 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ), активированных ионами $Er^{3+}$

Хрущалина С. А.<sup>1</sup>, Ванецев А.С.<sup>2</sup>, Гайтко О. М.<sup>3</sup>, Кяшкин В. М.<sup>1</sup>, Рябочкина П. А.<sup>1</sup>, Силдос И.<sup>2</sup>, Табачкова Н. Ю.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. Н.П. Огарёва

<sup>2</sup>Институт физики Тартуского университета

<sup>3</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН

<sup>4</sup>НИТУ «МИСИС»

Эл. почта: anabel-2005@yandex.ru

Возможности практического применения наноразмерных кристаллов, активированных редкоземельными (РЗ) ионами, привлекают значительный интерес исследователей к изучению морфологии, структуры и различных физических свойств этих частиц.

Одним из интересных экспериментальных фактов, наблюдаемых в разного рода нанокристаллических соединениях, активированных ионами  $Yb^{3+}$ , является возникновение широкополосной люминесценции в области 350-950 нм при возбуждении излучением с длиной волны 975 нм [1-3]. Природа возникновения этой люминесценции обсуждалась авторами работ [1 — 3], однако полной ясности в объяснении данного экспериментального факта к настоящему времени не имеется.

В настоящей работе приведены результаты исследований фазового состава, морфологии и спектрально-люминесцентных свойств наноразмерных кристаллов ортофосфатов  $Y_{1-x}Yb_xPO_4:Er$  ( $x=0; 0,25; 0,5; 0,75, 1$ ), а также их гидратов —  $Y_{1-x}Yb_xPO_4 \cdot 0.8H_2O:Er$ .

При изучении люминесцентных характеристик указанных концентрационных рядов ортофосфатов и гидратов ортофосфатов наряду с антистоксовой люминесценцией ионов  $Er^{3+}$  при возбуждении излучением с  $\lambda=972$  нм, соответствующим полосе поглощения ионов  $Yb^{3+}$ , было обнаружено наличие широкополосной люминесценции в области 370-900 нм. Данная широкополосная люминесценция наблюдалась только при непрерывном способе возбуждения лазерным излучением и отсутствовала при импульсном способе возбуждения с  $\lambda_{изл}=972$  нм ( $t_{имп}=15$  нс, частота повторения импульсов 10 Гц).

На основе проведенных исследований зависимости интенсивности данной люминесценции от плотности мощности возбуждения и результатов исследования фо-

топроводимости для концентрационных рядов кристаллов  $Y_{1-x}Yb_xPO_4:Er$  и  $Y_{1-x}Yb_xPO_4 \cdot 0.8H_2O:Er$  ( $x=0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ ) сделаны выводы о механизмах возникновения в них люминесценции в области 370-900 нм при возбуждении излучением с  $\lambda = 972$  нм.

Список литературы

1. Strek W., Marciniak L., Bednarkiewicz A., Lukowiak A., Wiglusz R., Hreniak D., White emission of lithium ytterbium tetraphosphate nanocrystals, *Opt. Expr.*, V. 19, № 15, P. 14083-14092, 2011;
2. Jiwei Wang, Jian Hua Hao, Tanner P.A., Luminous and tunable white-light up-conversion for YAG ( $Yb_3Al_5O_{12}$ ) and  $(Yb;Y)_2O_3$  nanopowders, *Opt. Lett.*, V. 35, № 23, P. 3922- 3924, 2010;
3. Redmond P., Rand S.C., Ruan X.L., Kaviani M., Multiple scattering and nonlinear thermal emission of  $Yb^{3+}$ ,  $Er^{3+}$   $Y_2O_3$  nanopowders, *J. Appl. Phys.*, V. 95, № 8, P. 4069-4077, 2004;

## Сечение поглощения двухчастичных кластеров из однородных и слоистых проводящих наночастиц с вырожденным электронным газом

Налбандян В. М.<sup>1</sup>, Кучеренко М. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОГУ

Эл. почта: nalband1@yandex.ru

В данной работе исследовано поглощение энергии электромагнитного поля двухчастичным кластером, с учетом вырожденности электронного газа материала частиц. В качестве такового могут служить как металлы, так и полупроводники [1, 2]. В общем случае частицы имеют различные радиусы, образованы из разных проводящих материалов и могут иметь многослойную структуру. Оказалось, что полученные сечения поглощения кластеров имеют сложный мультирезонансный спектр и сильную зависимость от различных параметров кластера. При изменении длины томасфермиевского экранирования  $l$ , радиуса частицы  $R$  или ее ядра  $R_c$ , частоты столкновений электронов, спектры существенно трансформируются. Установлено, что величина сечения поглощения зависит от направления вектора напряженности  $E$  внешнего электрического поля относительно оси кластера  $r$ .

Основываясь на математических моделях, приведенных в работе [3], были получены отдельные выражения для дипольных поляризуемостей двухчастичных кластеров из сплошных и слоистых наночастиц. Как известно, сечение поглощения пропорционально мнимой части тензора  $\alpha_{cl}$  поляризуемости кластера

$$\sigma_{abs} = 4\pi\omega \text{Im}[\mathbf{n}_E \alpha_{cl}(\omega) \mathbf{n}_E],$$

где  $\mathbf{n}_E = \mathbf{E} / E$  единичный вектор задает поляризацию световой волны;  $\omega$  — частота колебания напряженности  $E$  электрического поля.

### 1. Дипольная поляризуемость кластера из однородных частиц

Рассчитаны спектры поляризуемости кластера из двух сферических наночастиц одинакового радиуса, но разных проводящих материалов, для различных значений

длины томас-фермиевского экранирования плазмы металлов. Даже небольшие изменения этого параметра во второй значащей цифре приводят к заметным изменениям спектров.

Проведенные исследования поляризуемости двухчастичного кластера позволили выявить некоторые закономерности. В случае, когда кластер состоит из двух идентичных наночастиц, изменения размера кластера  $r$  приводят к следующим изменениям поляризуемости. Если ось кластера  $r$  и вектор напряженности электрического поля  $E$  сонаправлены, то с увеличением расстояния между частицами величина поляризуемости уменьшается, а если вектор  $E$  перпендикулярен оси кластера  $r$ , то она увеличивается. В случае, когда частицы кластера состоят из разных материалов, эта зависимость может носить обратный характер.

## 2. Сечение поглощения двухчастичного кластера из проводящих слоистых наночастиц

Изменение структуры частицы приводит к изменению ее спектра. Для отдельной композитной наночастицы спектр состоит из большого количества резонансов, причем в высокочастотной области число (плотность) резонансных пиков увеличивается. Для двухчастичного кластера спектр имеет более сложную форму. Имеет место трансформация резонансных пиков, специфическая для каждого участка спектра.

С изменением размеров частиц кластера происходит заметная трансформация спектров. Когда  $R = R_c$ , гигабаунд спектра становится гладкой, но при увеличении радиусов сердцевин, на интервале частот  $0,8-0,9 \omega / \omega_{pl}$  возникает группа резонансов, которая связана с размерами ядра частицы. При дальнейшем увеличении радиуса ядра, растет число таких групп, причем ширина группового частотного интервала растет, а сами группы смещаются в низкочастотную область. В то же время, число резонансов становится почти в два раза больше.

Увеличение величины диэлектрической проницаемости среды  $\varepsilon_m$  приводит к увеличению амплитуды спектра поляризуемости.

Изменение взаимной ориентации векторов  $E$  (напряженности электрического поля) и  $\mathbf{r}$  (оси кластера) приводит, главным образом, к изменению амплитуды  $\sigma_{abs}$ , структура спектра поглощения заметным образом не изменяется.

### Список литературы

1. Смирнов М.Б., Крайнов В.П., Многократная ионизация томас-фермиевского кластера сильным электромагнитным полем, ЖЭТФ, №6, 2014-2019, 1999;
2. Гадомский О.М., Шалин А.С., Электронные состояния в металлических кластерах, ЖЭТФ, №1, 5-13, 2007;
3. Кучеренко М.Г. Тензорное представление динамической поляризуемости двухчастичного нанокластера в приближении точечных диполей, Матер. Всеросс. научно-метод. конфер. «Университетский комплекс как регион. центр образования, науки и культуры», Оренбург, 1412-1421, 2014;

## **Рассеяние света неидеальным газом Бозе-Эйнштейна в условиях сильного вырождения**

*Ежова В. М.<sup>1</sup>*, Герасимов Л.В., Куприянов Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: ezhovavic1929@phys-el.spbstu.ru

Доклад посвящен рассмотрению механизма упругого рассеяния и распространения света в вырожденном квантовом газе, подчиняющемся статистике Бозе-Эйнштейна. Мотивацией к изучению данного процесса послужили экспериментальные работы, в которых было обнаружено сильное когерентное рассеяние света в полосе прозрачности атомарного газа, приводившее к фрагментации конденсата и возникновению определенной упорядоченной структуры [1, 2]. Были разработаны основы квантовой теории данного процесса, учитывавшей каналы потерь и неоднородность системы, а также представлено выражение для T-матрицы рассеяния, связывающее ее с функцией распространения оптического возбуждения поляритонного типа. Исследована зависимость от плотности формируемой структуры спектра возбуждения с учетом статического дипольного взаимодействия и канала потерь, обусловленного некогерентным рассеянием света.

Список литературы

1. Schneble D., Torii Y., Boyd M., Streed E. W., Pritchard D. E., Ketterle W., The Onset of Matter-Wave Amplification in a Superradiant Bose-Einstein Condensate, *Science*, Vol. 300, pp. 475-478, 2003;
2. Hilliard A., Kaminski F., Targat R., Olausson C., Polzik E. S., Müller J. H., Rayleigh superradiance and dynamic Bragg gratings in an end-pumped Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. A*, 78, pp. 051403(1-4), 2008;

## **Оптические Таммовские состояния в фотоннокристаллической структуре на основе холестерического жидкого кристалла**

*Пятнов М. В.<sup>1</sup>*, Ветров С. Я.<sup>1</sup>, Тимофеев И. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СФУ

<sup>2</sup>ИФ СО РАН им. Л.В. Киренского

Эл. почта: MaksPyatnov@yandex.ru

В последние годы активно исследуются поверхностные электромагнитные волны в фотонных кристаллах. Даже при нормальном падении можно получить состояние в виде стоячей поверхностной волны, которое имеет нулевое волновое число вдоль поверхности. Данное поверхностное состояние называется оптическим таммовским состоянием (ОТС). ОТС может быть возбуждено на границе фотонного кристалла и среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью. На частоте, соответствующей данному состоянию, возникает узкий пик пропускания. Недавно была продемонстрирована возможность реализации ОТС в структуре, включающей холестерический жидкий кристалл (ХЖК) [1]. Изменение поляризации волны при отра-



жении от металла и особые поляризационные свойства ХЖК вынуждают использовать четвертьволновую фазовую пластинку, внедренную между ХЖК и слоем металла.

Спектрами пропускания ХЖК возможно просто и эффективно управлять. Изменение шага спирали ХЖК повлечет за собой изменение положения зоны брэгговского отражения кристалла. Было показано, что локализованная мода возбуждается в образце, только с разным вкладом, светом различных поляризаций. Эффект объясняется тем, что свет обеих круговых поляризаций возбуждает локализованную моду за счет преобразования поляризаций на диэлектрических границах. В результате любая поляризация света на выходе его из ХЖК становится эллиптической в разной степени, в зависимости от начальной поляризации и толщины кристалла.

Другим важным свойством рассматриваемой структуры является то, что спектры пропускания при распространении света в прямом и обратном направлении имеют различный характер. Таким образом, имеет место поляризационная анизотропия пропускания.

Мы исследовали пропускание структуры для света линейной поляризации. Установлено, что в зависимости от угла между оптической осью фазовой пластинки и плоскостью поляризации падающего линейно поляризованного света, изменяется коэффициент пропускания структуры на частоте, соответствующей ОТС. При падении света на металл пропускание структуры максимально в том случае, если плоскость поляризации падающего света составляет угол  $45^{\circ}$  с оптической осью фазовой пластинки. Причина этого заключается в трансформации линейной поляризации в левую круговую при прохождении света через четвертьволновую фазовую пластинку. Соответственно весь свет, дошедший до ХЖК, пройдет через него.

На основе рассматриваемой структуры можно создать перестраиваемый поляризационный фильтр. Его достоинствами являются перестраиваемость по частоте, возможность управления величиной пропускания, поляризационная анизотропия пропускания, возможность варьирования поляризации света на выходе из структуры при помощи изменения шага спирали ХЖК.

Список литературы

1. Vetrov S. Ya., Pyatnov M. V., Timofeev I. V., Surface modes in “photonic cholesteric liquid crystal–phase plate–metal” structure, Opt. Lett., 39, 2743–2746, 2014;

## **Радиационные переходы при столкновении $N + N$ -**

*Дадонова А. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>РГПУ

Эл. почта: alladadonova@mail.ru

Радиационные переходы при столкновении  $N + N$ - могут рассматриваться как связанные-связанные или связанно-свободные переходы в квазимолекулах, которые образуются при столкновениях невозбужденных частиц. Данная работа имеет целью расчет спектральных профилей, которые формируются при столкновениях  $N + N$ -.

Процесс резонансной перезарядки может рассматриваться как переход электрона между двумя идентичными атомами – диабатический подход, – или как результат развития системы в четном и нечетном адиабатических состояниях квазимолекулы, которая формируется при столкновении – адиабатный подход. Соответственно ради-

ационные переходы при столкновении  $A + A$ - могут быть рассмотрены в рамках этих двух подходов. В диабатическом подходе переход электрона от одного атома до другого сопровождается излучением фотона. Отправная точка для вычисления спектральных профилей – известная формула дипольного перехода в классической электродинамике. В адиабатическом подходе излучение происходит в результате дипольного перехода между двумя квазимолекулярными состояниями. Ниже мы следуем именно этому подходу.

Главной характеристикой данного процесса является интенсивность излучения квазимолекул, которая рассчитывается по формуле:

$$I = 4\pi R_c^2 \frac{A(R_c)}{d\Delta E / dR_c} \exp(-U_i(R_c) / kT)$$

где  $R_c$  – положение кондоновской точки, т.е. расстояние при котором происходит переход в соответствии с принципом Франка-Кондона,  $\Delta E$  – расщепление энергетических уровней,

$$A(R_c) = \frac{4}{3g} \alpha^3 \omega^3 |D(R_c)|^2$$

вероятность излучения или коэффициент Эйнштейна,  $\alpha = \sqrt{E_0}$ ,  $E_0$  – энергия сродства к электрону,  $\omega$  – частота излучения,  $g$  – статистический множитель равный 2 в нашем случае,  $D$  – дипольный момент оптического перехода,  $U_i$  – адиабатическая энергия терма начального состояния [1].

Для нахождения  $R_c$ , энергии квазимолекулярных уровней конечного и начального состояния, дипольного момента оптического перехода используется модель потенциала малого радиуса [2].

Зависимость спектральных профилей от межатомного расстояния при столкновениях  $H + H$ - для двух температур отражены в [3]. Проанализировав полученные результаты, можно сказать, что интенсивность имеет максимум вблизи точки с энергией, при которой происходит выход термов в сплошной спектр, т.е. состояние становится не устойчивым по отношению к испусканию электрона. Видно, что переходы сосредоточены в области сравнительно больших межатомных расстояниях 8-10 Å или  $10^3 \text{ см}^{-1}$ .

Указанные выше радиационные переходы происходят между двумя дискретными квазимолекулярными состояниями. Но возможен и другой случай, когда столкновении образуется электрон:  $A + A - \hbar\omega \rightarrow A + A + e$ . Процесс может быть описан связанно-свободным электронным переходом в квазимолекуле или, другими словами, фотоотрыву.

Основной характеристикой процесса являются дипольные моменты связанно-свободных переходов, которые были вычислены в рамках метода ЛКАО. Поперечное сечение фотоотрыва пропорционально плотности потока излучения, характеризуется матричным элементом дипольного момента перехода и связана с ним следующим образом:

$$\frac{df_{bc}}{d\omega} = 2\omega_{bc} |x_{bc}|^2$$

где  $x_{bc} = \langle \Psi_b | x | \Psi_c \rangle$ .

В рамках метода ЛКАО, используя модель потенциала малого радиуса для описания отрицательного иона водорода, при связанно-свободных переходах между

четным и нечетным квазимолекулярными состояниями матричные элементы дипольного момента будут иметь вид:

$$x_{gu} = \sqrt{\frac{\alpha^3 k}{\pi \omega^4}} \cos^2\left(\frac{kR}{2}\right) + \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi k}} \frac{\alpha R}{\omega} \sin(kR),$$

$$x_{ug} = \sqrt{\frac{\alpha^3 k}{\pi \omega^4}} \sin^2\left(\frac{kR}{2}\right) - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi k}} \frac{\alpha R}{\omega} \sin(kR)$$

где  $\omega = (\alpha^2 + k^2) / 2$ ,  $\omega = (\alpha^2 + k^2) / 2$ .

По результатам расчета характеристик связано-связанных или связанно-свободных переходы можно сделать три основных вывода. Во-первых, это — столкновение Н+ Н- происходит с излучением даже в отсутствие любого начального электронного возбуждения в сталкивающихся частицах. Во-вторых, квазимолекулярные радиационные переходы приводят к формированию вращательных состояний Н-2 при сравнительно больших межатомных расстояниях в 8-10 а.е. В-третьих, столкновения приводят к понижению порога ионизации, потому что связанный квазимолекулярный нечетный уровень отталкивающий.

Список литературы

1. Девдариани А.З., Излучение квазимолекул, Оптика и спектроскопия, 86(6), С. 954-959, 1999;
2. Демков Ю.Н., Островский В.Н., Метод потенциала нулевого радиуса в атомной физике, Изд.Ленинградского университета, 240 с., 1975;
3. Devdariani A, Dadonova A, Shevtsova J, Radiative transitions under resonance charge exchange. Н + Н<sup>-</sup> collisions, Journal of Physics: Conference Series, 548 012018, 2014;

## Короткопериодная дифракционная решетка для ввода света в плоский волновод полного внутреннего отражения

Ложкина О. А.<sup>1</sup>, Ложкин М. С.<sup>1</sup>, Капитонов Ю. В.<sup>1</sup>, Манухова А. Д.<sup>1</sup>, Шاپочкин П. Ю.<sup>1</sup>, Ефимов Ю. П.<sup>1</sup>, Елисеев С. А.<sup>1</sup>, Ловцюс В. А.<sup>1</sup>, Петров В. В.<sup>1</sup>, Козлов Г. Г.<sup>1</sup>, Овсянкин В. В.<sup>1</sup>

СПбГУ<sup>1</sup>

Эл. почта: liberdolik@gmail.com

Экситон-фотонное взаимодействие в планарных полупроводниковых наноструктурах с локализованными поляритонными модами представляет большой интерес с фундаментальной и с практической точки зрения. В данной работе исследуется плоский волновод полного внутреннего отражения — микрорезонатор на основе эпитаксиальных структур А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>: роль нижнего зеркала играет граница раздела GaAs/AlGaAs, а верхнего — GaAs/воздух. Благодаря контрасту показателей преломления коэффициент отражения от этих границ при угле распространения света больше характеристического близок к единице.

Существенным ограничением волноводов полного внутреннего отражения является невозможность ввода света в волновод с помощью облучения его поверхно-

сти. Ввод и вывод излучения с торца волновода с помощью микрообъектива является крайне трудоемкой задачей при работе с образцом в криостате при низких температурах, необходимых для наблюдения экситонных резонансов в квантовых ямах.

Альтернативой является нанесение на поверхности волновода периодического рельефа – дифракционной решетки, позволяющей при должном выборе параметров решетки возбудить волноводную моду при облучении поверхности образца по нормали.

Для возбуждения волноводных мод для света интересующего нас ближнего ИК диапазона при нормальном падении света на волновод на его поверхности необходимо создать дифракционную решетку с субволновым периодом порядка 200-400 нм. В этом случае первый дифракционный максимум является эванесцентным при любом угле падения.

Для ввода и вывода света из волновода оптимальная глубина рельефа дифракционной решетки составляет около 10-100 нм. В этом случае максимальная эффективность ввода/вывода излучения достигается при удобной для практического применения длине решетки порядка нескольких сотен микрон.

Гораздо более существенным и трудноудовлетворимым требованием к сопрягающей дифракционной решетке является отсутствие флуктуаций периода. Малая угловая ширина мод высокодобротного волновода полного внутреннего отражения приводит к необходимости создания решетки с флуктуацией периода не более 0,1 %.

В данной работе для создания удовлетворяющей перечисленным требованиям дифракционной решетки предлагается ионное травление через полимерную электронно-литографическую маску.

Для создания маски электронного резиста — решетки с периодом 300 нм слой ПММА 950k экспонировался в рабочей станции Zeiss Crossbeam 1540XB. Готовая полимерная маска использовалась для травления направленным потоком аргоновой плазмы при помощи установки Oxford IonFab 300.

Для экспресс-анализа созданной дифракционной решетки использовалась дифракция зеленого лазера (532 нм). Анализ ширины углового распределения рефлекса позволяет судить о степени постоянства периода дифракционной решетки. Полученная нами решетка демонстрирует угловую ширину рефлекса порядка 0,5 градусов, что соответствует относительной точности периода существенно лучше 0,1%.

Эксперимент по вводу света в волновод проводился при комнатной температуре при длине волны лазерного излучения 1064 нм. Ввод излучения регистрировался по возникновению излучения, выходящего с торца волновода. Зависимость интенсивности выходящего с торца волновода излучения от угла падения света на решетку имеет три максимума, соответствующие возбуждению трех возможных мод волновода, а также при изменении поляризации падающего излучения происходит смещение углового положения максимумов.

В данной работе продемонстрирована возможность применения для ввода излучения в волновод полного внутреннего отражения дифракционной решетки, созданной непосредственно на поверхности волновода полного внутреннего отражения с помощью плазменного травления через электронно-литографическую маску. Предложенный метод позволяет удовлетворить требованиям к флуктуации периода решетки и обеспечить эффективный ввод излучения ближнего ИК диапазона в волновод. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ а 15-02-07668 с использованием оборудования РЦ СПбГУ «Нанопотоника».

## Список литературы

1. M.S.Skolnick, T.A.Fisher, D.M.Whittaker, «Strong coupling phenomena in quantum microcavity structures», *Semicond. Sci. Technol.*, 13, pp. 645–669, (1998);
2. D.M.Beggs, M.A.Kaliteevski, S.Brand, R.A.Abram, A.V.Kavokin, «Waveguide polaritons: interaction of a quantum well exciton with an electromagnetic mode of a planar waveguide», *Phys.Stat.Sol.(C)*, 2, No. 2, p. 787 (2005);

## Временная самокомпрессия сходящихся пучков чирпированного излучения с тонким кварцем

Грудцын Я. В.<sup>1</sup>, Михеев Л. Д.<sup>1</sup>, Корибут А. В.<sup>1</sup>, Трофимов В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИАН

<sup>2</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова

Эл. почта: jgrudtsin@gmail.com

Экспериментально и теоретически изучался механизм взаимодействия отрицательно и положительно чирпированных фемтосекундных импульсов видимого диапазона (475 нм) с тонким кварцем марки КУ-1 в сходящемся пучке. Наблюдалась значительная самокомпрессия излучения, его спектр менялся в зависимости от знака чирпа и его величины, а также интенсивности.

В схеме экспериментального исследования использовалось излучение твердотельного титан-сапфирового комплекса после преобразования во вторую гармонику в кристалле KDP (3 мДж). Излучение проходило через призмный стретчер, где приобретало чирп, затем после пространственной фильтрации фокусировалось в вакуумную камеру, входное окно которой служило исследуемым образцом и представляло собой пластинку толщиной 1 мм из плавленого кварца марки КУ-1. Использование вакуумной камеры исключало возможное влияние воздуха. За вакуумной камерой формировалась поперечная кольцеобразная структура с однородным ядром, которое селективировалось с помощью диафрагмы.

Исследования проводились при различных интенсивностях падающего излучения. Измерения автокорреляционной функции показали, что при уровне интенсивности выше 2 ТВт/см<sup>2</sup> импульс сначала расщеплялся на две компоненты, одна из которых постепенно исчезала при дальнейшем увеличении интенсивности и формировался одиночный импульс, длительность которого (26 фс) была втрое меньше длительности исходного спектрально ограниченного импульса (70–80 фс). При этом эволюция спектра зависела от знака начального чирпа: при отрицательном чирпе спектр вначале уширялся в целом симметрично, затем при увеличении интенсивности происходило смещение спектра в синюю часть. Напротив, при положительном чирпе спектр смещался в красную часть.

На основе численного решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера без учета плазмообразования показано, что импульс, спектр и временная фаза излучения, прошедшего через образец, приобретают стационарную форму за фокальной плоскостью. Получено хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Грудцын Я.В. и др. «Фазовая самомодуляция в тонком кварце в сходящемся пучке отрицательно chirпированного фемтосекундного излучения», Квантовая электроника, 45 №5(2015);

## Учёт взаимодействия Брейта и КЭД поправок при вычислении спектров магниеподобных ионов

Коновалова Е. А.<sup>1</sup>, Козлов М. Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ПИАФ

<sup>2</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: lenaakonovalova@gmail.com

В последнее время достигнуто существенное улучшение точности и стабильности оптических стандартов частоты, развитие которых имеет важное значение для изучения фундаментальной физики, в частности, поиска вариации фундаментальных постоянных. Для решения таких задач необходимы теоретические предсказания, основанные на самых современных методах. Развитие этих методов повышает надежность атомных расчётов, что особенно важно при поиске «новой физики», поскольку в этом случае имеются только косвенные возможности экспериментальной проверки теории.

В данной работе рассматриваются магниеподобные ионы ( $Mg$ ,  $Al^+$ ,  $Si^{++}$ ,  $P^{+3}$ ,  $S^{+4}$ ,  $Cl^{+5}$ ). Выполнено сравнение: метода наложения конфигураций (НК), сочетания метода НК и многочастичной теории возмущений (НК+МТВ) и комбинации метода НК и связанных кластеров (НК+СК). Для вычислений использованы пакеты программ И.И. Тупицына, М.С. Сафроновой и У.Р. Джонсона [1-3]. В этой работе мы сконцентрировались на изучении поправок Брейта и собственно-энергетических КЭД поправок (лэмбовского сдвига) [4].

Выяснено, что наиболее точные результаты получаются при вычислениях методом НК+СК. При этом с ростом заряда иона ( $Z$ ) разница между расчётом методом НК+МТВ и НК+СК становится всё менее существенной.

На имеющемся сегодня уровне точности расчётов электронных корреляций учёт поправок Брейта и КЭД-поправок для лёгких ионов ( $Mg$ ,  $Al^+$ ) не важен, но для тяжёлых ионов ( $S^{+4}$ ,  $Cl^{+5}$ ) он становится существенным. Для оценки точности мы использовали сравнение с экспериментальными данными базы NIST.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-02-00241 А.

Список литературы

1. Safronova M.S., Kozlov M.G., Johnson W.R., Jiang D., Development of a configuration-interaction plus all-order method for atomic calculations, Phys. Rev. A, 80, 012516, 2009;
2. Kotochigova S.A., Tupitsyn I.I., Theoretical investigation of rare-earth and barium spectra by the Hartree-Fock-Dirac method, J. Phys. B, 20, 4759-4771, 1987;
3. Kozlov M.G., Porsev S.G., Safronova M.S., Tupitsyn I.I., CI-MBPT: A package of programs for relativistic atomic calculations based on a method combining configuration interaction and many-body perturbation theory, CPC, 195, 199-213, 2015;

4. Shabaev V.M., Tupitsyn I.I., Yerokhin V.A., Model operator approach to the Lamb shift calculations in relativistic many-electron atoms, *Phys. Rev. A*, 88, 012513, 2013;

## Спектр параметрического излучения в резонансном режиме генерации фотонов

*Левченко А. В.<sup>1</sup>, Трифанов А. И.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИТМО

Эл. почта: avlocr@gmail.com

Исследуются спектральные и статистические свойства резонаторного поля, сгенерированного в результате динамического эффекта Казимира при различных резонансных условиях, возникающих в следствие периодического движения границы резонатора. В частности, рассматриваются эффекты взаимодействия мод и возникновение двумодового сжатия.

Динамический эффект Казимира (ДЭК) — это релятивистский квантовый параметрический процесс при котором ускоренное движение границы области возбуждает в ней вакуумные флуктуации [1]. Данный процесс сопровождается генерацией фотонов и межмодовым взаимодействием. Для наблюдения ДЭК требуется организовать периодическое движение границы области с частотой порядка частоты генерируемого излучения. Вследствие этого требование существование ДЭК вплоть до недавнего времени не могло быть проверено в лаборатории [2]. В настоящее время имеются экспериментальные реализации ДЭК в сверхпроводящих схемах [3]. В [4] был получен эффективный гамильтониан, описывающий эволюцию электромагнитного поля при ДЭК в случае одномерного прямоугольного резонатора с идеально проводящей границей, но подробного аналитического исследования статистических и спектральных свойств излучения в ДЭК проведено не было. Однако отмечалось, что в зависимости от выбора конкретной резонансной частоты движения границы, могут проявляться различные режимы генерации фотонов и межмодового взаимодействия.

Целью настоящей работы является исследование спектральных свойств излучения в ДЭК при различных резонансных условиях, возникающих вследствие периодического закона движения границы резонатора. В частности, рассмотрены эффекты одномодового и двумодового сжатия (режим параметрического генератора), а также сохраняющие энергию взаимодействия между модами (режим фазового модулятора). В рамках работы данные режимы исследуются аналитически и численно. В частности, получены статистические и спектральные свойства мод излучения, сгенерированного в результате ДЭК.

### Список литературы

1. Nation P. D. et.al, Stimulating uncertainty Amplifying the quantum vacuum, *Rev. Mod. Phys.*, 84(1), pp. 1-24, 2012;
2. Dodonov V. V., Current status of the dynamical Casimir Effect, *Phys. Scr.*, 85, pp. 038105, 2010;
3. Wilson C.M. et. al., Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit, *Nature*, 479, pp. 376-379, 2011;
4. Law C.K., Effective Hamiltonian for the radiation in a cavity with a moving mirror, *Phys. Rev. A*, 49(1), pp. 433-437, 1994;

## Нелинейная динамика спектра экситонного отражения

Беляев Л. Ю.<sup>1</sup>, Овсянкин В.В.<sup>1</sup>, Строганов Б. В.<sup>1</sup>, Петров В. В.<sup>1</sup>, Ефимов Ю. П.<sup>1</sup>, Долгих Ю.К.<sup>1</sup>, Елисеев С. А.<sup>1</sup>, Капитонов Ю.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: lenyabelyev@mail.ru

### *Аннотация.*

Мы представляем экспериментальные исследования нелинейной динамики отражения, носящей в себе информацию о временах релаксации экситонной системы и механизмов фазовой релаксации 2D экситонов, обусловленных их взаимодействием с окружением.

### *Введение.*

GaAs/InGaAs квантовые ямы могут быть использованы для построения оптических логических элементов. Эти гетероструктуры выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Этот метод позволяет получать образцы с минимальными величинами неоднородного уширения резонанса [1].

### *Эксперимент.*

Для данного эксперимента был использован образец P561 с одиночной InGaAs/GaAs квантовой ямой толщиной 2 нм и с содержанием индия порядка 2-3 %. В эксперименте регистрировалась динамика спектра в зависимости от интенсивностей резонансных накачки и зондирующего излучения при разных временах задержки. Излучение накачки фокусировалось на образец по нормали в пятно диаметром около 100 мкм, а от зондирующего излучения под углом Брюстера в пятно диаметром около 10 мкм в ту же пространственную область образца. Из спектров отражения извлекались три параметра: коэффициент резонансного отражения ( $K_{RR}$ ), спектральное положение пика и полуширину на полувысоте (HWHM). Выяснилось, что положение пика меняется слабо, тогда как величины  $K_{RR}$  и HWHM меняются взаимосвязанным образом.

### *Обсуждение результатов.*

Показано, что при отрицательных задержках невозмущенная система ведет себя стационарным образом. В тот момент, когда приходит импульс накачки и возмущает систему, имеет место резкое уменьшение амплитуды и уширения спектров, после чего система начинает релаксировать в свое первоначальное состояние. Выяснилось, что характер изменения параметров  $K_{RR}$  и HWHM зависит только от величины интенсивности накачки и не зависит от зондирующего излучения.

Чем выше интенсивности накачки, тем сильнее уширяется спектр и уменьшается его амплитуда ( $K_{RR}$ ), тем медленнее система переходит в свое первоначальное невозмущенное состояние. Этому есть две причины:

1) при высоком уровне резонансного возбуждения в квантовой яме имеет место рассеяние экситонов на образующихся при возмущении системы равновесных электронах, дырках, трионах и т. д. Данному процессу соответствует изменение величины в  $\Gamma_{NR}$  (нерадиационное уширение, сумма всех уширений).

2) в результате высокой интенсивности оптической накачки растет ионизация экситонов, что приводит к образованию более сложных частиц (бизекситонов, трионов) и к увеличению взаимодействия между экситонами. Это приводит к перераспределению силы осциллятора экситонного перехода с другими переходами, а также к насыщению. В итоге, сила осциллятора экситонного перехода, а также  $\Gamma_R$  (радиационная ширина) падают.



$K_{RR} = \Gamma_R^2 / (\Gamma_R + \Gamma_{NR})^2$  [2], что позволяет из экспериментальных данных вычислить значения  $\Gamma_R$  и  $\Gamma_{NR}$ . Оказалось, что  $\Gamma_R$  в промежутке времени примерно от 0 до 40 пс увеличивается, что связано с образованием новых экситонов. Величина  $\Gamma_{NR}$  меняется значительно больше величины  $\Gamma_R$  и вносит больший вклад в уширение спектра.

Если аппроксимировать параметры  $\Gamma_R$  и  $\Gamma_{NR}$  с помощью следующих формул:

$$\Gamma_R = \Gamma_{R0} + \text{const} \cdot \exp(-t/T) \quad \Gamma_{NR} = \Gamma_{NR0} + \text{const} \cdot \exp(-t/T)$$

можно получить характерные времена возвращения системы в исходное состояние. Показано, что при увеличении интенсивности накачки времена релаксации системы линейно увеличиваются.

#### *Выводы*

Показано, что при отрицательных задержках невозмущенная система ведет себя стационарным образом. В тот момент, когда приходит импульс накачки и возмущает систему, имеет место резкое уменьшение амплитуды и уширения спектров, после чего система начинает релаксировать в свое первоначальное состояние. Выяснилось, что характер изменения параметров  $K_{RR}$  и НВНМ зависит только от величины интенсивности накачки и не зависит от зондирующего излучения. Показано, что величина  $\Gamma_{NR}$  меняется значительно больше величины  $\Gamma_R$  и вносит больший вклад в уширение спектра, а  $\Gamma_R$  в промежутке времени примерно от 0 до 40 пс увеличивается, что связано с образованием новых экситонов. Показано, что при увеличении интенсивности накачки времена релаксации системы линейно увеличиваются.

#### Список литературы

1. S.V. Poltavtsev, Yu.P.Efimov, Yu.K.Dolgikh, S.A.Eliseev, V.V. Petrov, V.V.Ovsiyankin. Extremely low inhomogeneous broadening of exciton lines in shallow (In,Ga)As/GaAs quantum wells. Solid State Communications 199, 47, 2014;
2. M.G.Benedict and E.D.Trifonov. Coherent reflection as superradiation from the boundary of a resonant medium. Phys. Rev.A38, 2854, 1988;

## **Способы возбуждения и регистрации ОДМР азотно-вакансионных центров в алмазе в схеме микроразмерного квантового магнитометра**

*Дмитриев А. К.<sup>1</sup>, Вершовский А. К.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: alexdmk777@gmail.com

### 1. Введение.

Сравнительно недавно появился новый метод измерения магнитного поля в нанометровом масштабе на основе оптического детектирования электронного парамагнитного резонанса спинов азотных дивакансий (NV центров) в алмазе. Применение методик ОДМР к отрицательно заряженным NV центрам позволило распространить сферу применения квантовой магнитометрии (КМ) на микро- и нанометровую области. Такой подход дает возможность измерять магнитные поля с беспрецедентным сочетанием пространственного разрешения и магнитной чувствительности в широком диапазоне температур (от долей К и до температур выше 300 К), что открывает новые этапы в исследовании биологических и конденсированных сред.

В данной работе были исследованы сигналы ОДМР азотно-вакансионных центров в алмазе и разработаны на их основе принципы создания микроразмерного трехкомпонентного магнитометра постоянного поля.

## 2. Методы возбуждения ОДМР в схеме векторного магнитометра.

В связи с тем, что частотная модуляция резонансного радиочастотного (СВЧ) поля не позволяет идентифицировать резонансы в спектре, а в случае их перекрытия оказывается вообще неприменима, в работе использовалась модуляция магнитного поля. Для этого на измеряемое поле  $B$  накладывалось слабое переменное поле  $B_{mod}$ . Выбором направления  $B_{mod}$  возможно усилить или ослабить отклики ОДМР, соответствующие разным ориентациям NV — центров. Так, ориентируя переменное поле в направлении, можно подчеркнуть одну линию из четырех, но остальные три при этом сохраняют значительную амплитуду.

Модулируя разнонаправленные поля на разных частотах, можно организовать несколько независимых петель обратной связи. В данной работе было предложено использовать модулирующие поля, приложенные вдоль диагоналей граней куба. Каждое из таких полей вызывает отклик от двух из четырех возможных ориентаций NV – центров, что существенно упрощает спектр.

Применение шести модулирующих полей не является избыточным, оно позволяет исключить «мертвые» зоны, возникающие в случае перекрытия двух и даже трех резонансных линий: отклики, включающие перекрывающиеся сигналы, можно исключить из рассмотрения. Также исключается линия спектра, для которой частотный сдвиг меньше величины поперечного расщепления в нулевом поле – E.

Оставшихся линий оказывается достаточно для измерения трех компонент поля во всех случаях, кроме случая, когда вектор  $B$  направлен вдоль одного из ортов решетки. При этом перекрываются все четыре линии спектра, и возникают три «мертвые» зоны.

Максимальная величина производной сигнала по частоте на выходе синхронного детектора составляет 3.48 В/МГц, а среднеквадратичная амплитуда шума в полосе 1 Гц имеет значение 0.9 мВ; отсюда для балансной схемы следует чувствительность  $4.6 \text{ нТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$ .

Полный уровень ФЛ соответствует фототоку  $I_{ph} = 35 \text{ мкА}$ . Предельная чувствительность схемы, ограниченная дробовым шумом фототока, составляет  $0.2 \text{ нТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$ . Остаточные флуктуации в схеме регистрации превышают уровень дробового шума на порядок; они могут быть подавлены, в частности методами активной стабилизации интенсивности лазера накачки.

Чувствительность схемы может быть дополнительно повышена нанесением на внешнюю поверхность алмаза и световода отражающего покрытия и за счет повышения мощности накачки.

## 3. Благодарности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 13-02-00589).

### Список литературы

1. D. Budker and M. Romalis, *Nature Physics*, 3, 227, 2007;
2. Е.Б. Александров, А.К. Вершовский, УФН, Т. 179, В. 6, 605-637, 2009;
3. А.К. Вершовский, А.К. Дмитриев, *Опт. и спектр.*, Т. 116, В. 3, 67–69, 2014;
4. А.К. Вершовский, А.К. Дмитриев, *Письма в ЖТФ*, Т. 41, В. 8, 78-85, 2015;
5. O. Gravrand et al., *Earth Planets Space*, 53, 949-958, 2001;
6. V.M. Acosta et al., *Physical Review*, В. 80, 115202, 2009;
7. G. Balasubramanian et al., *Nature*, 455, 648, 2008;

# Решение обратной задачи лазерной корреляционной спектроскопии для анализа состава полидисперсных растворов

Непомнящая Э. К.<sup>1</sup>, Величко Е. Н.<sup>1</sup>, Аксенов Е. Т.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: elina.nep@gmail.com

В настоящее время метод лазерной корреляционной спектроскопии широко используется при исследованиях составов различных растворов наноразмерных частиц [1, 2]. Однако существующие приборы на основе лазерной корреляционной спектроскопии не позволяют исследовать полидисперсные растворы с большим числом компонент близких по размерам. Вместе с этим теоретическая разрешающая способность корреляционной спектроскопии чрезвычайно высока и позволяет измерять размеры частиц от 0,5-1 нм до нескольких микрон. Таким образом, основная проблема заключается в недостаточной эффективности методов обработки данных корреляционной спектроскопии.

В связи с этим, целью данной работы являлось создание алгоритма для решения обратной некорректной задачи методами регуляризации и написание на его основе программы, позволяющей с высокой точностью вычислять размеры рассеивателей в составе полидисперсных жидких растворов.

В настоящее время существует множество способов нахождения решений обратных некорректных задач. Относительно лазерной корреляционной спектроскопии наиболее популярным в коммерческом производстве является метод куммулянтнов, однако он не позволяет получить точные результаты измерений в случае, когда не известны ожидаемые размеры частиц. Кроме того, при исследовании полидисперсных многокомпонентных смесей коммерческие спектрометры часто дают неверные результаты.

В последние годы, благодаря значительному росту производительности вычислительных устройств, стало возможным использование более сложных алгоритмов, в частности методов регуляризации, обладающих большей устойчивостью к ошибкам и потенциально дающих более точные результаты [3].

В нашей работе за основу для создания алгоритма решения обратной некорректной задачи был выбран метод регуляризации Тихонова [4]. Было предложено несколько оригинальных модификаций общепринятого алгоритма регуляризации, позволивших с большей точностью рассчитывать размеры частиц в полидисперсных растворах.

Проведённые модельные эксперименты подтвердили высокое соответствие заданных и рассчитанных размеров частиц даже в сильно полидисперсных растворах. Кроме того, в разработанном алгоритме существенно повышена устойчивость к шумам. При шуме, амплитуда которого составляет 10% полезного сигнала, что обычно соответствует максимальной погрешности эксперимента, по-прежнему наблюдается высокое качество восстановления модельного сигнала.

## Список литературы

1. Nepomnyashchaya E., Velichko E., Aksenov E., Bogomaz T. Optoelectronic method for analysis of biomolecular interaction dynamics, IOP Journal of Physics: Conference Series, Vol. 541, p. 1-5, 2014;

2. Linegar K.L. Applications of Dynamic Light Scattering in Chemical Engineering: Polymers Proteins and Liquid Crystals, USA: Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2008;
3. Zhang Y., Qinghua L. Lipeng W., Xingguang Q. Regularization particle size inversion of PCS based on fast algorithm, Intelligent Control and Automation (WCICA), 11th World Congress p.5641-5645, 2014;
4. Головицкий А.П. Обратные задачи экспериментальной физики. Практические аспекты. Учебное пособие Издательство: СПбГТУ, 356 стр, 2001;

## Спин-зависимые эффекты в кристаллах гранатов с примесью церия и гадолиния

Успенская Ю. А.<sup>1</sup>, Гурин А. С.<sup>1</sup>, Толмачев Д. О.<sup>1</sup>, Асатрян Г. Р.<sup>1</sup>, Романов Н. Г.<sup>1</sup>, Баранов П. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: [yuliauspenskaya@mail.ru](mailto:yuliauspenskaya@mail.ru)

Кристаллы гранатов, активированные ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , перспективны для использования в качестве быстродействующих эффективных сцинтилляторов во многих областях, включая медицинскую диагностику (позитронно-эмиссионную томографию и компьютерную рентгеновскую радиографию) и физику высоких энергий. Недавние публикации по применению кристаллов граната, легированных редкоземельными элементами, для квантовых вычислений открывают новые возможности их использования. Были продемонстрированы когерентные свойства редкоземельных кубитов на одиночных спинах в иттрий-алюминиевом гранате  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  [1]. В настоящей работе приводятся результаты исследования монокристаллов различных гранатов, легированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ , методами фотolumинесценции (ФЛ), туннельного послесвечения, электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР).

В кристаллах  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  по интенсивности фотolumинесценции  $\text{Ce}^{3+}$ , возбуждаемой нерезонансным циркулярно-поляризованным светом, были зарегистрированы спектры ЭПР ионов. Было обнаружено, что интенсивность ФЛ в магнитном поле увеличивается или уменьшается в зависимости от знака циркулярной поляризации возбуждающего света. Изменения интенсивности ФЛ в магнитном поле вызваны бальцмановским распределением населенностей между спиновыми подуровнями основного состояния ионов  $\text{Ce}^{3+}$ . Используя циркулярно-поляризованный свет, можно контролировать населенность определенных уровней основного состояния. Эффект ОДМР появляется из-за насыщения ЭПР-переходов, при которых населенности уровней выравниваются. Сигналы ОДМР соответствовали ЭПР основного состояния ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , которые занимают додекаэдрические узлы  $\text{Y}^{3+}$  в кристаллической решетке  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , что подтверждается совпадением расчетных и экспериментальных угловых зависимостей спектров ОДМР.

В монокристаллах  $\text{Lu}_{2.75}\text{Gd}_{0.25}\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Lu}_{2.875}\text{Gd}_{0.125}\text{Al}_5\text{O}_{12}$  наблюдались похожие изменения интенсивности ФЛ  $\text{Ce}^{3+}$ , однако спектры ОДМР соответствовали ЭПР ионов  $\text{Gd}^{3+}$ . Влияние спинового состояния ионов гадолиния на спиновую поляризацию ионов церия можно объяснить явлением кросс-релаксации между двумя спиновыми системами.

Эффект гигантского внутреннего магнитного поля на спин-зависимую рекомбинацию радиационных дефектов был обнаружен в легированных церием кристаллах и керамиках на основе гадолиниевых гранатов. Было обнаружено стимулированное внешним магнитным полем резкое увеличение интенсивности послесвечения образцов, предварительно облученных рентгеновским или ультрафиолетовым излучением, а также эффекты магнитной памяти. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены гигантскими внутренними магнитными полями в гадолиниевых гранатах. Эти поля приводят к ориентации спинов электронных и дырочных радиационных центров и подавляют их рекомбинацию. Кросс-релаксация между спиновыми системами  $Gd^{3+}$  и радиационными центрами приводит к переориентации спинов последних и вызывает гигантское увеличение интенсивности послесвечения. Таким образом, в облученных гадолиниевых гранатах, являющихся основой сцинтилляторов, накапливается значительная энергия, которая может быть освобождена во внешнем магнитном поле.

Работа была поддержана Российским Научным Фондом, грант № 14-12-00859.

#### Список литературы

1. Siyushev P., Xia K., Reuter R., Jamali M., Zhao N., Yang N., Duan C., Kulkharchyk N., Wieck A. D., Kolesov R., Wrachtrup J., Nature Communications, 5, 3895, 2014;

## Влияние длины волны и дозы возбуждающего излучения на фотосенсибилизированную генерацию синглетного кислорода

Ильина А. Д.<sup>1,2</sup>, Васютинский О. С.<sup>2</sup>, Глазов А. Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: alexandra.ilina.94@gmail.com

В настоящее время активно развиваются методы фотодинамической терапии, использующиеся для лечения различных заболеваний, в том числе и онкологических. Для реализации этих методов используются специальные вещества – фотосенсибилизаторы, имеющие свойство накапливаться в опухолях или других больных тканях. При облучении лазерным излучением с длиной волны в области поглощения фотосенсибилизатора, происходит переход молекул фотосенсибилизатора из основного синглетного в возбужденное триплетное состояние. Взаимодействие образовавшихся триплетных молекул фотосенсибилизатора с внутриклеточным молекулярным кислородом приводит к образованию возбужденных молекул кислорода в синглетном состоянии, которые, взаимодействуя напрямую с клеткой, вызывают ее гибель, что, в свою очередь, вызывает разрушение опухоли [1].

В процессе облучения тканей важен контроль доз облучения для генерации минимально необходимого количества синглетного кислорода. Контроль количества синглетного кислорода наиболее точно можно осуществить, измеряя его фосфоресценцию на переходе  $O_2(a^1\Delta_g) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-)$ . Однако в процессе лечения непосредственное измерение фосфоресценции не представляется возможным из-за очень слабой интенсивности сигнала. Поэтому важную роль играют косвенные методы оценки

концентрации синглетного кислорода и необходимой дозы облучения оптическими методами, например, по флуоресценции фотосенсибилизатора [2].

Одним из перспективных для медицины фотосенсибилизаторов является Радахлорин [3]. В настоящей работе было проведено исследование генерации синглетного кислорода с помощью Радахлорина, при этом одновременно регистрировались как фосфоресценция синглетного кислорода на длине волны 1270 нм, так и флуоресценция фотосенсибилизатора. Исследования проводились в водном растворе Радахлорина в широком диапазоне длин волн возбуждающего излучения. Регистрация фосфоресценции осуществлялась с помощью ИК ФЭУ Н1033В-45 (Hamamatsu, Япония), работавшего в режиме счета фотонов. Интенсивность флуоресценции фотосенсибилизатора Радахлорина в диапазоне длин волн около 664 нм детектировалась с помощью кремниевого фотодиода ФД-24К. В результате работы были получены зависимости интенсивности фосфоресценции синглетного кислорода и флуоресценции фотосенсибилизатора от длины волны возбуждающего излучения в диапазоне от 345 до 520 нм и дозы облучения и выявлены корреляции интенсивностей переходов между состояниями  $a^1\Delta_g$  и  $X^3\Sigma_g^-$  в молекулярном кислороде и состояниями  $S_1$  и  $S_0$  фотосенсибилизатора. Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить энергию возбуждающих фотонов, оптимальную для наиболее эффективной генерации синглетного кислорода, а также решить задачу непрямого контроля концентрации синглетного кислорода по флуоресценции фотосенсибилизатора.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 14-13-00266.

#### Список литературы

1. Ogilby P.R., Singlet oxygen: there is still something new under the sun, and it is better than ever, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 9, 1543, 2010;
2. J.D. Vollet-Filho, P.F. C. Menezes, L.T. Moriyama, C. Grecco, C. Sibata, R.R. Allison, O. Castro e Silva, Jr., and V.S. Bagnato, Possibility for a full optical determination of photodynamic therapy outcome. *J. Appl. Phys.* 105, 102038, 2009;
3. Vargas, F., Diaz, Y., Yartsev, V., Marcano A., Lappa, A., Photophysical properties of novel PDT photosensitizer Radachlorin in different media, *Ciencia*, 12(1), 70, 2004;

## **Исследование ECV-методом ионно-имплантированных фоточувствительных структур для ПЗС-матриц с обратной засветкой с целью оптимизации параметров приборов на их основе**

Яковлев Г. Е.<sup>1</sup>, Фролов Д. С.<sup>1</sup>, Зубков В. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: jorjinho10@mail.ru

Для улучшения спектральных характеристик и достижения максимальной чувствительности современных фотонно- и электронно-чувствительных приборов с переносом заряда (ФЧ и ЭЧ ППЗ) с обратной засветкой широко используется технология удаления сильнолегированной подложки под фоточувствительной поверхностью [1-3]. Затем, в оставшемся эпитаксиальном слое путем ионного легирования создается сильнолегированная  $p+$ -область, что позволяет не только компенсировать образо-

вавшийся в результате обработки поверхности потенциал, но и сформировать тянущее поле для неосновных носителей в направлении к области накопления и считывания заряда [4]. Величина поверхностного потенциала, возникающего при создании структуры, зависит от концентрации примеси вблизи поверхности, а резкость профиля, в свою очередь, влияет на величину дрейфового тока сгенерированных электронов.

Необходимо отметить, что при создании приборов микро- и оптоэлектроники всегда остро стоит проблема поиска современной адекватной метрики для верификации ключевых параметров создаваемых структур, в конечном итоге, определяющих рабочие характеристики приборов. Одним из таких параметров, несомненно, является концентрация основных носителей заряда, которая должна контролироваться в обязательном порядке.

Целью данной работы было определение оптимальных параметров имплантации в кремниевых структурах для уменьшения влияния встроенной поверхностной обедненной области на абсорбционные свойства фотонов. Для этого мы использовали метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV). Отличительной чертой метода является отсутствие необходимости создания контактов к образцу. При этом концентрационный профиль может быть измерен на глубину десятков микрон с разрешением вплоть до 1 нм [5-7].

В работе исследовались кремниевые структуры, в которых для создания приповерхностной  $p^+$  — области использовалась имплантация бором с различными энергиями и дозой, проводимая как напрямую, так и через различные покровные слои ( $\text{SiO}_x$ , Al,  $\text{SiO}_x+\text{Al}$ ). После операции имплантации проводился низкотемпературный отжиг. Электрохимические вольт-фарадные измерения проводились на установке ECVPго компании Nanometrics. В качестве электролита использовался водный раствор  $0.2\text{M NH}_4\text{HF}_2$  с добавлением изопропилового спирта.

Было определено, что для создания резкого концентрационного профиля, способствующего увеличению значения тянущего поля для неосновных носителей заряда, необходимо проводить ионную имплантацию через покровный слой, при этом максимум распределения должен находиться внутри покровного слоя. Толщина и материал покровного слоя, как правило, являются фиксированными для конкретного класса приборов фотоники. Так, для видимо-слепых приборов слой алюминия является фильтром, отсекающим нежелательную часть спектра. Оптимальные параметры можно получить за счет варьирования энергии и дозы имплантации при заданной толщине покровного слоя.

Разрешение метода электрохимического вольт-фарадного профилирования позволяет по измеренным профилям концентрации чрезвычайно точно определять максимум градиента концентрационного профиля, который, в свою очередь, определяет положение максимума напряженности электрического поля [8]. Использование ионной имплантации с оптимальными параметрами позволяет компенсировать эффект снижения эффективности сбора заряда после нанесения покровных слоев и, при сохранении чувствительности прибора, уменьшить величину прикладываемого ускоряющего напряжения.

По результатам измерений профилей концентрации носителей заряда и последующего расчета распределения напряженности электрического поля по глубине структуры определены оптимальные параметры имплантации, позволяющие получить максимум напряженности электрического поля на расстоянии 10-20 нм от поверхности, при амплитуде напряженности электрического поля около  $5 \cdot 10^4$  В/см.

Список литературы

1. L. Hirvonen, S. Jiggins, N. Sergent, G. Zanda, K. Suhling. Rev. Sci. Instrum., 85, 123102, 2014;
2. M. Gruwe. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 387(1), 282, 1997;
3. J.C. Richard, M. Vittot. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 315, 368, 1992;
4. R.A. Stern, R.C. Catura, R. Kimble, A.F. Davidsen, M. Winzenread, M.M. Blouke, R. Hayes, D.M. Walton, J.L. Culhane. Opt. Eng., 26(9), 875, 1987;
5. T. Ambridge, M. Faktor. J. Appl. Electrochem., 5, 319, 1975;
6. V. Zubkov, O. Kucherova, D. Frolov, A. Zubkova. Phys. stat. sol. (c), 10(3), 342, 2013;
7. В.И. Зубков. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса, СПб., Элмор, 2007;
8. M.M. Blouke, W.A. Delamere, G. Womack. Proc. IEEE CCD Workshop, p. 14, 1991;

## **Новый метод исследования потоков жидких сред на основе ядерно-магнитной спектроскопии и рассеянного лазерного излучения**

*Вологдин В. А.<sup>1</sup>, Давыдов В. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: joy214@rambler.ru

Исследование структуры распределения молекул и особенностей возникающих в механизме формирования констант (времен продольной  $T_1$  и поперечной  $T_2$ ) релаксации в текущем потоке, является одной из актуальных задач фундаментальной физики [1–3]. Результаты этих исследований необходимы для совершенствования конструкций различных измерителей физических величин потока (расходомеров, спектрометров, пульсоксиметров и т.д.), приборов искусственного жизнеобеспечения человека, систем охлаждения с движущейся жидкостью и т.д. Повышенный интерес представляют результаты данных исследований для выявления различных дефектов на внутренней поверхности в трубопроводе, особенно при его небольших диаметрах (например, искусственные сосуды или системы искусственного жизнеобеспечения человека). При диагностике данных трубопроводов очень важно, чтобы условие их стерильности не нарушалось. Кроме того, при работе с текущими биологическими растворами, также не желателен непосредственный контакт измерительной системы с раствором.

Проведенные нами исследования показали, что построение по регистрируемой интенсивности рассеянного лазерного излучения от потока жидкой среды автокорреляционной функции сложно реализуемая задача даже в случае медленного течения жидкости (ламинарный поток), что не позволяет применять данный метод для исследования текущей жидкости, который широко используется при исследовании жидких сред в стационарном состоянии. Метод ядерно-магнитной спектроскопии в текущей жидкости позволяет проводить измерения как в ламинарном, так и в турбулентном потоке текущей жидкой среды с высокой точностью, а также определять границу смены режима течения (например, с турбулентного на ламинарный) по изменению формы линии регистрируемого сигнала ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Ре-



зультаты экспериментальных исследований также показали, что по изменению формы регистрируемого сигнала ЯМР возможно выявление только «больших» дефектов на внутренней поверхности трубопровода, определение дефектов более меньших размеров затруднено.

Поэтому для исследования потоков жидких сред был разработан и реализован новый метод исследования структуры потока жидкой среды с использованием двух физических явлений: рассеяного лазерного излучения и ядерного магнитного резонанса [1–3].

Текущая жидкость перед воздействием лазерного излучения намагничивается в сильном магнитном поле, кроме того в экспериментальной установке реализовано управление ориентацией вектора намагниченности относительно текущего потока, которую можно изменять в пределах от 0 до  $360^\circ$ . Угол поворота вектора намагниченности определяется с высокой точностью по сигналу ЯМР, измеряя частоту радиополя. Экспериментальные исследования показали, что у молекул, которые содержат протоны или ядра с большим магнитным моментом, в сильном магнитном поле изменяется угол  $\nu$  между осью диполя жидкой среды и направлением её течения. Управляя ориентацией вектора намагниченности в месте воздействия лазерного излучения на среду, построив серию зависимостей  $I$  (интенсивности рассеяного лазерного излучения) от изменения угла воздействия лазерного излучения на текущий поток при различных изменениях  $\nu$ , можно определить угол  $\nu$  — соответствующий текущей жидкости без намагниченности, который до этого экспериментально было не измерить. Если в текущем потоке произошли структурные изменения, связанные только с наличием внутреннего дефекта трубопровода, то на определенном расстоянии от этого дефекта в зависимости от степени повреждения внутренней поверхности трубопровода можно зафиксировать изменение угла  $\nu$ . Кроме того, изменяя направление вектора намагниченности, можно обеспечить ориентацию молекул такой, чтобы степень их взаимодействия с внутренним дефектом трубопровода была максимальной. Это позволяет выявлять незначительные внутренние дефекты в трубопроводе различной структуры, которые ранее определить было невозможно.

Информация о значении угла  $\nu$  также позволяет фиксировать изменения, которые произошли в самой среде (например, появление примесей или изменение её температуры). Особенно актуален контроль температуры при работе с биологическими растворами, суспензиями медицинского назначения, где даже её незначительное изменение очень «критично». Разработанный нами новый метод позволяет также контролировать температуру текущей среды, измеряя её константы релаксации (времена продольной  $T_1$  и поперечной  $T_2$  релаксации) бесконтактным способом на основе использования явления ядерного магнитного резонанса. Зная  $T_1$  и  $T_2$  кроме контроля температуры, можно также определить pH-жидкой среды [2, 4]. Условие стерильности трубопровода при проведении этих измерений не нарушается. Использование эффекта ядерного магнитного резонанса также позволяет определять в текущем потоке мольные концентрации  $N_i$  парамагнитных ионов [4]. В случае добавления в используемую жидкость дополнительных компонент, которые содержат парамагнитные ионы, можно также установить изменения  $N_i$ . Двойной контроль бесконтактным методом температуры текущей жидкой среды значительно уменьшает вероятность ошибки, которая может возникнуть при измерениях

Полученные экспериментальные результаты показали высокую эффективность разработанного нами метода по сравнению с ранее используемыми. Стоит отметить, что ни один ранее применяемый метод не позволяет бесконтактным способом одновременно осуществлять диагностику внутреннего состояния трубопровода и кон-

троль текущего состояния параметров потока жидкой среды с погрешностью не выше 0.5 %.

#### Список литературы

1. Вебер А. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях. М.: Мир. 1992;
2. Исследование структуры потока жидких сред методом фотокорреляционной спектроскопии. В.А. Вологдин, В.В. Давыдов, Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика. СПб», 28 – 30 октября 2014 г., Санкт – Петербург, с. 110 — 112;
3. Применение метода фотокорреляционной спектроскопии для измерения угла между осью диполя и направлением текущего потока жидкости. В.А. Вологдин, В.В. Давыдов, Сборник докладов XV школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики», 16 – 20 ноября 2014 года, Москва, ФИАН им. П.Н. Лебедева, с. 222 – 224;
4. Попель А.А. Магнито — релаксационный метод анализа неорганических веществ. М.: Химия. 1978;

## **Исследование объема частиц с высокой плотностью на основе анализа отношения пика корреляционной функции к пьедесталу**

Вовк Т. А.<sup>1</sup>, Петров Н. В.<sup>1</sup>, Николаева Т. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТМО

Эл. почта: tanya\_foxwolf@mail.ru

Предлагается метод исследования взвеси частиц в случае высоких концентраций, основанный на регистрации изображений разных слоев объема, освещенного когерентным светом. Выполнен числовой расчет данного метода. Для определения характера распределения частиц в объеме и оценки их концентрации используется корреляционный анализ изображений частиц соседних слоев объема, заключающийся в оценке соотношения корреляционного пика к пьедесталу.

*Предлагаемый метод.* Область применения методов цифровой обработки изображений частиц включает в себя фундаментальные научные исследования: изучение динамики потоков частиц (газодинамики двухфазных потоков, сверхзвуковых потоков и проч.) [1, 2]; исследование частиц разной природы в задачах океанологии и биологии [3]; исследование прозрачных сред [4].

Существует множество методов обработки когерентных изображений частиц, среди которых можно выделить метод лазерной анемометрии по изображениям частиц – PIV (particle image velocimetry) [5] и методы цифровой голографии – ДН (digital holography) [6]. В работе [7] для распознавания сфокусированных изображений частиц в выбранном слое используется алгоритм на основе оконтуривания и пороговой обработки. В данной работе, являющейся продолжением исследования в [8], для исследования объема с частицами при высоких концентрациях предлагается вычисление функции взаимной корреляции изображений двух соседних сегментов объема. Исследование зависимости такого параметра функции корреляции, как отношение пика к пьедесталу ( $p/b$ ), от характера распределения частиц и их концентрации

показало, что этот параметр в двух наиболее распространенных случаях (нормальное и равномерное распределение) особым образом зависит от величины концентрации.

Для апробации предлагаемого метода и оценки его эффективности в качестве инструмента для определения характера распределения взвешенных в объеме рассеивающих частиц была разработана специальная имитационная модель. Этапы работы моделирующей программы: послойное формирование численными методами изображения объема среды с распределенными по нему частицами (используются два наиболее часто встречающихся распределения: случайное и нормальное относительно оптической оси; задаются такие характеристики, как размер и концентрация частиц); моделирование когерентных изображений частиц двух соседних сегментов объема, сформированных оптической системой с использованием математического аппарата скалярной теории дифракции; корреляционный анализ этих изображений (вычисление отношения  $r/b$  функции взаимной корреляции).

*Благодарности.* Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Н.В. Петров благодарит за поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации, проект №2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

#### Список литературы

1. Воронцов А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И. Измерение пространственно-временных параметров движения самосветящихся частиц в сверхзвуковом высокотемпературном потоке // Опт. журнал. Т. 79. № 1. С. 18–24. 2012;
2. Pereira F., Gharib M. Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterization of two-phase flows // Meas. Sci. Technol. V. 13. N 5. P. 683–694. 2002;
3. Дёмин В.В., Ольшук А.С. Цифровое голографическое видео для исследования биологических частиц // Опт. журнал. Т. 79. №6. С. 344–347. 2012;
4. Johansson E.-L., Benckert L., Sjö Dahl M. Phase object data obtained from defocused laser speckle displacement // Appl. Optics. V. 43. N 16. P. 3229–3234. 2004;
5. Peterson K., Regaard B., Heinemann S., Sick V. Single-camera, three-dimensional particle tracking velocimetry // Opt. Express. V. 20. N 8. P. 9031–9037. 2012;
6. Pitkäaho T., Niemelä M., Pitkäkangas V. Partially coherent digital in-line holographic microscopy in characterization of a microscopic target // Appl. Optics. V. 53. N 15. P. 3233–3240. 2014;
7. Nikolaeva T.Y., Petrov N.V. Statistical study of coherent images of particles in the volume of optical medium // Proc. SPIE.V. VIII. 921612. 2014;
8. Николаева Т.Ю., Петров Н.В. Исследование объема с высокой плотностью частиц на основе контурного и корреляционного анализа изображений // Вестник ИТМО. №6. С. 15-21. 2014;

## **Исследование кинетики флуоресценции фотосенсибилизатора и фосфоресценции синглетного кислорода в зависимости от концентрации кислорода в воде**

*Бельтюкова Д. М.<sup>1,2</sup>, Васютинский О. С.<sup>1,2</sup>, Глазов А. Л.<sup>1</sup>, Семенова И. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбПУ

Эл. почта: dina.beltukova@gmail.com

В настоящее время для лечения различных заболеваний, в том числе онкологических, активно развиваются методы фотодинамической терапии (ФДТ) и фотодинамической диагностики (ФДД). В подавляющем большинстве практических реализаций этих методов используются фотосенсибилизаторы, которые при введении в организм имеют свойство накапливаться в опухолях или в иных требуемых тканях. При облучении светом с длиной волны, соответствующей пику поглощения фотосенсибилизатора, происходит переход молекул сенсбилизатора из основного синглетного в возбужденное долгоживущее триплетное состояние. При взаимодействии возбужденных молекул сенсбилизатора с молекулами кислорода образуется высокоактивный синглетный кислород, который приводит к гибели клеток.

Основными факторами, определяющими эффективность фотосенсибилизатора, являются его фотостабильность и квантовый выход синглетного кислорода. Наблюдение динамики флуоресценции сенсбилизатора позволяет получить информацию о фотостабильности. Кинетика сигнала фосфоресценции синглетного кислорода характеризует динамику его образования в системе.

Данная работа посвящена исследованию кинетики фосфоресценции синглетного кислорода и флуоресценции фотосенсибилизатора в зависимости от концентрации кислорода в водном растворе фотосенсибилизатора Радахлорин. Для изменения концентрации кислорода раствор находился под внешним давлением кислорода. Регистрация производилась одновременно в двух каналах: фосфоресцентном, с помощью ИК ФЭУ, работающего в режиме счета фотонов, и флуоресцентном, с использованием синхронного усилителя с кремниевым фотодиодом в качестве детектора. Были получены зависимости интенсивности фосфоресценции синглетного кислорода и флуоресценции фотосенсибилизатора от времени возбуждения при различных концентрациях кислорода и фотосенсибилизатора в растворе. Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить такие важные фотофизические параметры исследуемого процесса, как скорость выцветания, коэффициент диффузии, отношение констант скоростей поглощения и флуоресценции, а также определить оптимальные значения концентрации фотосенсибилизатора и интенсивности возбуждающего излучения для обеспечения наиболее эффективной генерации синглетного кислорода.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 14-13-00266.

## Спектроскопия и оптические свойства люминофоров на основе редкоземельных гранатов, синтезированных в условиях высокого давления

Юсуф А. А.<sup>1</sup>, Галашов Е. Н.<sup>1</sup>, Мандрик Е. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НГУ

Эл. почта: chessplanet1992@gmail.com

Последние несколько лет особое внимание уделяется люминофорам. Светодиодные приборы с люминофорным преобразованием используются в быту (светильники, LED дисплеи), в медицинских (противоопухолевая терапия и рентгеновская диагностика) и научных целях (лазеры, регистрационные датчики). Главным образом преимущество светодиодов на основе люминофоров обусловлено высокой энергоэффективностью устройств, поскольку коэффициент полезного действия LED (около 80%) в 10 раз выше коэффициента полезного действия лампы накаливания и вдвое выше коэффициента полезного действия люминесцентных ламп, которые, к тому же содержат высокотоксичные ртутные пары. Вместе с тем срок службы светоизлучающих гетероструктур более 100 000 часов, что во много раз превышает срок службы ламп накаливания и люминесцентных ламп.

В настоящее время в большинстве коммерческих светодиодов применяются желтые люминофоры на основе редкоземельного граната ( $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ). Использование таких люминофоров, обусловлено, прежде всего, их высокой конверсионной эффективностью и оптимальными световыми характеристиками. Однако, коммерческий синтез данных люминофоров довольно сложен и энергоёмок, поскольку он производится при высоких температурах (выше 1650°C). При этом надо отметить, что для различных применений, требуются порошки люминофора разных фракций (обычно от 2 до 50 мкм), а такие высокие температуры синтеза приводят к образованию спеков микрочастиц, что подразумевает привлечение дополнительных дорогостоящих методов обработки для получения порошков требуемого гравиметрического состава.

В данной работе предложен способ синтеза люминофоров на основе редкоземельных гранатов в условиях контролируемого высокого давления. Предпосылкой к созданию предлагаемого способа синтеза люминофоров белого свечения на основе редкоземельных гранатов стал тот факт, что при повышенных давлениях [1] оксид иттрия из кубической фазы переходит в более разупорядоченную моноклинную. Предполагается, что в твёрдофазной реакции образования  $Y_3Al_5O_{12}$ , диффузия атомов алюминия в разупорядоченную структуру оксида иттрия будет происходить быстрее, в результате скорость реакции увеличится, исчезнет промежуточная фаза  $YAlO_3$ , и, как следствие, полный синтез фазы  $Y_3Al_5O_{12}$  будет происходить при более низкой температуре и за более короткое время.

По результатам работы были синтезированы образцы люминофоров  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ,  $Gd_3Al_5O_{12}:Ce$  и  $Lu_3Al_5O_{12}:Ce$  в условиях стандартного твердофазного синтеза и в условиях контролируемого высокого давления. Синтез в условиях стандартного твердофазного синтеза проходит при температурах выше 1600 °C в то время, как в условиях контролируемого высокого давления синтез полностью проходит при 1300 °C, частицы люминофора не спекаются, имея фасетированную поверхность и размер от 10 – 20 мкм. Измерены спектры люминесценции образцов. Световые координаты синих светодиодов, покрытых синтезированными люминофорами, попадают в бин белого ( $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ,  $Gd_3Al_5O_{12}$ ) и зеленого света ( $Lu_3Al_5O_{12}:Ce$ ). Светосила

светодиодов на основе синтезированных люминофоров была измерена и составила 90, 81, 85 Лм соответственно для каждого образца. Световые характеристики синтезированных люминофоров не уступают по своим световым качествам характеристикам лучших коммерческих образцов фирмы Cree [2].

Ввиду более низкой температуры синтеза, по результатам данной работы была подана заявка на патент по способу твердофазного синтеза в условиях контролируемого высокого давления [3].

#### Список литературы

1. Yusa H, Tsuchiya T, Sata N, Ohishi Y. Dense Ytria phase eclipsing the A-type sesquioxide structure: high-pressure experiments and ab initio calculations. // *InorgChem.* – 2010. V. 49 – P. 4478–4485;
2. Сайт фирмы Cree <http://www.cree.com/>;
3. Галашов Е.Н., Юсуф А.А., Мандрик Е.М. Заявка на Пат. 2015105240 РФ. Способ твердофазного синтеза люминофоров белого свечения на основе редкоземельных гранатов;

## Особенности формирования индикатрисы селективного фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$

Максименко В. А.<sup>1</sup>, Данилова Е. В.<sup>1</sup>

ДВГУПС<sup>1</sup>

Эл. почта: [mva30@mail.ru](mailto:mva30@mail.ru)

Селективное по углу фотоиндуцированное рассеяние света (ФИРС), наблюдалось в различных фоторефрактивных кристаллах (ФРК) при разных условиях эксперимента [1]. Данный вид рассеяния света заключается в частичном переизлучении лазерного пучка в ФРК в строго определенных направлениях. ФИРС является эффектом, который, с одной стороны накладывает ограничения на возможности практического применения ФРК, а с другой стороны позволяет получить дополнительную информацию о свойствах этих кристаллов [1]. В данной работе приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования селективного по углу ФИРС в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$ , обобщенные на случай, когда угол падения может быть не равен нулю, и пучок накачки лежит в плоскости, перпендикулярной оптической оси кристалла.

Исследуемый образец представлял собой плоскопараллельную кристаллическую пластинку  $x$ -среза толщиной 1 мм. Содержание родия 0,01% по массе. Излучение гелий-неонового лазера поляризовано в плоскости, содержащей оптическую ось  $z$  кристалла. Пучок накачки падает на кристалл под углом  $\alpha$ , отличным от  $0^\circ$  в плоскости  $xy$ . Поляризация рассеянного света совпадает с поляризацией накачки. Применение гелий-неонового лазера обусловлено тем, что в этом случае поглощение света в легированных кристаллах ниобата значительно ниже, чем при использовании коротковолнового излучения [2]. В результате значительно уменьшается роль тепловых эффектов в кинетике ФИРС. В направлении прошедших лучей селективное ФИРС имеет вид близко расположенных друг к другу светлых дуг, смыкающихся в области центрального пятна. В районе центрального пятна дуги скрыты широкоугольным (не-

селективным) ФИРС, наблюдающимся в виде несимметричной области с яркой однородной засветкой. В направлении отраженных лучей наблюдается только селективное ФИРС в виде совокупности близкорасположенных дуг, аналогичных по форме и размерам дугам прямого селективного ФИРС. Картины симметричны относительно горизонтальной оси, проходящей через центр изображения. Максимальный угловой размер индикатрисы рассеяния в вертикальной плоскости:  $20^\circ \div 22^\circ$ . При углах падения пучка накачки на кристалл больших, чем  $10^\circ$  картина рассеяния в общих чертах сохраняет свою форму, однако яркость дуг селективного ФИРС в передней полусфере ослабевает, и наблюдение его становится затруднено из-за наличия широкоугольного ФИРС. Форма селективного ФИРС в заднюю полусферу при изменении угла падения накачки изменяется слабо. Угловые размеры селективного ФИРС, как в переднюю, так и в заднюю полусферу, практически не меняются в широком диапазоне углов падения пучка накачки ( $\alpha = 0 \div 40^\circ$ ). Однако с увеличением угла падения нарастает время достижения максимального угла рассеяния.

Анализ приведенных экспериментальных результатов позволяет заключить, что наблюдавшееся нами селективное по углу фотоиндуцированное рассеяние света в кристаллах ниобата лития является разновидностью четырехволнового векторного взаимодействия. Условия фазового синхронизма в этом случае выполняются за счет двух факторов: оптической анизотропии кристалла, а также пространственно-неоднородного фотоиндуцированного изменения показателя преломления в освещенной области кристалла.

В рамках предложенного подхода может быть рассчитано значение максимального фотоиндуцированного изменения показателя преломления необыкновенной волны в легированных кристаллах ниобата лития по известному из эксперимента значению максимального угла селективного ФИРС.

#### Список литературы

1. В.И. Sturman, S.G. Odulov, M.Yu. Gouklov, Parametric four-wave processes in photorefractive crystals, Physics reports 275, 197-254, 1996;
2. Максименко В.А., Карпец Ю.М., Строганов В.И., Селективное фоторефрактивное рассеяние света в кристалле  $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$ , Оптика и спектроскопия, Т. 97., № 4., С. 620–623, 2004;

## Оптическая анизотропия кубических фотонных кристаллов в условиях многомодового распространения света

Уклеев Т. А.<sup>1,2</sup>, Юрасова Д. И.<sup>3</sup>, Шевченко Н. Н.<sup>3</sup>, Селькин А. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбГУ

<sup>3</sup>ИВС РАН

Эл. почта: t.ukleev@gmail.com

Известно, что обычные кристаллы кубической симметрии по своим оптическим свойствам, как правило, изотропны (по крайней мере, в рамках классической кристаллооптики, когда не идет речь о тонких эффектах пространственной дисперсии) [1]. Этот факт тесно связан с возможностью описания общих оптических свойств

кристаллов путем введения тензора диэлектрической проницаемости, не зависящего от пространственных координат. При этом характерный масштаб  $a$  неоднородности (например, размер постоянной решетки) должен быть существенно меньшим по отношению к длине волны  $\lambda$  света. Однако в случае пространственно структурированных систем типа фотонных кристаллов (ФК), для которых  $a \approx \lambda$ , принципиальное значение имеет пространственная модуляция диэлектрической проницаемости [2]. Поэтому, связь симметрии оптических свойств ФК с симметрией его кристаллической решетки, может быть существенно иной по сравнению с обычными кристаллами. В частности, ФК кубической симметрии, в отличие от своих симметричных аналогов из класса обычных кристаллов, могут демонстрировать заметные эффекты оптической анизотропии [3].

В настоящей работе исследованы спектры брэгговского отражения света от опалоподобных ФК (относящихся к классу симметрии  $O_h$ ) в зависимости от ориентации плоскости падения относительно кристаллографических осей ФК. В качестве объектов экспериментального изучения использовались ФК, изготовленные из глобул полистирола диаметром  $\sim 280$  нм. Спектры измерялись от отражающей поверхности (111) в  $p$ - $p$ ,  $s$ - $s$ ,  $p$ - $s$  и  $s$ - $p$  конфигурациях поляризатора-анализатора при разных углах падения  $\theta$ . Основное внимание обращено на эффект узкополосной оптической анизотропии ФК, проявляющийся в виде резонансного усиления отраженного сигнала в скрещенных состояниях поляризатора и анализатора ( $p$ - $s$  или  $s$ - $p$  конфигурация). Эффект практически отсутствует при любых  $\theta$ , если плоскость падения света перпендикулярна одновременно системам латеральных (111) и наклонных ( $1\bar{1}\bar{1}$ ) кристаллических плоскостей (азимут  $\varphi = 0^\circ$  плоскости падения). Сигнал в скрещенных,  $p$ - $s$  или  $s$ - $p$ , состояниях поляризатора и анализатора также отсутствует, когда угол  $\varphi$  кратен  $60^\circ$ . Однако при промежуточных значениях  $\varphi$  в небольшом интервале углов падения вблизи  $\theta = 55^\circ$  в спектрах  $p$ - $s$  и  $s$ - $p$  обнаруживается узкий пик отражения, свидетельствующий об оптической анизотропии ФК.

Из результатов анализа наблюдаемого эффекта анизотропии, выполненного в рамках динамической теории дифракции света [4,5], следует, что наиболее заметно анизотропия проявляется вблизи значений  $\theta$  и  $\varphi$ , удовлетворяющих кинематическому условию многоволновой брэгговской дифракции одновременно на двух системах кристаллических плоскостей типа (111) и ( $1\bar{1}\bar{1}$ ). При таком условии осуществляется многомодовый режим распространения света внутри ФК. Этот вывод подтверждается сопоставлением экспериментальных спектров брэгговского отражения с теоретическими кривыми дисперсии собственных мод ФК, рассчитанными для разных значений  $\theta$  и  $\varphi$ . Именно в результате многомодового характера распространения света, возникает эффект узкополосной оптической анизотропии ФК.

Полученные нами результаты показывают, что, несмотря на высокую симметрию опалоподобных фотонных кристаллов, их оптические свойства обладают сильной анизотропией, что выражается особенно ярко в условиях многоволновой брэгговской дифракции. При азимутальной ориентации плоскости падения, которая не соответствует наиболее симметричным направлениям распространения света в ФК (угол  $\varphi$  не кратен  $60^\circ$ ), собственные моды электромагнитного поля становятся эллиптически поляризованными. В результате при  $p$ - или  $s$ -поляризации падающего луча отраженный свет приобретает эллиптическую поляризацию, что проявляется в эксперименте в виде резонансного сигнала отражения в скрещенных поляризациях.



Таким образом, можно заключить, что обсуждаемый эффект представляет собой новое, специфическое проявление многоволновой брэгговской дифракции в трехмерных фотонных кристаллах.

#### Список литературы

1. В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. Москва «Наука», 432 стр., 1979;
2. J.F. Galisteo-López, M. Ibisate, R. Sapienza, L.S. Froufe-Pérez, Á. Blanco, C. López. Self-Assembled Photonic Structures. *Adv. Mater.*, 23(1), 30 (2011);
3. С.Г. Романов. Особенности поляризационной анизотропии в оптическом отражении и пропускании коллоидных фотонных кристаллов. *ФТТ*, 52(4), 788 (2010);
4. А.Г. Баженова, А.В. Селькин, А.Ю. Меньшикова, Н.Н. Шевченко. Поляризационное подавление брэгговских рефлексов при отражении света от фотонных кристаллов. *ФТТ*, 48(11), 2010 (2007);
5. V.G. Fedotov, A.V. Sel'kin, T.A. Ukleev, A.Yu. Men'shikova, N.N. Shevchenko. Resonant multiple diffraction of light in 3D opal-like photonic crystals. *Phys. Status Solidi B* 248(9), 2175 (2011);

## Влияние оболочки наночастиц серебра на флуоресценцию родамина бж в пленке поливинилового спирта

Константинова Е. И.<sup>1</sup>, Слежкин В. А.<sup>1</sup>, Брюханов В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КГТУ

<sup>2</sup>БФУ им. И. Канта

Эл. почта: konstantinovaeliz@gmail.com

Генерация поверхностных плазмонов [1] в наночастицах благородных металлов методом SPCE (surface plasmon-coupled emission) позволяет в результате резонансного переноса энергии на исследуемую молекулу усилить ее флуоресценцию или усилить диполь-дипольный перенос между молекулами, одна из которых передает электронную энергию исследуемой молекуле. Поэтому наночастицы серебра широко применяются в оптоэлектронике.

В настоящее время существует целый ряд методов, позволяющих синтезировать наночастицы благородных металлов [2-5]. Среди них выделяют два основных направления: первое – базирующиеся на методах коллоидной химии (методы осаждения из коллоидных растворов, обратной мицеллы, восстановления солей металлов и т.д.), второе – вырезание из макроскопического куска наночастиц или наноструктур (лазерная абляция, литография, напыление на твердую подложку, и т.д.). Однако контроль размера, формы и структуры («ядро+оболочка») синтезированных наночастиц для всех методов является ключевым. Структура или многослойность наночастиц, характерная для методов восстановления солей серебра, имеет место и для метода лазерной абляции в жидкость [6]. Толщина оболочки синтезированных наночастиц варьируется от 0,1 до 3 нм.

С целью обнаружения влияния оболочки серебряных наночастиц на флуоресценцию молекул родамина бж (Рбж) в пленках поливинилового спирта (ПВС) в работе исследовались абляционные серебряные наночастицы коллоидного раствора и

серебряных наночастицы золей — боргидратного и цитратного. Концентрация Р6Ж в пленках равна  $2,1 \times 10^{-4}$  М; концентрация наночастиц коллоидного раствора абляционного серебра, боргидратного и цитратного золя была примерно одинакова и составила  $0,89 \times 10^{-8}$  М. Толщина пленок ПВС равна 20 мкм.

Синтез боргидратного и цитратного золя серебра осуществлялся методом восстановления солей серебра. Абляционные наночастицы были получены лазерной абляцией полированной серебряной пластины в воде [7]. Размеры серебряных наночастиц исследовали методами фотокорреляционной спектроскопии на установке FotoCor-Complex. Средний размер абляционных наночастиц серебра составил 33 нм, а для наночастиц серебра боргидратного и цитратного золей – 36 нм и 38 нм соответственно.

В результате проведенных исследований на оптической модульной системе Fluorolog-22 фирмы Horiba (Франция) было обнаружено, что абляционные наночастицы усиливают флуоресценцию молекул Р6Ж [8-10] сильнее, чем наночастицы боргидратного и цитратного золя, покрытые оболочкой. Вместе с ростом интенсивности флуоресценции молекул Р6Ж в присутствии наночастиц серебра сильнее росли времена жизни первого возбужденного синглетного состояния и квантовый выход. Можно предположить, что наличие оболочки у серебряных частиц боргидратного и цитратного золей в определенной степени гасит поверхностную плазмонную волну, которая передает электронную энергию молекулам Р6Ж.

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.809.2014/К.

#### Список литературы

1. K. Aslan, K.McDonald, Michael J.R.Previte, Y.Zhang, C.D.Geddes. C.P.Lett, 464 (2008) 216-219;
2. Подлегаева Л.Н., Звиденцова Н.С., Колесников Л.В. Исследование условий получения наночастиц себбра и золота при химическом осаждении / Ползуновский вестник, 2008, № 3, с. 96-98;
3. Adeleh Granmayeh Rad, Hamed Abbasi, and Keyhan Golyari. Fabrication and Nonlinear Refractive Index Measurement of Colloidal Silver Nanoparticles International Journal of Applied Physics and Mathematics, Vol. 2, № 2, 2012, p.135-138;
4. S. Mandal, S.K Arumugan, R. Pasricha and M. Sastry. Silver nanoparticles of variable morphology synthesized in aqueous foams as novel templates/ Bull. Mater. Sci., Vol. 28, № 5, 2005, p. 503–510;
5. L. Rodríguez-Sánchez, M.C. Blanco, and M.A. López-Quintela. Electrochemical Synthesis of Silver Nanoparticles. J. Phys. Chem. B 2000, 104, p. 9683-9688;
6. Слежкин В.А., Брюханов В.В., Цибульникова А.В., Тихомирова Н.С. Электрохимическое определение структуры и заряда наночастиц гидрозолей серебра с оптическим контролем размеров частиц / Инновации в науке и образовании -2014: X Международная научная конференции (15-18 окт.): тр. в 2 ч./ Федер. Агентство по рыболовству; ФГБОУ ВПО «КГТУ». - Калининград, 2014.- Ч.1. — С. 112-114;
7. Боркунов Р. Ю., Царьков М.В., Константинова Е.И., Брюханов В.В. Особенности фемтосекундного фотовозбуждения флуоресценции и фосфоресценции молекул родамина 6Ж в пленках полиметилметакрилата с наночастицами серебра / Известия КГТУ. — 2014. — № 6. – С-34-39;

8. Зейниденов А.К., Ибраев Н.Х., Кучеренко М.Г. Влияние наночастиц серебра на электронные переходы в молекулах красителей и генерационные характеристики жидкостных лазеров на их основе / Вестник ОГУ. — 2014. — №9 (170). — с. 96-102;
9. Брюханов В.В., Минаев Б.Ф., Цибульникова А.В, Тихомирова Н.С., Слежкин В.А. Плазмонное усиление и тушение флуоресценции и фосфоресценции анионных и катионных красителей в различных средах / Оптический журнал. — 2014. — Т. 81. — № 11. — С.7-14;
10. Брюханов В.В., Цибульникова А.В, Самусев И.Г., Слежкин В.А. Влияние наночастиц серебра на динамику синглет-синглетного переноса энергии люминофоров в тонких пленках поливинилового спирта// ЖПС. — 2014. — Т.81. №4. — с. 515-521;

## **Измерение пространственного распределения температуры микрообъектов, находящихся при высоких давлениях, на основе акустооптической спектральной фильтрации изображений**

*Мачихин А. С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НТЦ УП РАН

Эл. почта: aalexanderr@mail.ru

Возможность создания высоких температур путем лазерного нагрева используется во многих технологических процессах: осаждении тонких пленок, обработке поверхности, легировании и модифицировании свойств материалов [1]. Лазерный нагрев в алмазных наковальнях в настоящее время является единственным экспериментальным способом создания экстремальных статических давлений ( $> 100$  ГПа) и температур ( $> 3000$  К). Поэтому этот метод широко применяется при исследованиях фазовых переходов в минералах и синтезе новых сверхтвердых материалов. Лазерный нагрев основан на поглощении инфракрасного (ИК) излучения лазера в образце, установленном в алмазной наковальне, после его прохождения через один из алмазов. Это позволяет достигать температуры до  $5000$  К при давлениях  $200$  GPa. Одна из главных проблем лазерного нагрева заключается в возникновении значительных градиентов температуры в образце.

Предлагается метод измерения распределения температуры образцов, находящихся при высоких температурах и давлениях. Метод основан на спектральной визуализации образца на произвольных длинах волн в достаточно широком спектральном интервале и последующей обработке полученных спектральных изображений. В качестве спектрального элемента предлагается использовать акустооптический перестраиваемый фильтр. Разработан и изготовлен специализированный акустооптический фильтр изображений. Собран макет экспериментальной установки, обеспечивающей высокое спектральное ( $1,5$  нм) и пространственное ( $500 \times 500$ ) разрешение, достаточно широкий диапазон перестройки ( $700$ - $1000$  нм), произвольную спектральную адресацию, высокое качество изображения, высокое быстродействие, отсутствие подвижных элементов. Экспериментально на тестовых объектах показана возмож-

ность измерения пространственного распределения температур в диапазоне 1000-2000 К с погрешностью в пределах 5%.

Список литературы

1. Bassett, W.A. The birth and development of laser heating in diamond anvil cells. *Review of Scientific Instruments* 72, 1270-1272, 2001;
2. Dubrovinsky, L., K. Glazyrin, C. McCammon, O. Narygina, E. Greenberg, S. Ubelhack, A.I. Chumakov, S. Pascarelli, V. Prakapenka, J. Bock and N. Dubrovinskaya. Portable laser-heating system for diamond anvil cells. *Journal of Synchrotron Radiation* 16, 737-741, 2009;
3. Kavner, A. and C. Nugent. Precise measurements of radial temperature gradients in the laser-heated diamond anvil cell. *Review of Scientific Instruments* 79, 024902, 2008;

## **Контроль процесса децеллюляризации кожных биоматриц методом спектроскопии комбинационного рассеяния**

*Периуткина С. В.<sup>1</sup>, Шалковская П. Ю.<sup>1</sup>, Тимченко Е. В.<sup>1</sup>, Тимченко П. Е.<sup>1</sup>, Волова Л. Т.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СГАУ

<sup>2</sup>СамГМУ

Эл. почта: sveta.perch@yandex.ru

В связи с широкой распространенностью термических повреждений и высокой летальностью остается актуальным вопрос об улучшении результатов лечения больных с ожоговыми ранами. В настоящее время в области тканевой инженерии и регенеративной медицины разработаны новые биоматериалы для заживления ожоговых ран на основе эпидермальных биоматриц. Однако использование донорских биоматриц ограничивается их иммуногенными свойствами, вызванных клетками эпидермиса и эндотелиальными клетками в дерме. Поэтому при изготовлении кожных биоматриц проводят децеллюляризацию образцов. Однако, процесс децеллюляризации может сопровождаться уменьшением гликозаминогликанов или иных компонентов, которые в свою очередь являются частью межклеточного вещества биоматрикса, что может привести к ухудшению заживляемости. Поэтому, комплексная оценка процесса децеллюляризации кожных биоматриц является весьма актуальной задачей.

В качестве основного метода исследований процесса децеллюляризации кожного биоматрикса был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния, реализуемый высокоразрешающим цифровым спектрометром Shamrock sr-303i со встроенной охлаждаемой камерой DV420A-ОЕ, обеспечивающей спектральное разрешение 0,15 нм (около  $1 \text{ см}^{-1}$ ), с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04 (мощность до 500 мВт, длина волны 785 нм). Для подтверждения результатов была проведена растровая электронная микроскопия.

В качестве образцов исследований были использованы образцы кожи, изготовленные по различным протоколам децеллюляризации.

В результате проведенных исследований получены следующие выводы:

- Получены особенности спектра комбинационного рассеяния для кожных биоматриц, изготовленных по различным протоколам. Установлено, что основные различия проявляются на волновых числах  $1062\text{ см}^{-1}$  и  $1645\text{ см}^{-1}$  и  $1410\text{ см}^{-1}$ , соответствующие гликозаминогликанам, коллагену I типа, а также эпителию.

- Проведен двумерный анализ введенных оптических коэффициентов, позволяющим оценивать кожные биоматрицы, изготовленные по различным протоколам.

- Полученные результаты исследований подтверждены растровой электронной микроскопией.

#### Список литературы

1. Khmaladze A, Ganguly A, Kuo S., et al., Tissue-Engineered Constructs of Human Oral Mucosa Examined by Raman Spectroscopy, Tissue Engineering Part C, Methods, 19(4), 299-306, 2013;
2. Wen-Liang Lo, Jian-Yun Lai, Feinberg S.E., et al., Raman spectroscopy monitoring of the cellular activities of a tissue-engineered ex vivo produced oral mucosal equivalent, J. Raman Spectrosc., 42, 174–178, 2011;
3. Zhao J.Y., Chai J.K., Song H.F., Effects on collagen I and III after transplantation of porcine acellular dermal matrix with hyaluronic acid, Zhonghua Yi Xue Za Zhi, 91(18), 1276-1280, 2011;
4. Kunstar A., Leferink A.M., Okagbare P.I., et al., Label-free Raman monitoring of extracellular matrix formation in three-dimensional polymeric scaffolds, Journal of the Royal Society Interface, 10(86), 1-12, 2013;

## Применение метода спектроскопия комбинационного рассеяния для диагностики заболеваний тканей зуба

*Кулабухова А. Ю.<sup>1</sup>, Тимченко П. Е.<sup>1</sup>, Тимченко Е. В.<sup>1</sup>, Жердева Л. А.<sup>1</sup>,  
Волова Л. Т.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СГАУ

<sup>2</sup>СамГМУ

Эл. почта: arina317@rambler.ru

В стоматологии значительную долю занимают проблемы, связанные с заболеваниями и поражением тканей зуба. Наиболее распространенным стоматологическим заболеванием является кариес. На первых стадиях кариес протекает бессимптомно, но последствия развития кариеса могут привести к развитию фиброзного пульпита, а в итоге и к удалению зуба, что приводит к эстетической проблеме пациента. Для эффективного и своевременного установления правильного диагноза полное стоматологическое обследование должно включать в себя исследование твёрдых тканей зуба с возможностью бесконтактного и неинвазивного метода диагностики. Благодаря оперативному и неинвазивному типу исследования метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) является одним из возможных методов ранней диагностики заболеваний твёрдых тканей зубов. Кроме того, с его помощью можно получить представление о степени минерализации обызвествлённых структур пульпы зуба (дентиклей), что является важным моментом в выборе тактики эндодонтического лечения облитерированных каналов.

В качестве объектов исследования были использованы образцы малых коренных зубов пациентов с диагнозом «Кариес» (K02) и образцы кальцификатов пульпы зубов с диагнозом «Дегенерация пульпы» (K04.2). Для исследования морфологии дентина и пульпы зуба производилась послойная резка образцов зубов вдоль длины зуба с толщиной слоёв 2-3 мм. Размер образцов кальцификатов составил 2-4 мм.

В результате проделанной работы, получены особенности спектров КР образцов эмали, дентина и цемента зуба, а также кальцификатов пульпы зуба. На основе анализа спектров КР исследовано распределение минеральных и органических компонент твёрдых тканей зуба в норме и при поражении кариесом, а также исследованы кальцификаты пульпы зуба. Введены критерии идентификации данных типов патологий. Для твёрдых тканей соотношение интенсивностей на волновых числах 1069 и 870  $\text{см}^{-1}$  остаётся постоянным даже при образовании кариеса, в то же время, кальцификаты зуба с диагнозом дегенерация пульпы характеризуются ростом соотношения на волновых числах 1069 и 870  $\text{см}^{-1}$ , что может быть использовано для диагностики фиброзного пульпита. Для эмали характерно смещение в сторону замещения (А типа) ОН- группы на  $(\text{CO}_3)^{2-}$  (1098  $\text{см}^{-1}$ ) в апатите по сравнению с замещением (В-типа)  $(\text{PO}_4)^{3-}$  группы на  $(\text{CO}_3)^{2-}$  (1069  $\text{см}^{-1}$ ). При патологических процессах, таких как кариес и кальцификация происходит сдвиг в сторону замещения В-типа.

Результаты исследований подтверждены растровой электронной микроскопией.

#### Список литературы

1. Бостон Д.Б. Новый подход к лечению фиссурного кариеса // Клинич. стоматология. 2007. №2. С. 24–29;
2. Казеко Л.А., Тихонова С.М. Современные подходы в диагностике кариозной болезни // Стоматол. журнал. – 2007. – №3. – С. 251–255;
3. Тихонова С.М., Беляева Ю.С. // Стоматол. журнал. – 2004. – №4. – С. 26–28;
4. Ramakrishnaiah R., Rehman G., Basavarajappa S., Khuraif A., Durgesh B., Khan A., Rehman I. Applications of Raman Spectroscopy in Dentistry: Analysis of Tooth Structure // Applied Spectroscopy Reviews. 2015. V. 50. I. 4. P. 332-350;
5. Miyazaki M., Onose H., Moore B. Analysis of the dentin–resin interface by use of laser Raman spectroscopy // Dent. Mater. 2002. V. 18. P. 576–580;
6. Ruddle C. Cleaning and shaping the root canal system // eds. Pathways of the Pulp. 2002. P. 231–292;
7. Timchenko E.V., Timchenko P.E., Volova L.T., Ponomareva Yu.V., Taskina L.A. Raman spectroscopy of the organic and mineral structure of bone grafts // QUANTUM ELECTRON. 2014. V. 44. I. 7. P. 696–699;
8. Zhao J., Lui H., Mclean D.I., Zeng H. Automated Autofluorescence Background Subtraction Algorithm for Biomedical Raman Spectroscopy // Society for applied spectroscopy. 2007. V. 61. № 11. P. 1225–1232;
9. Rehman I., Movasaghi Z., Rehman S. Vibrational Spectroscopy for Tissue Analysis // Series in Medical Physics and Biomedical Engineering. CRC Press. 2012. P. 271;
10. Mandair G., Morris M. Contributions of Raman spectroscopy to the understanding of bone strength // BoneKEy Reports. 2015. V. 4. P. 620;
11. Buchwald T., Kozielski M., Szybowicz M. Determination of Collagen Fibers Arrangement in Bone Tissue by Using Transformations of Raman Spectra Maps // Spectroscopy: An International Journal. 2012. V. 27. I. 2. P. 107-117;
12. Климашина Е.С. Синтез, структура и свойства наноразмерных карбонатзамещённых гидроксипатитов для создания резорбируемых биоматериалов // Сборник научных работ победителей конкурса. Всероссийский конкурс

- научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области химических наук и наук о материалах в рамках Всероссийского фестиваля науки. 2011. Т. 1. С. 67-85;
13. Eidelman N., Boyde A., Bushby A., Howell P., Sun J., Newbury D., Miller F., Robey P., Rider L. Microstructure and mineral composition of dystrophic calcification associated with the idiopathic inflammatory myopathies // *Arthritis Res Ther.* 2009. V. 11. I. 5. P. 159;
  14. Le May O., Kaqueler J. Electron probe micro-analysis of human dental pulp stones // *Scanning microsc.* 1993. V. 7. № 1. P. 267-271;

## **Исследование сигналов когерентного пленения населенностей на атомах $^{87}\text{Rb}$ в ячейках с буферным газом**

*Федоров М. И.<sup>1</sup>, Ермак С. В.<sup>1</sup>, Петренко М. В.<sup>2</sup>, Пятышев Е. Н.<sup>1</sup>, Семенов В. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: qfs-lab@mail.ru

Исследованы характеристики сигнала когерентного пленения населенностей (КПН) в малогабаритных стеклянных ячейках с парами атомов  $^{87}\text{Rb}$  в атмосфере неона при накачке узкополосным лазерным источником  $\text{D}_2$  линии головного дублета. Измерены параметры КПН сигналов поглощения в камерах диаметром 3 мм с давлениями буферного газа Ne в диапазоне 200 – 400 мм.рт.ст. при температурах ячейки в пределах 65 – 120 °С и мощностях излучения накачки от 30 до 400 мкВт/см<sup>2</sup>. Экспериментально установлены оптимальные значения давления буферного газа, температуры ячейки и мощности источника накачки, при которых достигается минимальное значение кратковременной нестабильности резонансной линии.

Рассмотрена универсальная методика изготовления миниатюрных рабочих ячеек образцовых мер частоты и квантовых магнитометров, содержащих атомы  $^{87}\text{Rb}$  в атмосфере инертного газа неона, с применением интегральных технологий [1]. Представлены результаты экспериментального исследования сигнала КПН, наблюдаемого на серии изготовленных ячеек. Сигналы КПН наблюдались с типичной шириной линии 2 – 3 кГц при отношении сигнал/шум, равном 1500, в полосе регистрации 1 Гц, что позволяет реализовать относительную стабильность частоты атомных часов на уровне  $10^{-11}$  за 100 с.

Результаты проведенных исследований параметров резонансных сигналов КПН в малогабаритных и миниатюрных ячейках могут быть использованы в приложениях атомных стандартов частоты и квантовых магнитометров.

### Список литературы

1. S.V. Ermak, et al., Microfabricated cells for chip-scale atomic clock based on coherent population trapping: Fabrication and investigation, *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 1, 37-41, 2015.

## **Квантовые магнитометры как основа для стандарта частоты**

*Сагитов Э. А.<sup>1</sup>, Ермак С. В.<sup>1</sup>, Петренко М. В.<sup>2</sup>, Семенов В. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: qfs-lab@mail.ru

Показана возможность создания квантового стандарта частоты на основе системы двух квантовых магнитометров. Один из магнитометров — самогенерирующего типа, другой —  $M_z$ -типа на краевом СВЧ-резонансе. Осуществляется лазерная накачка атомов  $^{87}\text{Rb}$  помещённых в малагабаритную камеру поглощения с антирелаксационным покрытием стенок.

С помощью математической обработки получается разностный сигнал двух квантовых магнитометров, определение коэффициента корреляции. Сигналы магнитометров регистрировались за время наблюдения от 1 до 2000 с. Остаточная флуктуация нестабилизированного постоянного поля в магнитном экране, где располагались магнитометры имело величину порядка 1 Гц.

Представлены экспериментальные результаты исследования флуктуаций разности частот магнитометров и для этого параметра определена девиация Аллана. Отмечается роль различных компонент светового сдвига частоты радиооптического резонанса при определении оптимального режима работы квантовых магнитометров в такой системе. Продемонстрировано, что эффект компенсации скалярной и векторной компонент светового сдвига в случае исследуемой системы двух квантовых магнитометров позволяет уменьшить девиацию Аллана при временах усреднения, превышающих сотни секунд по сравнению с вариантом квантового стандарта частоты на 0-0 переходе.

## **Одновременное детектирование излучательной и безызлучательной релаксации синглетного кислорода в биологических объектах на клеточном уровне**

*Белашов А. В.<sup>1,2</sup>, Семенова И. В.<sup>1</sup>, Петров Н. В.<sup>2</sup>, Васютинский О. С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>ИТМО

Эл. почта: belashov@niuitmo.ru

Молекулярный кислород, в особенности его активные формы, является незаменимым компонентом живых организмов, что в первую очередь обусловлено широким распространением данного химического элемента в природе. Синглетный кислород, первое возбужденное состояние молекулы кислорода, является важным агентом, выполняющим функции защиты клетки, передачи сигналов, а также регуляции основных процессов её жизнедеятельности. Это делает детектирование синглетного кислорода в биологических структурах актуальной задачей, решение которой позволит лучше понять функции различных структур клетки и разобраться в механизмах ее апоптоза. При этом для понимания роли синглетного кислорода в жизнедеятель-



ности живых организмов зачастую необходимо не только зарегистрировать его присутствие, но также и получить информацию о его пространственном распределении [1]. В данной работе представлены результаты параллельной регистрации динамики безызлучательной релаксации синглетного кислорода и кинетики сигнала его фосфоресценции в биологических клетках. Перед проведением экспериментов исследуемые образцы выдерживались в водном растворе фотосенсибилизатора Радахлорин, при этом осуществлялась его диффузия в клетки. Генерация синглетного кислорода производилась посредством воздействия на образец лазерного излучения с длиной волны в полосе поглощения фотосенсибилизатора. При взаимодействии возбужденных молекул фотосенсибилизатора с молекулами кислорода в основном состоянии происходило образование синглетного кислорода. Для детектирования безызлучательной релаксации синглетного кислорода проводилось восстановление массива фазового запаздывания волнового фронта, прошедшего через клетку, с помощью методов цифровой голографической микроскопии [2]. Регистрация сигнала фосфоресценции производилась с помощью ИК фотоэлектронного умножителя, работающего в режиме счета фотонов. Использование канала регистрации фосфоресценции позволило подтвердить присутствие синглетного кислорода в исследуемом образце наиболее прямым способом, однако ввиду слабости сигнала фосфоресценции применение лишь этого метода не дает возможности получить какую-либо информацию о пространственном распределении данной активной формы кислорода в клетке. При этом пространственное разрешение голографического подхода принципиально ограничено лишь дифракционным пределом, а в некоторых ситуациях может даже превышать его [3]. Таким образом, совместное использование данных взаимодополняющих методов позволяет выполнить регистрацию синглетного кислорода, а также получить информацию о его пространственном распределении.

#### Список литературы

1. Ogilby P.R. Singlet oxygen: there is indeed something new under the sun // *Chemical Society Reviews*. – 2010. – Т. 39. – №. 8. – С. 3181-3209;
2. Belashov A.V. et al. Holographic monitoring of spatial distributions of singlet oxygen in water // *Technical Physics Letters*. – 2014. – Т. 40. – №. 12. – С. 1134-1135;
3. Y. Kuznetsova, A. Neumann, and S.R. Brueck, “Imaging interferometric microscopy- approaching the linear systems limits of optical resolution,” *Opt. Express* 15, 6651–6663 (2007);

## Диэлектрическая спектроскопия кристаллов силленитов $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

Набиуллина Л. А.<sup>1</sup>, Кастро Р. А.<sup>1</sup>, Шадрин Е. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РГПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: lia-nabiullina@yandex.ru

Кристаллы силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  являются оксидами вида  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$  и относятся к пространственной группе  $I23$ . Важной особенностью структуры силленитов является стереохимически активная  $6s^2$  неподелённая электронная пара (НЭП)  $\text{Bi}^{3+}$ , что в сочетании с отсутствием центра инверсии является причиной проявления ярких элек-

трических и оптических эффектов. В частности, фоторефрактивный эффект используется во многих технических применениях силленитов, монокристаллы силленита также служат в качестве оптических датчиков тока и напряжения или используются в качестве поверхностных акустических волноводов. Повышенное значение диэлектрической проницаемости, небольшие потери и термостабильность кристаллов делают их перспективными материалами для техники СВЧ [1]. Целью работы явилось установление особенностей процессов диэлектрической релаксации и переноса заряда в кристаллах силленитов  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  (ВТО).

Образцы кристаллов ВТО были изготовлены в виде дисков диаметром 20.0 мм и толщиной 1.0 мм. Исследование элементного состава образцов производилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM) Carl Zeiss EVO 40. Измерения диэлектрических спектров проводились на спектрометре «Concept 81» компании Novocontrol Technologies GmbH & Co в интервале температур 273 К...373 К и частот  $10^{-1}$  Гц... $10^6$  Гц.

Дисперсия диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  характеризуется ее ростом с уменьшением частоты и увеличением температуры, что, по видимому, связано с проявлением механизмов дипольно-релаксационной поляризации. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь выявляет существование максимума потерь, положение которого меняется с ростом температуры, и указывает на их релаксационный характер в исследуемом интервале температур.

По результатам работы, возможно описание зависимости  $\epsilon''(\epsilon')$ , полученной близкой к линейной, в рамках универсального для диэлектриков закона Джоншера, основанного на энергетическом подходе [2]. В его модели поляризация связывается с прыжками ионов или электронов по длинным или коротким цепочкам. Дискретное смещение зарядов сопровождается экранированием возникающей поляризации за счет релаксации решетки. Подобные зависимости связывают с прыжковым механизмом проводимости, реализующимся за счет прыжков электронов (дырок) по локализованным энергетическим состояниям вблизи уровня Ферми [3]. Установлено, что перенос заряда является термически активированным процессом, энергия активации которого оказалась равной  $E_a = (0.72 \pm 0.03)$  эВ.

#### Список литературы

1. Lanfredi S., Nobre M.A.L., Conductivity mechanism analysis at high temperature in bismuth titanate: A single crystal with sillenite-type structure, Applied Physics Letters, 86, 081916, 2005;
2. Панченко Т.В., Диэлектрическая релаксация в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , Физика твердого тела, 42, 4, 671-675, 2000;
3. Н. Мотт, Э. Дэвис, Электронные процессы в некристаллических веществах, Мир, 380, 1974;

## Широкополосное преобразование излучения СО-лазера в нелинейном кристалле $\text{AgGaSe}_2$

Будилова О. В.<sup>1</sup>, Ионин А. А.<sup>1</sup>, Киняевский И. О.<sup>1</sup>, Климачев Ю. М.<sup>1</sup>,  
Козлов А. Ю.<sup>1</sup>, Котков А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФИАН

Эл. почта: oksana\_budilova@mail.ru

Осуществлено широкополосное двухкаскадное преобразование излучения СО-лазера (генерация второй гармоники, ГВГ, и разностной частоты, ГРЧ) в нелинейном кристалле  $\text{AgGaSe}_2$  (AGSe). Внутренняя эффективность преобразования излучения составила  $\sim 1\%$ . Спектр ГВГ излучения состоит из 48 спектральных линий в интервале длин волн от  $\sim 2,5$  мкм до 2,9 мкм, а спектр ГРЧ излучения состоит из  $\sim 50$  линий в интервале от 4,38 мкм до 4,85 мкм.

Ранее в работах<sup>1,2</sup> была реализована двухкаскадная генерация суммарных и разностных частот в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$  при накачке кристалла излучением многочастотного СО-лазера с модуляцией добротности резонатора, в результате чего на базе одного образца нелинейного кристалла  $\text{ZnGeP}_2$  и одного СО-лазера была создана широкополосная лазерная система, действующая примерно на 670 линиях в интервале длин волн от 2.5 мкм до 8.3 мкм.

В нашем эксперименте был использован кристалл AGSe длиной 12 мм. Использовался тот же многочастотный СО-лазер низкого давления с разрядом постоянного тока и модуляцией добротности резонатора, что и в работах<sup>1,2</sup>.

Для измерения временных и энергетических характеристик часть излучения СО-лазера отводилась пластинами из  $\text{CaF}_2$  на сферическое зеркало (радиус кривизны 0,25 м). От сферического зеркала излучение направлялось на измеритель средней мощности (Orphir-10A), установленный в 20 см от него, часть излучения с помощью пластины из  $\text{CaF}_2$  направлялось на фотодетектор (PEM-L-3), установленный в фокальной плоскости сферического зеркала. В данных экспериментах спектр излучения СО-лазера состоял из  $\sim 80$  спектральных линий с длинами волн от 4,9 до 6,8 мкм с суммарной пиковой мощностью до 1кВт при длительности импульсов  $\sim 1$  мкс.

Основная часть лазерного излучения ( $\sim 95\%$ ) фокусировалась линзой из  $\text{CaF}_2$  (фокусное расстояние  $\sim 60$  мм) на нелинейный кристалл. Для оптимальной фокусировки излучения на кристалл, держатель кристалла имел 3 поступательные степени свободы и 1 вращательную степень свободы для нахождения направления фазового синхронизма. Для коллимации расходящегося после кристалла излучения использовалось сферическое зеркало (фокусное расстояние  $\sim 0,5$  м). С помощью плоскопараллельной пластины толщиной 2 мм из ИК кварца, излучение накачки отсекалось от излучения, преобразованного в область спектра от 2,4 мкм до 4,8 мкм. Поворотным и сферическим (радиус кривизны 0,25 м) зеркалами, преобразованное излучение фокусировалось на фотодетектор (PEM-L-3) или направлялось на измеритель средней мощности (Orphir-3A). Для устранения влияния рассеяния ИК-излучения накачки от оптических элементов схемы и теплового излучения от первой кварцевой пластины, в которой оно поглощается, перед измерительными приборами помещалась вторая кварцевая пластина. С помощью фотодетекторов измерялись форма и амплитуда импульса накачки и генерации ВГ, и регистрировались на осциллографе (Tektronix TDS 2014).

Спектр ГВГ насчитывает 48 линий в интервале длин волн от  $\sim 2,5$  до  $\sim 2,9$  мкм с максимумом мощности при  $\sim 2,5$  мкм. Спектр ГРЧ насчитывает  $\sim 50$  линий в интервале длин волн от  $\sim 4,38$  до  $\sim 4,85$  мкм, при этом максимум мощности наблюдался при  $\sim 4,7$  мкм.

Внешний коэффициент преобразования определялся как отношение средней мощности преобразованного излучения к средней мощности излучения накачки, падающего на кристалл.

Максимальная средняя мощность ГВГ излучения составляла  $\sim 150$  мкВт и наблюдалась при частоте  $\sim 75$  Гц. Внешний коэффициент преобразования излучения достигает максимального значения при частоте модуляции резонатора  $\sim 130$  Гц и составляет  $\sim 0,52\%$ . С учётом френелевских потерь на отражение от непросветлённых граней кристалла это соответствует внутренней эффективности преобразования  $\sim 1\%$ .

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 13-05-98074 и 15-02-08037) и УНК ФИАН.

#### Список литературы

1. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et al. Optics Letters 37 (14), pp. 2838–2840 (2012);
2. Андреев Ю.М., Ионин А.А., Киняевский И.О. и др. Квантовая электроника, 43 (2), с.139-143 (2013);

## **Динамика фононных мод, возбужденных с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в сегнетоэлектрике-полупроводнике $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$**

*Гришунин К. А.<sup>1</sup>, Брехов К. А.<sup>1</sup>, Шерстюк Н. Э.<sup>1</sup>, Мишина Е. Д.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>МИРЭА

Эл. почта: grishunin@mirea.ru

Динамика наведенных возбуждений и их особенности в значительной степени определяют оптические свойства материала. Поглощение энергии фемтосекундных лазерных импульсов веществом за промежуток времени, малый по сравнению с характерным периодом движения атомов, сильно изменяет межатомный потенциал. Это приводит к таким эффектам, как нетепловое плавление [1], сверхбыстрые структурные переходы в твердой фазе [2], возбуждению квазичастиц, таких как фононы, экситоны, плазмоны, магноны и др. [3, 4].

Экспериментальные исследования, позволяющие изучать отклик среды на такие сверхбыстрые возбуждения, привлекают все больший интерес в самых различных областях современной науки. Наибольшую популярность такие исследования приобрели в физике полупроводников, где короткие лазерные импульсы позволили получить важную информацию о сверхбыстрой динамике носителей заряда и спинов в состояниях, далеких от равновесного [5].

В работе [6] впервые получены результаты наблюдения сверхбыстрого нетеплового влияния света на состояние намагниченности. Было показано, что благодаря опто-магнитному обратному эффекту Фарадея при помощи циркулярно поляризованных фемтосекундных лазерных импульсов можно изменять состояние спиновой подсистемы в магнетиках.

Однако, в сегнетоэлектрических материалах возможность сверхбыстрого переключения параметра порядка обсуждалась мало [7], что наталкивает на вопрос об исследовании возможности такого переключения.

Аналогично с исследованиями по сверхбыстрому управлению магнитным порядком с помощью света [8], необходимо изучить возможность оптического воздействия на параметр порядка в сегнетоэлектрических материалах.

В данной работе изучались возбуждение и динамика фононных мод с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в сегнетоэлектрике-полупроводнике  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ . Показана возможность возбуждения двух фононных мод в данном кристалле. Одна из мод соответствует акустическому фонону, в то время как вторая качественно совпадает с поведением мягкой моды в этом сегнетоэлектрике [9]. Также важно отметить, что возбужденные высокочастотные осцилляции претерпевали «размягчение» частоты на временах порядка нескольких пикосекунд. Данный эффект может свидетельствовать о фазовом переходе «порядок-беспорядок» в сегнетоэлектрике, индуцированным фемтосекундным лазерным импульсом и развивающимся в пикосекундном диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 14.Z50.31.0034).

#### Список литературы

1. Rouse A. et al., Non-thermal melting in semiconductors measured at femtosecond resolution, *Nature*, 410, 6824, 65–68, 2001;
2. Beaud P. et al., Ultrafast structural phase transition driven by photoinduced melting of charge and orbital order, *Phys. Rev. Lett.*, 103, 15, 155702, 2009;
3. Hannah D.C. et al., Direct measurement of lattice dynamics and optical phonon excitation in semiconductor nanocrystals using femtosecond stimulated raman spectroscopy, *Phys. Rev. Lett.*, 111, 10, 107401, 2013;
4. Melnikov A. et al., Coherent optical phonons and parametrically coupled magnons induced by femtosecond laser excitation of the Gd(0001) surface, *Phys. Rev. Lett.*, 91, 22, 227403, 2003;
5. Shah J. *Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Vol. 115. 522, 1999;
6. Kimel A. V. et al., Ultrafast non-thermal control of magnetization by instantaneous photomagnetic pulses, *Nature*, 435, 7042, 655–657, 2005;
7. Li J. et al., Ultrafast polarization switching in thin-film ferroelectrics, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 7, 1174–1176, 2004;
8. Kimel A. V. et al., Laser-induced ultrafast spin reorientation in the antiferromagnet  $\text{TmFeO}_3$ , *Nature*, 429, 6994, 850–853, 2004;
9. Eijt S.W.H., Currat R., Lorenzo J.E., Soft modes and phonon interactions in  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  studied by neutron scattering, *Eur. Phys. J. B.*, 5, 178, 169–178, 1998;

# Влияние сульфидной пассивации поверхности на излучательную рекомбинацию в двойных квантовых ямах CdSe/ZnSe с самоорганизованными квантовыми точками

Еременко М. В.<sup>1</sup>, Берковиц В. Л.<sup>1</sup>, Львова Т. В.<sup>1</sup>, Резницкий А. Н.<sup>1</sup>, Улин В. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: erjomenko@gmail.com

Актуальность исследований температурной зависимости фотолюминесценции (ФЛ) систем с самоорганизованными квантовыми точками (СКТ) определяется тем, такие системы, могут обладать значительно лучшими параметрами по сравнению с приборами на основе однородных квантовых ям. Рабочими температурами приборов, в основном, являются комнатные или более высокие. Однако параметры созданных устройств с СКТ остаются достаточно далекими от теоретически возможных. Причина этого — тушение люминесценции квантовых точек при повышении температуры. Как следствие, понимание микроскопических механизмов тушения люминесценции квантовых точек является важным.

В настоящей работе исследовано влияние сульфидной пассивации поверхности на температурную зависимость ФЛ асимметричных двойных квантовых ямах CdSe/ZnSe с СКТ, образованными эпитаксиальным осаждением двух слоев CdSe. Квантовые ямы разделены барьером ZnSe толщиной 14 нм и закрыты покрывающим слоем ZnSe толщиной 15 нм. Спектры ФЛ возбуждались излучением полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм с плотностью мощности порядка 10 Вт/см<sup>2</sup>. Исследование проводилось в интервале температур от 5 до 300К. Пассивация образцов проводилась при T=300К в водном растворе Na<sub>2</sub>S в течение 15 часов. Известно, что температурная зависимость интегральной интенсивности всего спектра ФЛ подобных структур имеет сложный характер и не может быть описана простой экспоненциальной функцией с одной активационной энергией [1]. В то же время результаты хорошо аппроксимируются функцией, содержащей две экспоненты:

$$I_{PL}(T) = \frac{I_0}{1 + a * \exp(-E_1 / kT) + b * \exp(-E_2 / kT)} \quad (1)$$

с энергиями активации  $E_1$  и  $E_2$ , заметно отличающимися по величине. Вполне удовлетворительная аппроксимация экспериментальной зависимости  $I_{PL}(T)$  для исходной структуры с не обработанной поверхностью может быть достигнута с использованием параметров  $E_1$  и  $E_2$  в интервалах  $E_1 = (35 \pm 3)$  мэВ и  $E_2 = (240 \pm 20)$  мэВ. С учетом этого допустимого интервала изменений параметров  $E_1$ ,  $E_2$  величина активационной энергии  $E_1 = 35$  мэВ может быть сопоставлена с разницей между энергией максимума полос ФЛ и длинноволновой полосы в спектре возбуждения ФЛ (ВФЛ). В работе [1] высказано предположение, что энергия активации  $E_2 = 240$  мэВ, определяется выбросом экситонов в материал барьера.

Мы обнаружили, что в результате сульфидной пассивации интегральная интенсивность ФЛ при надбарьерном возбуждении увеличилась при комнатной температуре более чем в 30 раз. Оказалось, что интегральная интенсивность ФЛ пассивированного образца также может быть описана с использованием двух экспонент с существенно различными энергиями активации. При этом энергия  $E_1$  с хорошей точностью остается такой же как и до пассивации. Это означает, что поверхность не влияет

на процесс тушения ФЛ в области температур  $T < 100\text{K}$ . В то же время энергия активации  $E_2$  пассивированного образца уменьшилась практически вдвое и составила  $E_2 = (110 \pm 10)$  мэВ. Полученный результат означает, что в области высоких температур ( $T > 150 \div 200\text{K}$ ) тушение определяется выбросом экситонов на поверхностные состояния, которые служат центрами безизлучательной рекомбинации. Таким образом, показано, что пассивация поверхности существенно увеличивает интенсивность излучения подобных структур при комнатной температуре.

#### Список литературы

1. А.Н. Резницкий, А.А. Клочихин, М.В. Еременко, Термостимулированное резонансное туннелирование в асимметричных системах двойных квантовых ям CdSe/ZnSe с самоорганизованными квантовыми точками, ФТП, том 48, выпуск 3, с. 332-337, 2014;

## Исследование квантовой эффективности гетероструктур на основе соединений $A^3B^5$ после травления сфокусированным ионным пучком

*Митрофанов М. И.<sup>1,2</sup>, Евтихийев В. П.<sup>1,2</sup>, Смирнов А. Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбПУ

Эл. почта: [maxi.mitrofanov@gmail.com](mailto:maxi.mitrofanov@gmail.com)

Одной из наиболее быстро развивающихся областей оптики в настоящее время является интегральная нанофотоника. В её задачи входит создание интегральных оптических схем для передачи и обработки информации, включающих в себя источник и приёмник излучения, оптические волноводы, пассивные и активные оптические элементы. Большое количество исследовательских работ и реальных устройств было создано на основе кремния [1]. Однако для создания источника излучения в оптических чипах на основе кремния используется гибридная стыковка с лазерами или светодиодами на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  [2]. Гибридная стыковка имеет высокую стоимость и не является достаточно надёжной. Малое количество работ на основе соединений  $A^3B^5$  в основном обусловлено дороговизной структур и литографического процесса, одним из требований к которому является получение зазора между оптическими элементами порядка 100 нм. Использование прямой литографии сфокусированным ионным пучком (СИП) для формирования элементов с размером менее 100 нм в полупроводниковых соединениях  $A^3B^5$  в промышленно выпускаемых установках затруднено из-за сильного прокисления в остаточной атмосфере рабочей камеры. Для предотвращения прокисления в процессе прямой литографии СИП нами была разработана сверхвысоковакуумная установка, основанная на растровом ионном и электронном микроскопах. Помимо прокисления, причиной нарушения кристаллического совершенства в процессе травления могут быть радиационные дефекты и ионная имплантация. Для исследования влияния различных режимов травления сфокусированным ионным пучком на квантовый выход люминесценции были использованы двойная гетероструктура  $Al_{0,8}Ga_{0,2}As/Al_{0,4}Ga_{0,6}As$  и лазерная гетероструктура  $Al_{0,4}Ga_{0,6}As/GaAs$  с квантовой ямой  $In_{0,2}Ga_{0,8}As$ . На двойной гетероструктуре были вытравлены отверстия размером

50×50 мкм различной глубины, а на лазерной гетероструктуре сформированы канавки шириной < 1 мкм на различную глубину, как до активной области, так и пересекая её. Травление производилось с различными ускоряющими напряжениями, также были сформированы образцы с использованием газа-прекурсора XeF<sub>2</sub>. Влияние режимов травления на кристаллическое совершенство слоев оценивалось с помощью рамановской спектроскопии. Квантовый выход люминесценции из слоя GaAs в двойной гетероструктуре и из квантовой ямы в лазерной гетероструктуре был исследован с помощью микро-фотолюминесценции. Анализ экспериментальных результатов, их сравнение с теоретическими расчётами показали перспективность использования прямой литографии сфокусированным ионным пучком в сверхвысоком вакууме для создания лазеров и элементов интегральной нанофотоники на основе полупроводниковых соединений A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>.

#### Список литературы

1. W. Green, S. Assefa, A. Rylyakov, C. Schow, F. Horst, Y. Vlasov, CMOS Integrated Silicon Nanophotonics: Enabling Technology for Exascale Computational System, SEMICON, 2010;
2. D. Liang, J.E. Bowers, Recent progress in lasers on silicon, Nature photonics 4, 511-517, 2010;

## Моделирование спектров полярных оптических фононов множественных квантовых ям и сверхрешеток GaN/AlN

Панькин Д. В.<sup>1</sup>, Смирнов М. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: dima-pankin@mail.ru

Полупроводниковые квантовые ямы (КЯ) и сверхрешетки на основе нитридов трехвалентных металлов перспективны в качестве элементов оптоэлектронных приборов, работающих при высоких температурах и напряжениях [1]. Одной из ключевых проблем для практического применения таких гетероструктур является проблема характеристики выращенных структур. На роль бесконтактного неразрушающего метода контроля структуры претендует спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света. Было установлено, что в спектрах КР этих систем есть линии, частотное положение которых весьма чувствительно к особенностям выращенной структуры [2]. Однако, использование колебательной спектроскопии для анализа пространственного строения гетероструктур требует знания количественных характеристик корреляции «структура-спектр». В данной работе решена задача расчета частот полярных оптических фононов в множественных квантовых ямах и сверхрешетках GaN/AlN. Расчет производился в рамках модели диэлектрического континуума (МДК) [3]. Рассматривалась модель, в которой чередующиеся слои GaN и AlN были заключены между двумя полубесконечными барьерными слоями AlN. Рассматривались симметричные системы с равными толщинами слоев и с числом квантовых ям от 2 до 16. В качестве предельного случая бесконечного числа квантовых ям рассматривался случай сверхрешетки. Моделирование проводилось для практически важного случая – тонкослойных структур, в которых толщина слоев  $d$  много меньше длины волны рассеиваемого света  $\lambda$ .



Наше внимание было сфокусировано на изучении поведения А(ЛО) и Е(ТО) фононов. Согласно нашим расчетам именно эти моды имеют наибольшую интенсивность в спектре КР и меньше всего подвержены влиянию упругих деформаций, возникающих при росте слоистых гетероструктур. Сочетание этих особенностей А(ЛО) и Е(ТО) фононов позволяют использовать соответствующие им спектральные линии для характеристики выращенной структуры.

Схема расчета в рамках МДК состоит в решении уравнений Максвелла с учетом граничных условий на интерфейсах, которые приводят к системе связанных линейных уравнений. Общий подход решения таких систем заключается в использовании метода матриц переноса, см., например [4]. Типичной вычислительной трудностью в рамках матриц переноса является составление и решение векового уравнения, с помощью которого определяют частоты полярно-оптических фононов. На основании анализа физического смысла данных мод и лежащей в основе МДК процедуры усреднения электрического поля авторами был предложен новый метод, позволяющий составить вековое уравнение, не прибегая к громоздким вычислениям. Такой подход будет абсолютно точным в пределе тонкопериодных структур, и приближенным для реальных систем. В данной работе проведено сопоставление приближенного решения, найденного новым методом, с точным решением и установлены границы применимости предлагаемого приближения. Для модельной системы из двух КЯ, для которых безразмерный параметр  $s = d / \lambda$  равен 0.5, расхождение составляет менее  $3 \text{ см}^{-1}$ . А для множественных квантовых ям с  $s = 0.2$  и с числом КЯ до 16 расхождение составляет менее  $1 \text{ см}^{-1}$ . Стоит отметить, что данный метод может быть расширен и на случай систем, в которых существенны упругие деформации. Учет деформаций может быть осуществлен путем подстановки в уравнения МДК значений фононных частот (характеризующих материалы слоев), пересчитанных с учетом напряжений, существующих в конкретной изучаемой гетероструктуре.

#### Список литературы

1. S. Nakamura, «The Blue Laser Diode-GAN Based Light Emitters and Lasers», Springer, 1997;
2. М.Б. Смирнов, С.В. Карпов, В.Ю. Давыдов, А.Н. Смирнов, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, «Колебательные спектры сверхрешеток AlN/GaN: теория и эксперимент», Физика твердого тела, Т. 47, № 4, 716-727, 2005 г.;
3. J. Gleize, M.A. Renucci, J. Frandon, and F. Demangeot, «Anisotropy effects on polar optical phonons in wurtzite GaN/AlN superlattices», Phys. rev. B 60, 15985, 1999;
4. SeGi Yu, K.W. Kim, Michael A. Stroscio, G.J. Iafrate, J.-P. Sun et al, «Transfer matrix method for interface optical-phonon modes in multiple-interface heterostructure systems», J. Appl. Phys. 82, 3363, 1997;

## Исследование каскада фазовых переходов в мультиферроике $\text{CuV}_2\text{O}_4$ методом поляризационной спектроскопии.

Молчанова А. Д.<sup>1</sup>, Болдырев К. Н.<sup>1</sup>, Попова М. Н.<sup>1</sup>, Писарев Р. В.

<sup>1</sup>ИСАН

Эл. почта: [nastyamolchanova@list.ru](mailto:nastyamolchanova@list.ru)

Метаборат меди – соединение с богатыми набором необычных физических свойств. Он обладает, в частности, богатой магнитной фазовой диаграммой, оптической активностью, рядом линейных и нелинейных оптических свойств, магнитоэлектрическим эффектом, нетипичным оптическим спектром меди и др.  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  кристаллизуется в нецентросимметричную тетрагональную структуру с пространственной группой симметрии  $I42d$  ( $Z = 12$ ). В примитивной ячейке содержится две различные позиции ( $4b$  и  $8d$  с симметрией  $S_4$  и  $C_2$ ) для магнитного иона  $\text{Cu}^{2+}$  ( $S = 1/2$ ). Ионы меди обеих позиций квадратно координированы, как и в высокотемпературных сверхпроводниках. Две магнитные подсистемы меди,  $4b$  и  $8d$ , упорядочиваются отдельно, при  $T_N = 21$  К и  $T^* = 8.5$  К, соответственно. Конкуренция различных внутри- и межподсистемных обменных взаимодействий и геометрическая фрустрация обменов приводят к сложной фазовой диаграмме  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  с различными магнитными структурами и многочисленными спонтанными и индуцированными полем фазовыми переходами, понимание природы остаётся до конца неизвестным. Низкотемпературные спектры  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  обладают богатой тонкой структурой, связанной с d-d электронными переходами в позициях меди  $4b$  и  $8d$ , в сопровождении очень богатой вибронной структурой, состоящей более чем из 40 фононных повторений для каждой БФЛ [1].

Недавно сообщалось о возможности управления кристаллической хиральностью в  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  [2], однако впоследствии это заявление было опровергнуто сначала теоретически [3], а затем и экспериментально [4]. Экспериментальное доказательство строилось на обнаружении нового, значительного по величине, эффекта – линейного антиферромагнитного дихроизма (ЛАФМД), связанного с Давыдовским расщеплением узких экситонных линий меди [4]. Было показано, что компоненты Давыдовских дублетов меняют интенсивность при повороте поляризации, причем максимумы совпадают с направлениями  $[110]$  и  $[-110]$  магнитных доменов в подсистеме  $\text{Cu}(4b)$ , и таким образом удалось обнаружить расщепление магнитного фазового перехода при температуре  $T^* = 8$  К, а также уточнить характер магнитных структур в соразмерной и несоизмерной магнитных фазах [4].

В настоящей работе было продолжено исследование кристалла метабората меди методом ЛАФМД в более низкотемпературной области с использованием заливного гелиевого оптического криостата с последующей откачкой паров гелия (ранее неисследованная область температур 3 – 1.3 К). Данное исследование позволило обнаружить дополнительно 3 новых фазовых перехода в метаборате меди, а именно двойной фазовый переход при температуре  $T_{LT1} = 2.0$  К, и фазовый переход при температуре  $T_{LT2} = 1.9$  К. Так же, как и при температуре  $T^*$  [4], в точке  $T_{LT1}$  линейный дихроизм дважды менял свой знак. Три температуре же  $T_{LT2}$  сигнал ЛАФМД полностью исчезал, что может свидетельствовать о переходе соединения из эллиптической в круговую несоизмерную магнитную структуру. Таким образом, исследование спектров линейного магнитного дихроизма высокого разрешения продемонстрировало возможность выявления магнитных фазовых переходов и магнитных структур в

сложных магнетиках, таких как  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . Стоит также отметить, что каскад магнитных фазовых переходов в метаборате меди может свидетельствовать о фазовых переходах типа «чертова лестница».

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований (№15-32-20613) и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых (МК-3521-2015.2).

#### Список литературы

1. R.V. Pisarev, A.M. Kalashnikova, O. Schops, L.N. Bezmaternykh, Electronic transitions and genuine crystal-field parameters in copper metaborate  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ , Phys. Rev. B, 84, 075160, 2011;
2. M. Saito, K. Ishikawa, K. Taniguchi, T. Arima, Magnetic Control of Crystal Chirality and the Existence of a Large Magneto-Optical Dichroism Effect in  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ , Phys. Rev. Lett., 101, 117402, 2008;
3. S.W. Lovesey, U. Staub, Calculated chiral and magneto-electric dichroic signals for copper metaborate ( $\text{CuB}_2\text{O}_4$ ) in an applied magnetic field, J. Phys.: Condens. Matter 21, 142201, 2009;
4. K. N. Boldyrev, R. V. Pisarev, L. N. Bezmaternykh, M. N. Popova, Antiferromagnetic Dichroism in a Complex Multisublattice Magnetoelectric  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ , Phys. Rev. Lett., 114, 247210, 2015;

## Длинноволновая ИК-спектроскопия самариевого хромового бората со структурой хантита

Добрецова Е. А.<sup>1</sup>, Болдырев К. Н.<sup>1</sup>, Гаврилкин С. Ю.<sup>2</sup>, Мухин А. А.<sup>3</sup>, Иванов В. Ю.<sup>3</sup>, Мальцев В. В.<sup>4</sup>, Леонюк Н. И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт спектроскопии РАН (ИСАН)

<sup>2</sup>ФИАН

<sup>3</sup>ИОФ РАН

<sup>4</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова

Эл. почта: elena-dobrecova@yandex.ru

$\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$  относится к семейству редкоземельных (РЗ) хромовых боратов со структурой минерала хантита (пр.гр.  $R32$ ). Эти соединения обладают богатыми магнитными свойствами, что обусловлено наличием двух взаимодействующих магнитных подсистем (РЗ и хрома).

Ранее были проведены комплексные исследования  $\text{NdCr}_3(\text{BO}_3)_4$ . Было установлено, что кристаллы антиферромагнитно упорядочиваются в легкоплоскостную магнитную структуру при температуре около 8.0 К (Porova, 2007; Болдырев, 2008). В недавно опубликованной статье (Gondek L, 2014) в результате комплексных исследований  $\text{EuCr}_3(\text{BO}_3)_4$  обнаружен антиферромагнитный фазовый переход при температуре около 9 К. Авторами (Болдырев, 2014; Добрецова, 2014) были представлены первые данные по магнитным свойствам  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$ , свидетельствующие о каскаде фазовых переходов при температурах  $T_1 = 7.8 \pm 0.5$  К,  $T_2 = 6.7 \pm 0.5$  К и  $T_3 = 4.3 \pm 0.2$  К. В настоящей работе проведено подробное спектроскопическое исследование  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$  в длинноволновой ИК-области в дополнение к результатам измерений теплоемкости и магнитной восприимчивости.

Получены спектры пропускания монокристаллических образцов  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$  в широком температурном диапазоне. При понижении температуры наблюдается смещение и уширение фоновых линий. Наиболее чувствительными фоновыми линиями оказались низкочастотные линии, соответствующие колебаниям, в которых участвует редкоземельный ион  $\text{Sm}^{3+}$ . Такие линии претерпевает заметное изменение значения волнового числа при понижении температуры. Кроме того, у них прослеживается поведение, как у мягких мод, что характерно для сегнетоэлектриков (Гинзбург, 1949; Cochran, 1960). Спектроскопические исследования мягкой моды являются источником информации о микроскопическом механизме фазового перехода. Таким образом, самариевый хромовый борат можно отнести к новому классу мультиферроиков – соединений, в которых сосуществуют ферромагнитный и сегнетоэлектрический параметр порядка, что актуально не только для исследования новых явлений, но и возможных применений, например, в устройствах спинтроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 14-12-01033) и стипендии Президента РФ (СП-754.2015.1).

#### Список литературы

1. Болдырев К.Н., Добрецова Е.А., Гаврилкин С.Ю., Мальцев В.В., Леонюк Н.И., Магнитные фазовые переходы в новом мультиферроике  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$ , Вестник НИЯУ «МИФИ», 3, 4, 484-491, 2014;
2. Болдырев К.Н., Чукалина Е.П., Леонюк Н.И., Спектроскопическое исследование редкоземельно-хромовых боратов  $\text{RCr}_3(\text{BO}_3)_4$  ( $\text{R}=\text{Nd}, \text{Sm}$ ), Физика твердого тела, 50, 9, 1617-1619, 2008;
3. Гинзбург В.Л., О поляризации и пьезоэффекте титаната бария вблизи точки сегнетоэлектрического перехода, ЖЭТФ, 19, 1, 36-41, 1949;
4. Добрецова Е.А., Болдырев К.Н., Спектроскопические исследования хромового бората самария  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$ , Ученые записки физического факультета МГУ, 4, 144308, 2014;
5. Cochran W., Crystal stability and the theory of ferroelectricity, Advances in Physics, 9, 36, 387-423, 1960;
6. Gondek Ł., Szytuła A., Przewoźnik J., Żukrowski J., Prokhorov A., Chernush L., Zubov E., Dyakonov V., Duraj R., and Tyvanchuk Yu., On the peculiar properties of triangular-chain  $\text{EuCr}_3(\text{BO}_3)_4$  antiferromagnet, Journal of Solid State Chemistry, 210, 1, 30-35, 2014;
7. Popova E., Leonyuk N., Popova M., Chukalina E., Boldyrev K., Tristan N., Klingeler R., and Büchner B., Thermodynamic and optical properties of  $\text{NdCr}_3(\text{BO}_3)_4$ , Physical Review B, 76, 5, 054446, 2007.

## Исследование возможности кодирования и декодирования информации, переносимой стохастическим сверхширокополосным световым потоком

Глухов В. А.<sup>1</sup>, Куликов И. Р.<sup>1</sup>, Толмачев Ю. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: xbox6@mail.ru

Передача информации с помощью сверхширокополосных случайных процессов является одним из наиболее перспективных путей развития систем оптической связи. Таким процессом является излучение теплового источника света или лазерного суперконтинуума. Закономерности в псевдослучайном сигнале, введенные при кодировании, позволяют выявить корреляционный анализ. Если сигнал описывается суммой  $n$  копий случайного процесса, разнесенных по времени на эквидистантные промежутки, то автокорреляционная функция имеет  $2n-1$  максимумов, выраженных тем ярче, чем шире спектр самого процесса.

В работе использован оптический коррелятор на базе бипризмы Френеля [1], его действие основано на взаимодействии с фотоприемником двух пучков со стохастической зависимостью амплитуды от времени  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$ , распространяющихся под малым углом  $2\alpha$  друг к другу. Регистрируемая пространственно-чувствительным приемником экспозиция  $H(x)$  есть [2]:

$$H(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [f_1(t - x \sin \alpha / c)]^2 dt + \int_{-\infty}^{\infty} [f_2(t - x \sin \alpha / c)]^2 dt + \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t - x \sin \alpha / c) f_2(t + x \sin \alpha / c) dt$$

Координата  $x$  пропорциональна взаимной задержке пучков. Регистрограмма, таким образом, состоит из медленно меняющейся подложки и переменной части, описывающей взаимную корреляцию световых пучков. При этом, если  $f_1(x) = f_2(x)$ , то фотоприемник будет регистрировать автокорреляционную функцию падающего сигнала, ширина ее обратно-пропорциональна ширине взаимного спектра исследуемых процессов. Если же функции  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  не совпадают, то – взаимно-корреляционную функцию.

Введение числовой информации в случайный световой поток (кодирование) осуществлялось с помощью системы тонких прозрачных пленок. В первом опыте использовалось отражение от двух поверхностей пленки толщиной несколько микрометров. Суммарный поток тогда – псевдослучайный сигнал, несущий кодовую последовательность +1 и -1. По регистрограмме, состоящей из трех групп колебаний,

уверенно определялся интервал задержки и толщина пленки, что свидетельствует об успешном декодировании информации. Дальнейшие эксперименты были направлены на увеличение разрядности кодера путем увеличения числа вносимых копий в сигнал. Для этого в световой поток вводилось несколько задержек с помощью пакета пленок одинаковой толщины, применялась также система зеркал в виде отражательного эшелона Майкельсона. Декодирование во всех случаях производилось с помощью описанного выше коррелятора.

#### Список литературы

1. Глухов В.А., Куликов И. Р., Толмачёв Ю.А., Экспериментальное изучение корреляционных свойств оптических сигналов с помощью автокоррелятора на основе бипризмы Френеля, VIII международная научно-практическая конференция «научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке», 29-30 августа 2014;
2. Толмачев Ю.А., Цзюэ Ван, Особенности интерференции ультракоротких импульсов, Вестник СПбГУ, Сер. 4, вып. 1, С. 39-46, 2006;

## Селективные фоточувствительные структуры Au-AlGaN для диапазона длин волн 350 – 370 нм

Ламкин И. А.<sup>1</sup>, Тарасов С. А.<sup>1</sup>, Соломонов А. В.<sup>1</sup>, Курин С. Ю.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

<sup>2</sup>ООО «Нитридные кристаллы»

<sup>3</sup>СПбАУ НОЦ ИТ

Эл. почта: ialamkin@mail.ru

Приборы на основе фотоприемников широко применяются практически во всех областях человеческой деятельности. В последние годы все сильнее проявляется потребность в создании селективных фотодетекторов, позволяющих надежно регистрировать излучение в заданном диапазоне длин волн в условиях сильной фоновой засветки. Использование оптических фильтров для достижения эффекта селективности зачастую является неприемлемым вследствие их высокой стоимости и склонности к деградации. Особенно актуальна разработка селективных фотоприемников для ультрафиолетовой области спектра.

Одним из самых перспективных материалов для решения этой задачи является широкозонный твердый раствор AlGaN. Важно, что для успешного внедрения подобных детекторов в производство необходима разработка такой технологии их создания, в рамках которой возможно достичь высоких параметров приборов при обеспечении их невысокой себестоимости. С этой точки зрения весьма актуальным является исследование структур на основе барьера Шоттки. Использование таких структур позволило реализовать высокоэффективные УФ-фотодетекторы сравнительно простыми и малозатратными методами. В работе были созданы и исследованы фоточувствительные структуры на основе контакта Au-AlGaN. Эпитаксиальные слои твердого раствора AlGaN различного состава выращивались на подложке сапфира методом хлоридно-гидридной эпитаксии. Омический и выпрямляющий контакты создавались методом термического вакуумного напыления. В качестве омического контакта использовалась композиция Ti/Al, где Ti толщиной 15 нм является подсло-

ем для Al толщиной 100 нм. Для достижения низких контактных сопротивлений использовалась методика высокотемпературного отжига в вакууме. Выпрямляющие контакты создавались путем нанесения слоя золота толщиной 15 нм. Площади структур варьировались в диапазоне 1-15 мм<sup>2</sup>.

В работе реализованы фоточувствительные структуры для диапазона длин волн 350 ÷ 370 нм и продемонстрирована возможность управления степенью селективности таких структур без использования внешних оптических фильтров. Показана возможность достижения высокой степени селективности за счет комбинирования эффекта надбарьерного переноса в контакте Шоттки и эффекта широкозонного окна в эпитаксиальной структуре. Были созданы структуры с прямой засветкой (со стороны барьера Шоттки Au-AlGa<sub>N</sub>) и с обратной засветкой (со стороны сапфировой подложки). При использовании прямой засветки спектр фоточувствительности был широкополосным с диапазоном фотоответа от 200 нм до 370 нм и содержал два поддиапазона, соответствующих преваляированию межзонных переходов или эффекта надбарьерного переноса. При обратной засветке излучение проходило через прозрачную подложку, а эпитаксиальный слой AlGa<sub>N</sub> выступал в качестве широкозонного окна. Толщина этого слоя подбиралась таким образом, чтобы до металла доходило только излучение с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны полупроводника, вызывая надбарьерный перенос носителей заряда. Положение длинноволновой границы фоточувствительности селективного приемника в этом случае определялось высотой потенциального барьера Au-AlGa<sub>N</sub>, которой можно управлять за счет изменения состава твердого раствора AlGa<sub>N</sub> и, в меньшей степени, путем управления состоянием поверхности полупроводника. Для независимого управления положением коротковолновой границы фоточувствительности в структуру фотоприемника добавлялся дополнительный относительно узкозонный слой твердого раствора с меньшей долей AlN.

Таким образом, был создан набор селективных фотоприемников для диапазона длин волн 350 ÷ 370 нм с высокой степенью селективности (полуширина спектра фоточувствительности составила 5-6 нм). Чувствительность созданных селективных фотоприемников достигала 140 мА/Вт.

## **Оптическая обратная связь и эффективность управления в мощных лазерах-тиристорах, излучающих на 905 нм**

*Соболева О. С.<sup>1</sup>, Подоскин А. А.<sup>1</sup>, Захаров М. С.<sup>1</sup>, Золотарев В. В.<sup>1</sup>, Бахвалов К. В.<sup>1</sup>, Рожков А. В.<sup>1</sup>, Веселов Д. А.<sup>1</sup>, Соколова З. Н.<sup>1</sup>, Романович Д. Н.<sup>1</sup>, Пихтин Н. А.<sup>1</sup>, Тарасов И. С.<sup>1</sup>, Слипченко С. О.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: [saboleva@ioffe.mail.ru](mailto:saboleva@ioffe.mail.ru)

Для генерации мощных импульсов излучения полупроводниковыми лазерами традиционно используются довольно сложные и громоздкие внешние импульсные источники питания. Это лишает полупроводниковые лазеры их основных преимуществ при переходе к высоким мощностям. Решением проблемы может стать интеграция токового тиристорного ключа в лазерную гетероструктуру, что позволяет разместить генератор токовых импульсов непосредственно в области усиления. Полученные в [1] и [2] результаты демонстрируют перспективу использования эпитак-

сиальноинтегрированных гетероструктур лазера-тиристора для создания мощных и компактных импульсных излучателей.

На данный момент максимальная оптическая пиковая мощность данного типа приборов составляет 55 Вт при длительности импульса 100 нс (минимальная длительность импульса — 12 нс), что сравнимо с лучшими результатами, продемонстрированными обычными полупроводниковыми лазерами [3, 4]. В работе [5] показано, что тиристорная гетероструктура может быть представлена в виде оптопары лазерный диод-гетерофототранзистор с нелинейной обратной связью, реализованной за счет фотогенерации неравновесных носителей в базе гетерофототранзистора при поглощении части спонтанного и рассеянного излучения, генерируемых лазерной частью прибора. Таким образом, основные особенности динамических характеристик лазера-тиристора связаны с оптической обратной связью и процессом фотоактивации.

В представленной работе впервые проведены комплексные экспериментальные исследования и анализ факторов, определяющих эффективность оптической обратной связи лазера-тиристора. Показано, что скорость фотогенерации обладает сложной зависимостью как от тока через лазерную часть прибора, так и напряжения на коллекторном р-п переходе. Это связано со сложной токовой динамикой спектра спонтанного излучения, которая определяется структурой активной области лазерного диода, наличием спейсеров. Продемонстрирована зависимость спектра спонтанного излучения в диапазоне плотностей тока накачки от  $0,01 \text{ mA/cm}^2$  до десятков  $\text{kA/cm}^2$ . Особенности полученной структуры являются смещение длинноволнового края спектра в низкоэнергетическую зону с ростом тока накачки из-за экранировки межатомных потенциалов накопленной е-р плазмой. А также усиленное расширение спектра в коротковолновую область, начиная с плотностей тока  $20 \text{ A/cm}^2$ , за счет заполнения носителями энергетических состояний, соответствующих GaAs спейсерам. Впервые подробно исследован край спектра поглощения GaAs в неоднородном электрическом поле при пиковых значениях до  $(5 \times 10^6) — 10^7 \text{ V/cm}$ , показан его сдвиг в длинноволновую область вплоть до значений 940 нм. Другой важный фактор, продемонстрированный экспериментальным путем, связан с влиянием ударной ионизации, как дополнительного канала генерации избыточных зарядов. Экспериментально показано, что ударная ионизация проявляется уже с начальных значений блокирующих напряжений.

Показано, что повышение чувствительности поглощения в базе гетерофототранзисторной части прибора к длинноволновой области излучения (смещение края спектра поглощения в область более низких энергий) существенно влияет на эффективность фотогенерации, и, как следствие, на динамику переходных процессов лазера-тиристора. В результате оптимизации оптической обратной связи достигнута высокая энергетическая эффективность управления. Показана возможность переключения высоких мощностей (до 50 Вт) и плотностей тока (до  $100 \text{ kA/cm}^2$ ) малыми сигналами управления (десятки  $\text{mA/cm}^2$ ).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01560).

#### Список литературы

1. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Zverkov M.V., Konyaev V.P., Kurniavko Y.V., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Simakov V.A., High-Power Pulse



- Semiconductor Laser-Thyristor Emitting at 900-nm Wavelength, *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.25, pp.1664 – 1667, 2013;
2. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Rozhkov A.V., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Simakov V.A., High-Power Laser-Thyristors with High Injection Efficiency ( $\lambda=890-910$  nm), *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol.27, pp.307-310, 2015;
  3. Wang X., Crump P., Wenzel H., Liero A., Hoffmann T., Pietrzak A., M. Schultz C., Klehr A., Ginolas A., Einfeldt S., Bugge F., Erbert G. and Tränkle G., Root-cause analysis of peak power saturation in pulse-pumped 1100 nm broad area single emitter diode lasers, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 46, pp. 658–665, 2010;
  4. Pietrzak A., Crump P., Wenzel H., Staske R., Erbert G. and Tränkle G., 55W peak power from 1100 nm wavelength 60  $\mu\text{m}$  broad-area laser diodes enabled by reduced carrier accumulation in the waveguide, *Semicond. Sci. Technol.*, vol.24, pp.035020, 2009;
  5. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Pikhtin N.A., Tarasov I.S. and Gorbatyuk A.V., Model of Steady-State Injection Processes in a High-Power Laser-Thyristor Based on Heterostructure With Internal Optical Feedback, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol.62, pp.149 — 154, 2015;

## **Электронейтральность и зонная диаграмма лазера на КТ с модулированным легированием**

*Коноплев С.С.<sup>1</sup>, Савельев А. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПб АУ НОЦ НТ

Эл. почта: konoplev.serгей@yandex.ru

Полупроводниковые лазеры с InAs/InGaAs/GaAs квантовыми точками (КТ) обладают рядом преимуществ, такими как низкие пороговые токи, широкий спектр генерации, температурная стабильность [1]. Лазеры излучают в спектральном диапазоне 1.2-1.3 мкм отвечающем окну прозрачности кремниевого оптоволокна. Широкий спектр излучения обуславливает возможность их применения для многоканальной передачи данных как выгодной альтернативы используемым в настоящее время одночастотным лазерам с распределенной обратной связью (РОС) [2]. Однако, при увеличении тока накачки КТ переходит в двухуровневый (многоуровневый) режим генерации и в спектре излучения появляется коротковолновая линия [3]. Известно, что за порогом двухуровневой генерации имеет место ограничение мощности, излучаемой на основном оптическом переходе, вплоть до полного ее гашения [4]. Для подавления генерации на возбужденном переходе и увеличении мощности излучения основного состояния было предложено модулированное легирование КТ акцепторами р-легирование [1].

В работе исследуется влияние модулированного легирования на характеристики лазера с учетом нарушения электро-нейтральности КТ [5]. Ранее ограничение мощности, излучаемой на основном переходе описывалось феноменологически [6], отношение темпа захвата дырок к темпу захвата электронов ( $h$ -фактор) определяющий режим генерации КТ предполагался константой, определяемой из эксперимента. В нашей работе  $h$ -фактор был вычислен непосредственно из самосогласованного решения транспортных уравнений в структуре и системы скоростных уравнений опи-

сывающих динамику носителей в КТ. Изучена зависимость  $h$ -фактор от параметров лазера, тока накачки и модулированного легирования КТ, что позволило количественно объяснить влияние модулированного легирования на лазерные характеристики. Продемонстрировано, что асимметрия носителей заряда в структуре и в КТ имеет ключевое значение для описания работы лазера. Исследуя зонные диаграммы лазера было показано, что приближение плоских зон и приближение отсутствия экранирования [5] не описывают лазер в интересующем нас диапазоне токов накачки начиная с порога лазерной генерации. В заключении, был исследован механизм влияния модулированного легирования на лазерные характеристики и проведена оптимизация параметров для достижения наилучших результатов.

#### Список литературы

1. C. Sandall, P.M. Smowton, J.D. Thomson, T. Badcock, D.J. Mowbray, H.-Y Liu, Temperature dependence of threshold current in p-doped quantum dot lasers, *Appl. Phys. Lett.* 89, 2006;
2. C.S. Lee, W. Guo, D. Basu, P. Bhattacharaya, High performance tunnel injection quantum dot comb laser, *Appl. Phys. Lett.*, 2010, Vol. 96, no. 10, pp. 101 — 107;
3. А.Е. Жуков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Особенности одновременной генерации через основное и возбуждённое состояния в лазерах на квантовых точках, *ФТП*. 2012, Vol. 46, no. 2. pp. 241 — 246;
4. A. Markus, J.X. Chen, C. Paranthoen, Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers, *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 82, no. 12, pp. 1818 — 1820;
5. L.V. Asryan, R.A. Suris, Charge Neutrality Violation in Quantum-Dot Lasers, *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 3, no. 2, 1997;
6. V.V. Korenev, A.V. Saveliev, A.E. Zhukov, Analytical approach to the multi-state lasing phenomenon in quantum dot lasers, *Appl. Phys. Lett.*, 2013, Vol. 102, no. 11, pp. 112 -101;

## Управление селекцией мод кольцевых микрорезонаторов

Левитский Я. В.<sup>1,2,3</sup>, Евтихий В. П.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>НТЦ микроэлектроники РАН

<sup>3</sup>СПбПУ

Эл. почта: levitskyar@gmail.com

Кольцевые резонаторы, используемые в качестве базовых элементов оптических микросхем [1, 2], представляют интерес прежде всего из-за мод шепчущей галереи, которые являются сильно локализованными резонансами с большой интенсивностью света вблизи края диска или кольца [3]. Но кольцевые микрорезонаторы кроме мод шепчущей галереи также поддерживают радиальные моды более высоких порядков. В работе [4] были продемонстрированы изменения модового состава кольцевых микролазеров за счет травления сфокусированным ионным пучком отверстий и канавок в них. Однако, сведения о принципах выбора местоположения, размера, формы и количества полостей в работе отсутствуют. Поэтому, целью работы стало более детальное исследование возможности модификации микрокольцевых резонаторов за счет введения в них субволновых полостей для управления модовым составом.

вом. Поиск перспективных модификаций кольцевых микрорезонаторов был произведен методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics.

По результатам предварительных экспериментов, в ходе которых был исследован модовый состав целого ряда кольцевых и дисковых микрорезонаторов, сформированных на лазерной гетероструктуре InGaAs/AlGaAs/GaAs, для численного моделирования был выбран кольцевой микрорезонатор с внешним диаметром 9 и внутренним 5 мкм. В программе были заданы соответствующие материалам параметры (на длине волны  $\sim 1200$  нм): действительная часть показателя преломления  $n = 3.4334$ , коэффициент экстинкции (мнимая часть показателя преломления)  $k = 1.1937 \cdot 10^{-5}$ , проводимость  $\sigma = 10^{-6}$  См. После расчета собственных мод данного кольцевого микрорезонатора были выбраны моды различного порядка для численного исследования влияния субволновых полостей в резонаторе. Также было получено, что характерное расстояние между пиками интенсивности выбранных мод составило 100 нм, поэтому отверстия именно такого диаметра были рассмотрены в первую очередь. Дефект располагался на различных расстояниях от центра микрорезонатора. Во всех расчетах принималось, что микрорезонатор окружен воздушной средой, дефекты в виде отверстий круглой формы также принимались заполненными воздухом.

По результатам численного моделирования были сделаны следующие выводы. Во-первых, при расположении дефекта диаметром больше 100 нм в максимуме интенсивности электромагнитной волны соответствующая мода перестает быть собственной из-за дифракции, а при меньших диаметрах мода остается собственной. В дополнение, для мод более высокого радиального порядка существует расположение дефекта между пиками интенсивности по радиусу кольцевого микрорезонатора при котором, несмотря на незначительную дифракцию, мода остается собственной. Таким образом, возможны конфигурации, например, когда одиночный дефект подавляет моду второго порядка, но практически не затрагивает моду первого порядка, и наоборот. Во-вторых, выяснилось, что радиальная мода третьего порядка с уверенностью подавляется с помощью введения в микрорезонатор трех полостей диаметром 100 нм каждая, расположенных, например, в вершинах равностороннего треугольника.

Моделирование кольцевого микрорезонатора, содержащего 3 субволновые полости диаметром 100 нм каждая, туннельно связанного с парой планарных волноводов (на практике такая конфигурация носит название add-drop фильтр) показало подавление радиальной моды третьего порядка и ослабление радиальной моды второго порядка (коэффициент пропускания фильтра уменьшился в 2 раза по сравнению с бездефектным кольцом).

Результаты численного моделирования позволили сформулировать подходы к селекции мод кольцевых микрорезонаторов с помощью введения субволновых дефектов в них. Проведена серия экспериментов для проверки результатов численного моделирования. Кольцевые микрорезонаторы и полости в них изготовлены методом травления сфокусированным ионным пучком на оригинальной установке.

#### Список литературы

1. Hunsperger R.G, Integrated Optics: Theory and Technology, Springer, 2009;
2. Rabus D.G, Integrated Ring Resonators: The Compendium, Springer, 2007;
3. Mohammadi F., Ahmadi V., Gandomkar M., Dynamics and Frequency Response of Microring-Based Optical Modulator Considering Nonlinear Effects, Lightwave Technology, v. 30, 23, pp. 3720 – 3726, 2012;

4. Kryzhanovskaya N.V, Mukhin I.S., Moiseev E.I., Shostak I.I., Bogdanov A.A., Nadochiy A.M., Maximov M.V., Zhukov A.E., Kulagina M.M., Vashanova K.A., Zadiranov Yu.M., Troshkov S.I., Lipovskii A.A., and Mintairov A., Control of emission spectra in quantum dot microdisk/microring lasers, *Opt. Express* 22, 25782-25787, 2014;

## **Светоизлучающие структуры на основе коллоидных квантовых точек сульфида кадмия, обладающие высоким индексом цветопередачи**

*Степанов Е. М.<sup>1</sup>, Михайлов И.И.<sup>1</sup>, Тарасов С. А.<sup>1</sup>, Соломонов А. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: [stepanovem2015@mail.ru](mailto:stepanovem2015@mail.ru)

Создание и исследование структур, содержащих квантовые точки, является одной из самых актуальных задач современной фотоники, поскольку приборы на их основе обладают существенно улучшенными характеристиками. Повсеместное использование подобных структур ограничивается сравнительно высокой стоимостью их выращивания. С этой точки зрения весьма перспективным является применение коллоидных методов синтеза, позволяющих существенно упростить технологию создания таких частиц. Коллоидные квантовые точки (ККТ) обладают высокой эффективностью и позволяют легко регулировать длину волны излучения за счет изменения технологических параметров синтеза наночастиц. Важно, что ККТ поглощают свет в широком диапазоне длин волн. Это очень удобно, так как для возбуждения квантовых точек различных размеров можно использовать один источник излучения.

Одной из основных характеристик источников излучения видимого диапазона спектра является индекс цветопередачи. Важность получения высокого индекса цветопередачи обусловлена высокой чувствительностью живых организмов к этому параметру. Поэтому осветительные приборы, имеющие большее значение индекса цветопередачи, часто оказываются коммерчески более успешными. В работе показано, как за счет изменения размера и концентрации ККТ, удалось добиться получения спектра излучения структуры с индексом цветопередачи, превышающем 90.

При создании светоизлучающих структур использовались ККТ сульфида кадмия, поскольку точки такого типа обладают достаточно высоким значением квантового выхода в видимой области спектрального диапазона. В качестве растворителя был использован толуол. Для создания структур ККТ различного размера осаждались на стеклянную подложку методом центрифугирования и отжигались в высоком вакууме. Получаемая толщина активной области составляла единицы нанометров. Длины волн основных пиков люминесценции использованных ККТ лежали в диапазоне от 380 нм до 480 нм. С целью увеличения ширины спектра были созданы структуры, спектры излучения которых помимо основного пика люминесценции, связанного с экситонными переходами, содержали еще один в длинноволновой области. Этот дополнительный максимум на спектре связан с поверхностными состояниями. Использовались методы, позволяющие увеличить интенсивность этого максимума, что приблизило форму спектра излучения к спектру белых светодиодов на основе нитридов галлия-индия.

Для увеличения индекса цветопередачи была реализована смесь ККТ заданного состава квантовых точек разного размера. В этом случае коротковолновая часть видимого спектра оказалась охваченной основными пиками люминесценции ККТ, а длинноволновая — излучением поверхностных состояний. Использовалась оптическая накачка с помощью светодиодной структуры УФ-диапазона на основе нитридов галлия-алюминия. Также ведутся работы по созданию структур с электрической накачкой. Однако, при создании светодиодов с высоким индексом цветопередачи, более предпочтительным вариантом является структура с оптической накачкой, поскольку позволяет достичь высокой КПД и стабильности характеристик. Добавление зеленой составляющей позволило получить суммарный спектр, охватывающий практически весь видимый диапазон. Индекс цветопередачи в этом случае составил  $CRI > 90$ . При этом использовался простой и недорогой технологический процесс создания светоизлучающих наноструктур. Ведутся работы по созданию с использованием представленного метода структур с еще более высоким индексом цветопередачи, превышающем 95.

## **Трехкоординатный интерферометр для измерения перемещений субнанометрового разрешения**

*Казиева Т. В.<sup>1</sup>, Кузнецов А. П.<sup>1</sup>, Губский К. Л.<sup>1</sup>, Решетов В. Н.<sup>1</sup>,  
Понарина М. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ

Эл. почта: glizerogen@gmail.com

В настоящее время контроль и измерение линейных размеров в нанометровом диапазоне осуществляется в основном различными зондовыми методами, включающими электронную микроскопию и сканирующую зондовую микроскопию.

Тем не менее, каждый сканирующий зондовый микроскоп имеет свой собственный источник ошибок. Как правило, либо емкостные датчики, или любые другие сигналы, которые используются для измерения смещения, калибруются с помощью сканирования тестовых структур, содержащие ступеньки известной высоты. Это делает прослеживаемость к единице длины довольно сложной. Эта проблема решена посредством встраивания интерферометра в данные микроскопы в качестве средства измерения смещений.

В лаборатории лазерной диагностики НИЯУ МИФИ был разработан гетеродинный лазерный интерферометр, который предназначен для обеспечения прослеживаемости измерений СЗМ к первичному эталону метра. Источником излучения в данной системе является He-Ne лазер мощностью 1 мВт, и длиной волны 632,991084 нм (относительная нестабильность частоты за 8 часов работы составляет  $10^{-9}$ ) [1].

Оптическая схема интерферометра представляет собой платформу с закреплённой на ней системой призм и зеркал, которая формирует три взаимно ортогональных измерительных канала. Размеры оптической части составляют 260×260×60 мм, что позволяет встроить ее в коммерчески доступные микроскопы, не изменяя их конструкции. Опорный и измерительный лучи образуются после прохождения АОМа. Отражателями, смещение которых измеряет интерферометр являются триппель

призмы. Они закрепляются в платформе, которая располагается над пьезоэлектрическим столом.

Данные, полученные в ходе изучения случайной составляющей неопределенности, говорят о том, что уровень ошибок, возникающих в интерферометре, может быть доведен до  $\sim 0,1$  нм путем использования пассивных систем виброизоляции, термостатирования и звукоизоляции. Разработанный нами принцип детектирования позволяет получить высокое быстродействие и при этом обеспечивает рекордную точность измерения фазы до  $1 \times 10^{-5}$  радиан, 0,01 нм.

Исследование метрологических характеристик интерферометра было проведено на зондовом микроскопе «НаноСкан-3D» со встроенным интерферометром с применением трех эталонных структур в виде ступенек. Результаты измерений сравнивались с измерениями тех же экземпляров в РТВ (Германия) на метрологическом зондовом микроскопе. Для всех трех мер значения, измеренные на СЗМ «НаноСкан-3Di», попали в 95% доверительный интервал, приведенный РТВ. СКО измеренных на СЗМ «НаноСкан-3Di» значений высот ступенек составило менее 1 нм [2].

На основании трехкоординатного гетеродинного интерферометра была создана система для измерения геометрии наконечников нанотвердомеров [3]. Известно, что при взаимодействии с твердыми поверхностями, геометрия наконечника изменяется, в частности может произойти скругление кончика, стачивание ребер и т.п. Все эти параметры влияют на площадь поверхности наконечника зонда и, как следствие, на расчет характеристик материала. Таким образом, появляется необходимость в обеспечении метрологического контроля формы наконечника индентора с субнанометровой точностью. Процедура измерения геометрии наконечника зонда заключается в сканировании в разных направлениях исследуемого зонда известной тестовой структурой. Сканирование наконечников нанотвердомеров осуществляется с помощью зонда, закрепленного на держателе для трипель призмы. Смещение измерительного зонда осуществляется пьезоэлектрическим столом. Для проведения измерений на зонде закрепляется необходимая тестовая структура, например, решетки типа TGT. Определение функции поверхности наконечника нанотвердомера осуществляется в результате сканирования тестовой структурой закрепленного в держателе наконечника.

Метрологический сканирующий зондовый микроскоп с трехкоординатным лазерным интерферометром вошел в состав Государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений геометрических параметров шероховатости в диапазоне от 1 нм до 1000 нм (ВНИИМС г. Москва)

#### Список литературы

1. Kazieva T.V., Kuznetsov A.P., Gubskiy K.L., Reshetov V.N. Three-coordinate laser heterodyne interferometer for metrological assurance of scanning probe microscopes, Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9442. P. 94420K;
2. Гоголинский К.В., Губский К.Л., Кузнецов А.П., Решетов В.Н. Исследование метрологических характеристик измерительного сканирующего зондового микроскопа с применением калибровочных решеток типа TGZ, Измерительная техника, №4, 2012;
3. Коробко В.Н., Гринёва С.И., Петров С.И., Татарникова Л.Н., Крыжановская Ю.В. Статические методы определения твёрдости материалов, СПб,-2010;

## Фотоэлектрические свойства чувствительных к водороду диодов Шоттки Pd-оксид-InP

Шутаев В. А.<sup>1</sup>, Именков А. Н.<sup>2</sup>, Гребенщикова Е. А.<sup>2</sup>, Яковлев Ю. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ имени А.Ф. Иоффе

Эл. почта: wadoz@mail.ru

В настоящее время водород используется в качестве сырья для промышленных процессов, заменяет нефтяное горючее, являясь экологически чистым источником энергии для двигателей внутреннего сгорания. Известно, что водород взрывоопасен при его концентрации от 4.7 до 93.9 объемных % в смеси с воздухом.

Для предотвращения опасного взрыва при хранении и транспортировке, необходимо использовать сенсоры водорода. Поэтому востребованность селективных, высокочувствительных и быстродействующих сенсоров водорода высока.

Сегодня наибольшее распространение получили твердотельные сенсоры с оксидами металлов или кремния в качестве диэлектрика на керамической или кремниевой подложке. У твердотельных сенсоров высокое быстродействие, но низкая селективность к водороду, а также необходимость нагревать сенсорный элемент до 200÷400 С.

Существует также группа сенсоров водорода с палладиевым чувствительным слоем – это полевые транзисторы, МДП структуры и структуры с барьером Шоттки. Быстродействие таких сенсоров высокое. Они предназначены для работы при комнатной температуре, но их чувствительность к водороду повышается только при нагреве сенсорного элемента.

Основным методом обнаружения водорода с помощью таких детекторов является регистрация изменений электрических параметров в присутствии водорода [1, 2].

В данной работе представлен фотоэлектрический метод детектирования водорода.

Настоящая работа продолжает исследования по разработке оригинального метода регистрации водорода по изменению фотоэдс или фототока в диоде Шоттки при освещении его светодионом, проводившиеся в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Цель нашей работы — изучение фотоэлектрических свойств диодов Шоттки на основе структуры Pd/Oxide/InP и их использование в оптоэлектронном сенсоре для обнаружения водорода.

Чувствительным к водороду элементом служит диод Шоттки на основе (100) *n*-InP ( $n=(1-4)\times 10^{16}\text{см}^{-3}$ ). В качестве контактного металла был выбран Pd из-за его высокой каталитической активности по отношению к водороду при комнатной температуре.

В нашем исследовании для уменьшения темнового тока между *n*-InP и Pd предполагался слой оксида, выращенный на подложке InP методом электрохимического окисления. Толщина оксидного слоя в различных экспериментах варьировалась в пределах 200-1000 Å. Слой Pd толщиной (250-400) Å осаждался на поверхность оксида InP методом термического вакуумного напыления.

Омические контакты создавались осаждением золота на слой Pd и сплава Au+Ge на противоположную поверхность подложки.

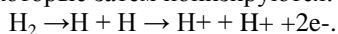
ВАХ были исследованы в широком интервале температур от 90 до 306 К. Они имеют диодный характер. Напряжение отсечки уменьшается с повышением температуры.

Был исследован механизм токопрохождения в структуре при температурах 90-306 К. Было обнаружено, что слой оксида толщиной  $<500\text{\AA}$  достаточно туннельно прозрачен, а при большей толщине способствует уменьшению темнового тока.

Из температурных измерений ВАХ, полученных при 90-306 К была определена величина высоты барьера, равная 0.55 eV, что, по нашему мнению, является достаточным для работы сенсора при температуре до 60°C.

Для созданных диодов Шоттки исследовались как фотоэдс, так и фототок в присутствии водорода. Источником освещения служил светодиод, излучающий на длине волны 0.9 мкм.

При освещении структуры со стороны палладиевого слоя, молекулы водорода, адсорбированные на поверхности металлического Pd, частично распадаются на атомы, которые затем ионизируются:



Освободившиеся электроны вносят вклад в фототок. При освещении появляется фотоэдс. После короткой подачи водорода (2-3 сек) наблюдается резкое падение фотоэдс и затем медленное возвращение к исходному уровню. Это резкое падение связано с понижением работы выхода палладия. Ток короткого замыкания при освещении, наоборот, после импульсной подачи водорода более резко возрастает. Затем величина фототока понижается до исходного уровня с постоянной времени, порядка 10 сек.

На основе исследованных оптопар диодов Шоттки и светодиода были сконструированы сенсоры водорода и измерена их чувствительность. Получено быстрое действие 5-10 сек и обнаружительная способность 5 млн<sup>-1</sup>.

Таким образом, созданы и исследованы Pd-оксид-InP диоды Шоттки, изучены их электрофизические и фотоэлектрические свойства, обнаружено изменение фотоэлектрических характеристик при воздействии водорода на созданный элемент с палладиевым слоем.

#### Список литературы

1. С.В. Слободчиков, Х.М. Салихов, Б.Е. Саморуков. ФТП, 37, 5, с.960 (2003);
2. A. Trinchi, S. Kandasamy, W. Wlodarski. Review. Sensor and Actuators B: 133 705-716. (2008);

## Оптический пинцет на основе лабораторного микроскопа

Чистяков Д.В.<sup>1</sup>, Лосев С.Н.<sup>2</sup>, Дюделев В.В.<sup>2</sup>, Соболева К.К.<sup>3</sup>, Когновицкая Е.А.<sup>4</sup>, Соколовский Г.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

<sup>3</sup>СПбПУ

<sup>4</sup>ВНИИМ им. Д.И. Менделеева

Оптическое манипулирование является важным инструментом во многих бурно развивающихся направлениях науки и техники, примерами которых являются



биология, медицина, фармакология и др. В тоже время, большинство использующихся на данный момент систем оптического манипулирования являются громоздкими и дорогими, в частности из-за того, что в качестве источника излучения в них применяются газовые и твердотельные лазеры.

В настоящей работе рассматриваются конструкции оптических пинцетов, в которых источником излучения являются полупроводниковые лазеры, что позволило создать компактный оптический пинцет на основе промышленно выпускаемого лабораторного микроскопа. Несмотря на сложности фокусировки излучения полупроводниковых лазеров [1, 2] было показано, что разработанная конструкция компактного оптического пинцета пригодна для осуществления оптического захвата при помощи как гауссовых, так и бесселевых пучков. В работе рассмотрены конструкции оптических пинцетов на основе полупроводниковых лазеров для осуществления как двумерного, так и трехмерного захвата.

#### Список литературы

1. G.S. Sokolovskii, S.N.Losev., S.A. Zolotovskaya, A.G. Deryagin, V.I. Kuchinskii, E.U. Rafailov, W. Sibbett, V.V. Dudelev, , *Generation of propagation-invariant light beams from semiconductor light sources*. Tech. Phys. Lett., 2008. 34(12): p. 1075–1077.
2. G.S. Sokolovskii, V.V.Dudelev, S.N. Losev, K.K. Soboleva, A.G. Deryagin, K.A. Fedorova, V.I. Kuchinskii, W. Sibbett, E.U. Rafailov *Bessel beams from semiconductor light sources* Progress in Quantum Electronics, 2014. 38(4): p. 157-188.

## Высокотемпературная лазерная генерация в инжекционных микродисковых резонаторах с активной средой на основе квантовых точек InAs/InGaAs

Моисеев Э. И.<sup>1</sup>, Крыжановская Н. В.<sup>1</sup>, Кудашова Ю. В.<sup>1</sup>, Жуков А. Е.<sup>1,2</sup>, Максимов М. В.<sup>1,3,2</sup>, Кулагина М. М.<sup>3</sup>, Трошков С. И.<sup>3</sup>, Задиранов Ю. М.<sup>3</sup>, Липовский А. А.<sup>1,2</sup>, Блохин С. А.<sup>3</sup>, Бобров М. А.<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup>СПб АУ РАН

<sup>2</sup>СПбПУ

<sup>3</sup>ФТИ

Эл. почта: moiseev@spbau.com

В последние годы возрос интерес исследователей к кольцевым и дисковым микрорезонаторам с активной средой на основе InAs/InGaAs квантовых точек (КТ). В таких микролазерах проведены исследования фундаментальных явлений квантовой электродинамики [1, 2], показана возможность их применения в системах квантовой криптографии [3, 4]. Особенно перспективным видится использование кольцевых и дисковых микролазеров в качестве источников излучения для интегральных оптоэлектронных схем, к которым предъявляются такие требования как малая занимаемая площадь, низкое энергопотребление и возможность эксплуатации при высоких температурах (до 100°C). Площадь микродискового (МД) лазера, поддерживающего высокочастотные моды шепчущей галереи, может быть существенно меньше стандартного резонатора Фабри-Перо. Глубокая локализация носителей в InAs/InGaAs КТ позволяет получить лазерную генерацию при высоких температурах. Излучение из

микролазера может быть выведено латерально в близко расположенный прямоугольный волновод с помощью затухающей электромагнитной волны. К настоящему времени продемонстрированы инжекционные МД лазеры с InGaAs КТ с диаметром резонатора 6.5 мкм, работающие при комнатной температуре с пороговым током 0.45 мА [5]. Наибольшая температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила 50 °С в инжекционных микролазерах диаметром 80 мкм с длиной волны излучения 1.23 мкм [6]. В настоящей работе нами исследованы инжекционные МД лазеры диаметром 15-31 мкм с активной областью на основе InAs/InGaAs квантовых точек.

Гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на  $n+$  подложке GaAs(100). Активная область представляла собой 10 рядов квантовых точек InAs/In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As, разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 35 нм и помещенных в волноводный слой GaAs. Общая толщина волновода с активной областью составляла 0.44 мкм. Максимум излучения основного перехода КТ находился при комнатной температуре на длине волны около 1.27 мкм. Эмиттерные слои Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As толщиной около 2.2 мкм были легированы кремнием ( $n$ ) и углеродом ( $p$ ). При помощи фотолитографии и плазмохимического травления были сформированы микрорезонаторы с диаметром от 15 до 31 мкм. Верхние омические контакты к  $p+$  GaAs были сформированы с помощью AgMn/NiAu металлизации и имели круглую форму. Нижний сплошной контакт к  $n+$  подложке был сформирован с помощью металлизации AuGe/Ni/Au. Измерения лазерных характеристик проводились в непрерывном режиме при различной температуре (от 20 до 100°С) с помощью игольчатого микрозонда, устанавливаемого на верхний металлический контакт исследуемого микролазера. На спектрах микрофотолюминесценции МД лазеров наблюдались резкие линии, соответствующие модам шепчущей галереи. Для наиболее интенсивных мод микрорезонаторов наблюдался переход в режим лазерной генерации. Пороговая плотность тока лазеров при комнатной температуре составила 600-900 А/см<sup>2</sup>, длина волны генерации составила около 1.27 мкм. Добротность резонатора, составила более 45 000 и была оценена из отношения длины волны генерации к полуширине резонансной линии. Проведено исследование зависимости спектрального положения линии генерации от тока накачки и проведена оценка удельного теплового сопротивления ( $5 \cdot 10^{-3}$  °С·см<sup>2</sup>/Вт). При повышении температуры в микролазере диаметром 31 мкм сохранялась лазерная генерация вплоть до 100 °С, что является на сегодня наибольшей сообщенной рабочей температурой для МД лазеров на основе КТ. Характеристическая температура, описывающая изменение порогового тока с увеличением температуры в диапазоне 20-80°С составила около 100 К. Продемонстрирована возможность достижения низкого порога генерации на длине волны основного оптического перехода InAs/InGaAs квантовых точек вблизи 1.3 мкм, что является наиболее длинноволновой генерацией в инжекционных МД лазерах на основе квантовых точек на подложках GaAs.

#### Список литературы

1. Gerard J.M., Solid-state cavity-quantum electrodynamics with self-assembled quantum dots, Topics in Applied Physics, 90, 269-314, 2003;
2. Reithmaier J.P., Sek G., Löffler A., Hofmann C., Kuhn S., Reitzenstein S., Keldysh L.V., Kulakovskii V.D., Reinecke T.L., Forchel A., Strong coupling in a single quantum dot-semiconductor microcavity system, Nature, 432, 7014, 197-200, 2004;

3. Koseki S., Zhang B., Greve K., Yamamoto Y., Monolithic integration of quantum dot containing microdisk microcavities coupled to air-suspended waveguides, Applied Physics Letters 94, 051110, 2009;
4. Srinivasan K., Borselli M., Painter O., Cavity Q, mode volume, and lasing threshold in small diameter AlGaAs microdisks with embedded quantum dots, Optics Express, 14, 3, 2006;
5. Mao H.M., Chien H.C., Hong J.Z., Cheng C.Y., Room-temperature low-threshold current-injection InGaAs quantum-dot microdisk lasers with single-mode emission, Optics Express, 19, 15 2011;
6. Munsch M., Claudon J., Malik N.S., Gilbert K., Grosse P., Gérard J.-M., Albert F., Langer F., Schlereth T., Pieczarka M. M., Höfling S., Kamp M., Forchel A., Reitzenstein S., Room temperature, continuous wave lasing in microcylinder and microring quantum dot laser diodes, Applied Physics Letters, 100, 031111, 2012;

## **Печатные устройства памяти на основе эффекта резистивных переключений в полимерных композитных материалах**

*Котова М. С., Дронов М. А.<sup>1</sup>, Дубинина Т. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова

Эл. почта: marykot58@gmail.com

Одним из направлений развития органической электроники является развитие запоминающих устройств. Возможность создания новых запоминающих устройств из растворимых органических материалов с помощью различных методов печати демонстрирует высокий потенциал резистивной памяти (ReRAM). Рабочие характеристики таких запоминающих устройств соответствуют требованиям для устройств памяти.

Система может находиться в двух состояниях: “ON” и “OFF” с различными сопротивлениями, эти состояния принимаются за логическую 1 и 0 соответственно. Резистивные переключения (РП) между этими двумя состояниями происходят при приложении внешнего электрического поля необходимой величины. РП могут быть энергонезависимыми и многократно повторяемыми. Сопротивления низкопроводящего состояния и высокопроводящего отличаются до 7 раз.

Мы наблюдали эффект резистивного переключения в широком спектре органических полимеров: полистирол, поликарбонат и МЕН-PPV<sup>2</sup>. Было показано, что добавление высокопроводящих частиц в полимерную матрицу может значительно изменить характеристики РП<sup>1</sup>. В нашей работе изучалось влияние внедрения металлических частиц<sup>1</sup> и органических фотоселективных частиц<sup>3</sup> в полимерную матрицу на твердых подложках на макро- и микромасштабах. Для осуществления полной печатной технологии нами изучались образцы из растворимых активных материалов на гибких подложках.

Нами было показано, что материал подложки не играет существенной роли в наблюдении РП. РП были обнаружены во всех материалах, использованных в случае твердых подложек. Оптимизация составов и геометрии активной области образцов позволила достигнуть низких значений критического электрического поля  $E_{\text{крит}}$ , необходимого для переключения образца из состояния ON в OFF, менее 10 кВ/см. Это

значение менее критического поля пробоя. Использование фоточувствительных молекул позволило регулировать условия переключения внешним освещением. Было показано, что подсветка лазером с длиной волны в синем и зеленом диапазоне может уменьшить значение  $E_{\text{крит}}$  более, чем в 4 раза. Благодаря простой методике нанесения контактов на гибкую подложку нами были получены многобитные образцы до 25 бит.

В ходе работы была продемонстрирована возможность создания печатных резистивных запоминающих устройств из органических материалов.

Работа была поддержана грантами РФФИ № 14-02-31569, РФФИ № 14-03-31579.

#### Список литературы

1. Котова М.С., Дронов М.А., Белогорохов М.А., Эффект резистивного переключения в полимерных материалах, содержащих металлические микрочастицы и энергонезависимая память на его основе, Вестник МГУ серия 3. физика. астрономия 2. 122501 (2012);
2. Dronov M., Belogorohov I, Khokhlov D., New MEH-PPV Based Composite Materials for Rewritable Nonvolatile Polymer Memory Devices, MRS Proceedings Symposium Q, 1337, 2011;
3. Dronov M., Kotova M., Belogorohov I., Photo-controllable Resistive Memory Based on Polymer Materials, MRS Proceedings Symposium M, 1729, 2015;

## **Исследование влияния свойств границ раздела структуры ультрафиолетовых светодиодов на коэффициент вывода излучения**

*Евseenков А. С.<sup>1</sup>, Тарасов С. А.<sup>1</sup>, Соломонов А. В.<sup>1</sup>, Курин С. Ю.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Nitride Crystals Ltd

Эл. почта: as.evseenkov@gmail.com

В современной оптоэлектронной промышленности для создания светодиодных структур (СД) используются композиции на основе твердых растворов полупроводниковых нитридов. Их важнейшей характеристикой является эффективность преобразования электрической энергии в оптическое излучение. Основными проблемами светодиодов ультрафиолетового диапазона спектра являются низкое качество эпитаксиальных гетероструктур [1, 2], малый коэффициент вывода света [3] из структуры, эффект нагрева носителей заряда и Оже-рекомбинация.

Одним из главных факторов, ограничивающим вывод света из чипа и понижающим эффективность светодиодов, является полное внутреннее отражение на границе материалов с высокой и низкой оптической плотностью. Эффективным способом решения проблемы ограничения вывода излучения является введение в структуру поверхностей, рассеивающих свет. При создании шероховатостей определенной формы критический угол существенно увеличивается и коэффициент оптического вывода света возрастает. На сегодняшний день широко используют текстурирование как подложек, так и эпитаксиальных слоев. В светодиодной индустрии применяются два основных подхода: технологии случайного текстурирования (random texturing) и

отформованной сапфировой подложки (patterned sapphire substrate) (ОСП). Кроме этого границы раздела можно модифицировать, создавая на слоях вблизи активной области сверхрешеток. Это позволяет создать эффект «зеркала», который увеличивает внешний выход излучения за счет фотонов, которые генерируются с вектором распространения, направленным вглубь структуры.

В работе было проведено экспериментальное исследование оптических и электрических свойств ультрафиолетовых светодиодов на основе гетероструктур GaN/AlGaIn. Особое внимание уделено исследованию спектров электролюминесценции при различных прямых токах и температурах, определению оптической мощности и эффективности излучения. Также с целью оптимизации параметров таких излучателей был разработан метод моделирования процесса вывода света из светодиодных структур корпускулярным методом Монте-Карло, что позволило не только предсказывать оптические свойства исследуемых структур и подробно описать процессы, приводящие к потере вывода излучения во внешнюю среду, но и выработать рекомендации по повышению эффективности излучения светодиодных гетероструктур. В частности показано, что наилучшим аспектным соотношением рельефа текстурирования для данной системы материалов является «1».

#### Список литературы

1. JE.F. Schubert 2006 Light Emitting Diodes New York, Cambridge University Press;
2. M Kneissl et al 2011. Semicond. Sci. Technol 26 01403;
3. F I Manyakhin et al, 2010 Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved 50 54;

## **Исследование температурных характеристик ультрафиолетовых светодиодов на основе нитридных твердых растворов**

*Евсеенков А. С.<sup>1</sup>, Тарасов С. А.<sup>1</sup>, Соломонов А. В.<sup>1</sup>, Курин С. Ю.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Nitride Crystals Ltd

Эл. почта: as.evseenkov@gmail.com

В современной оптоэлектронной промышленности для создания светодиодных структур (СД) используются композиции на основе твердых растворов полупроводниковых нитридов. Их важнейшей характеристикой является эффективность преобразования электрической энергии в оптическое излучение. Основными проблемами светодиодов ультрафиолетового диапазона спектра являются низкое качество эпитаксиальных гетероструктур [1], малый коэффициент вывода света из структуры, эффект нагрева носителей заряда и оже-рекомбинация. Процессы рекомбинации и разогрева носителей заряда во многих случаях сопутствуют физическим процессам, протекающим в различных полупроводниковых приборах, в том числе в полупроводниковых светодиодах. Для достижения большей мощности излучения необходимо увеличивать пропускаемый через структуру ток, что неминуемо ведет к увеличению эффекту нагрева носителей заряда и оже-рекомбинации. Это приводит к ограничениям в эксплуатации, которые особо сильно сказываются на ультрафиолетовых светодиодах (УФСД), и без того имеющих низкий коэффициент полезного действия и вы-

сокую степень поглощения излучения внутри структуры. Таким образом, возникает необходимость в поиске путей снижения влияния этих эффектов с целью увеличения, как максимальной мощности излучения, так и квантового выхода СД [2].

В ходе данной работы было проведено исследование влияния величины пропускаемого тока, температуры внешней среды и активной области на внешний квантовый выход УФСД. Основным объектом исследования являются образцы, выращенные на сапфировых подложках методом МOCVD [3] на основе твердых растворов системы Al-In-Ga-N. Исследование наногетероструктур проводилось при помощи разработанной авторами тест-системы диагностики рабочих параметров светоизлучающих наногетероструктур с использованием зондовой станции. Были получены все основные характеристики- спектры излучения, мощность, ВтАХ и температурные характеристики. Исследованы образцы с различными конфигурациями активной области — элементарным составом и толщиной слоя. Наилучшие результаты по внешнему квантовому выходу и мощности показали образцы с активной областью в 150 нм. Исследовано влияние температуры внешней среды на эффективность УФСД. Эффект усугубляется на больших плотностях тока- эффективность излучения может упасть с 1.5 до 0.45 при 40 мА и 150 мА, соответственно. Показано, что эффективность люминесценции структуры при пропускании высоких токов взаимосвязана с температурой активной области структур. Установлено, что эта температура может достигать значений, превышающих 250 °С. Исследованы особенности теплоотвода из структур УФСД, определены тепловые сопротивления и предложены рекомендации по улучшению тепловых характеристик УФСД.

#### Список литературы

1. A. Evseenkov, S. Tarasov, A. Solomonov, Kurin Sergey et al, 2015 JE.F. Schubert P hys. Status Solidi C 12, No. 4–5, 369–371 (2015);
2. F.I. Manyakhin et al, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved 50 54, 2010;
3. A.V. Solomonov, S.A. Tarasov, E.A. Men'kovich, I.A. Lamkina, S.Yu. Kurin, A.A. Antipov et al, Semiconductors 48 245–250, 2014;

## **Исследование упругих напряжений в буферных слоях AlN в процессе их роста методом плазменно-активированной молекулярно пучковой эпитаксии на различных гетероподложках (с-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6H-SiC)**

*Золотухин Д. С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Эл. почта: zolotukhinspb@gmail.com

Для массового производства приборов ультрафиолетовой оптоэлектроники и мощных высокочастотных транзисторов на основе (Al,Ga)N гетероструктур (ГС) необходимо развитие технологий роста буферных слоев AlN на коммерчески доступных гетероподложках. В работе рассмотрены процессы генерации и релаксации упругих напряжений в процессе плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) AlN буферных слоев на гетероподложках 6H-SiC и с-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с различным кристаллографическим рассогласованием  $\Delta a=0.8$  и 13.5%, соответствен-

но. Представлены различные методы снижения концентраций прорастающих дислокаций (ПД).

Буферные слои AlN толщиной 0.6 и 2 мкм на 6H-SiC и *c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> подложках, соответственно, выращивались методом ПА МПЭ при температуре  $T_S \sim 780^\circ\text{C}$  с использованием зародышевых слоев толщиной  $\sim 50$  нм, сформированных с помощью эпитаксии с повышенной миграцией, а также высокотемпературных и низкотемпературных зародышевых слоев, выращенных в стандартном режиме. Буферные слои выращивались в металл-обогащенных условиях методом металл-модулированной эпитаксии. В слои AlN на сапфировых подложках для снижения плотности ПД вводились 6 ультратонких ( $\sim 3.5$  нм) слоев GaN с различной морфологией [1]. Рост ГС контролировался *in situ* измерениями упругих напряжений с помощью оригинальной оптической системы измерения кривизны (ОСИК) подложки.

Было показано, что рост слабо рассогласованной ГС AlN/6H-SiC происходит при почти постоянном уровне компрессионных напряжений, формирующихся в начале роста в соответствии со знаком кристаллографического рассогласования слой/подложка. В противоположность этому, в случае роста сильно рассогласованной ГС AlN/*c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> поведение кривизны подложки носит более сложный характер: наблюдается генерация как растягивающих, так и сжимающих напряжений. Для объяснения этих эффектов анализируются различные механизмы генерации и релаксации напряжений, включая коалесценцию зародышевых островков в процессе их роста по механизму Вольмера-Вебера, наклон краевых ПД, введение ультратонких вставок GaN с различной морфологией, изменение стехиометрических условий роста AlN и др. Кроме того, исследовалась фильтрация различных ПД с помощью ультратонких вставок GaN и зависимость плотности ПД от условий роста зародышевого слоя AlN.

В результате разработаны технологии ПА МПЭ получения атомарно-гладких буферных слоев AlN на подложках 6H-SiC(*c*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и достигнуты плотности ПД с *c*-компонентой  $3.8 \times 10^7 (9 \times 10^8) \text{ см}^{-2}$  и *a*-компонентой  $2.7 \times 10^9 (6 \times 10^9) \text{ см}^{-2}$ , соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

#### Список литературы

1. Нечаев Д.В. et.al, Control of threading dislocation density at the initial growth stage of AlN on *c*-sapphire in plasma-assisted MBE, J. Crystal Growth, 378, 319–322, (2013);

# ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

---

## Форма равновесной поверхности мениска в цилиндрических капиллярах с учетом размерной зависимости поверхностного натяжения

Сокуров А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной математики и автоматизации

Эл. почта: aslan\_s\_07@mail.ru

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием нанотехнологий, интерес к капиллярным явлениям второго рода значительно возрос (здесь нами используется известная терминология Л. М. Щербакова). Эти явления, в первую очередь, связаны с поведением микрогетерогенных систем, но к ним могут быть также отнесены и движение жидкости в нанопорах и капиллярах, и равновесные состояния очень малых объемов жидкости. Для капиллярных явлений второго рода характерна зависимость термодинамических характеристик поверхности раздела фаз, прежде всего поверхностного натяжения, от линейных размеров исследуемой системы.

В настоящей работе рассматриваются равновесные мениски, образующиеся в цилиндрических капиллярах достаточно малого радиуса, для которых размерный эффект более актуален. При этом учитывается зависимость поверхностного натяжения от средней (эйлеровой) кривизны поверхности мениска согласно следующей формуле [1]:

$$\sigma = \frac{\sigma^\infty}{1 + 2\delta H},$$

где  $H$  – средняя кривизна поверхности в точке,  $\delta$  – толщина поверхностного слоя (длина Толмена),  $\sigma^\infty$  – поверхностное натяжение для плоской поверхности. С учетом вышеуказанной формулы получены параметризованные системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающие профили вогнутых и выпуклых менисков. На основе их решений проанализировано влияние параметра, отвечающего за размерный эффект, на форму менисков и высоту подъема жидкости в капиллярной трубке.

Список литературы

1. Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В., О размерной зависимости поверхностного натяжения, ЖТФ, т.81(1), 148-152, 2011;



## Энергетический анализ автоэлектронной эмиссии из карбида кремния

Трофимов В. В.<sup>1</sup>, Никифоров К. А.<sup>1</sup>, Егоров Н. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: knikiforov@cc.spbu.ru

Спектры энергетического распределения автоэлектронов связаны непосредственно с электронными свойствами твердого тела. Из исследований распределения эмитированных электронов по полным энергиям можно получить сведения о зонной структуре эмиттера и энергетическом уровне адсорбата.

В работе рассматриваются перспективные автоэлектронные источники на основе карбида кремния [1], обладающего уникальным сочетанием высокой тугоплавкости и хорошей электропроводности, необходимыми для стабильной работы в условиях высоких температур и ионной бомбардировки. Однако монокристаллы эмиттера в силу двухэлементного состава потенциально подвержены модификации эмиссионной поверхности. В частности, омический нагрев в процессе автоэлектронной эмиссии может приводить к сублимации кремния и образованию углеродного покрытия в виде графеноподобной структуры на поверхности эмиттера.

Выявление переходных режимов, связанных с графитизацией поверхности карбида кремния в процессе автоэлектронной эмиссии, является важной фундаментальной задачей, имеющей также и широкое практическое применение. Поэтому для повышения стабильности автоэлектронной эмиссии и оптимизации характеристик рассматриваемых источников необходимо натурное моделирование электрофизической системы энергетического анализа.

Для получения энергетического спектра необходимо произвести дифференцирование кривых задержки полевого эмиссионного тока коллектора. На задерживающий потенциал катода накладывается малый синусоидальный сигнал. При малом модулирующем сигнале ток коллектора раскладывается в ряд Тейлора в окрестности значения задерживающего потенциала. С помощью выделения соответствующей гармоники получается сигнал, амплитуда которого пропорциональна нужной производной. В нашем случае необходимо получить первую производную. Следовательно, выделяя компоненту автоэмиссионного тока, синфазную модулирующему напряжению и измеряя ее амплитуду, можно зарегистрировать исследуемое энергетическое распределение, как это теоретически и экспериментально показано в [2].

В работе сравниваются особенности энергетического анализа автоэлектронов карбида кремния и графеноподобных структур [3]. Результаты исследования могут быть применены в задаче моделирования диодных и многоэлектродных электронных пушек с многоострийным автоэлектронным эмиттером на основе карбида кремния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-30022), СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

### Список литературы

1. Afanasyev A.V., Ivanov B.V., Ilyin V.A., Kardo-Sysoev A.F., Kuznetsova M.A., Luchinin V.V. Superfast drift step recovery diodes (DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC, *Materials Science Forum*, Vol. 740-742, P. 1010-1013, 2013;

2. Young R.D. Theoretical total energy distribution of field emitted electrons, *Physical Review*, Vol. 113, P. 110-114, 1959;
3. Fursey G.N., Polyakov M.A., Zakirov I.I., Fomin D.N., Egorov N.V., Antonova L.I., Trofimov V. V. Features of full energy distribution from graphene like structures by the retarding potential method // *Proceedings of the 10th International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC) and 2nd International Conference on Emission Electronics (ICEE)*, P. 93-94, 2014;

## Исследование топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ методом ЯМР

*Антоненко А. О.<sup>1</sup>, Чарная Е. В.<sup>1</sup>, Подорожкин Д. Ю.<sup>1</sup>, Мухамадьяров Р. И.<sup>1</sup>, Марченков В. В.<sup>2,3</sup>, Наумов С. В.<sup>2</sup>, Huang J. C. A.<sup>4</sup>, Weber H. W.<sup>5</sup>, Бугаев А. С.<sup>6</sup>*

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>ИФМ УрО РАН

<sup>3</sup>УрФУ им. Б.Н. Ельцина

<sup>4</sup>National Cheng Kung University

<sup>5</sup>Atominstitut, Vienna University of Technology

<sup>6</sup>МФТИ

Эл. почта: [nastya5555@mail.ru](mailto:nastya5555@mail.ru)

Топологические изоляторы – это новый класс материалов, существование которых было недавно предсказано теоретически, а затем обнаружено экспериментально. Топологические изоляторы характеризуются энергетической щелью в объеме и металлической проводимостью, возникающей на поверхности. Благодаря бесщелевым состояниям на поверхности возможно протекание спин-поляризованного тока практически без потерь энергии. Такие необычные свойства поверхности топологических изоляторов дают потенциальную возможность для их использования в новых спинтронных и магнитоэлектрических приборах, а также для создания квантовых компьютеров. Было показано, что к топологическим изоляторам относятся полупроводниковые соединения  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Ранее  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  был широко известен благодаря своим термоэлектрическим свойствам.

Для получения информации о топологических изоляторах большой интерес представляют исследования свойств подвижных зарядов в объеме образцов и на поверхности. Такие данные в широком диапазоне температур можно получить методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Однако, несмотря на большое количество работ по экспериментальному изучению  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , до настоящего времени были опубликованы только две статьи, посвященные ЯМР исследованиям теллурида висмута: одна для чистых кристаллических порошков  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [1] и одна для наночастиц  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [2]. В работе [2], помимо сигнала от объема наночастиц, был обнаружен слабый пик, наличие которого интерпретировалось как сигнал от ядер на поверхности наночастиц. На данный момент отсутствуют данные об исследовании методом ЯМР монокристаллических образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Таким образом, экспериментальные исследования  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  методом ЯМР открывают широкие перспективы для изучения топологических изоляторов.

В настоящем докладе представлены результаты исследований методом ЯМР монокристаллического образца  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  высокого качества с собственной проводимостью

стью, в котором концентрация носителей зарядов определялась в основном термоактивационными процессами. При комнатной температуре было получено, что спектр ЯМР  $^{125}\text{Te}$  в монокристалле  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при ориентации оси  $c$  пластины перпендикулярно магнитному полю состоит из двух линий с положительным (около 400 ppm) и отрицательным (около – 600 ppm) сдвигами. Линия, сдвинутая в сторону высоких частот, имеет положение, близкое к положению единственной линии, наблюдавшейся для кристаллического порошка в работе [1]. Вторая линия, сдвинутая к низким частотам, ранее не наблюдалась для объемных образцов теллурида висмута. Эта линия была интерпретирована как сигнал от поверхности монокристалла в соответствии с результатами исследований наночастиц  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [2]. Положение линии ЯМР от объема образца сильно изменялось с ростом температуры. Возрастание сдвига линии ЯМР с ростом температуры означает доминирующий вклад в резонансную частоту сдвига Найта, пропорционального концентрации подвижных зарядов в образце. На основании температурной зависимости сдвига Найта в интервале от 10 до 293 К был показан термоактивационный характер проводимости в исследованном кристалле и рассчитаны энергетические параметры термоактивационных процессов. Предварительные исследования температурной зависимости положения второй линии выявили очень слабые изменения ее сдвига от комнатной температуры вплоть до 80 К, что согласуется с металлическим характером проводимости на поверхности топологического изолятора.

#### Список литературы

1. Taylor RE, Leung B, Lake MP, Bouchard LS, Spin-lattice relaxation in bismuth chalcogenides, *J. Phys. Chem. C* 116, 17300-17305 (2013);
2. Koumoulis D, Chasapis TC, Taylor RE, Lake MP, King D, Jarenwattananon NN, Fiete GA, Kanatzidis MG, Bouchard LS, NMR probe of metallic states in nanoscale topological insulators, *Phys. Rev. Lett.* 110, 026602 (2013);

## **Определение свободной поверхностной энергии высокодисперсных сырьевых составляющих композиционных материалов**

*Дроздюк Т. А.<sup>1</sup>, Морозова М. В.<sup>1</sup>, Фролова М. А.<sup>1</sup>, Айзенштадт А. М.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>САФУ им. М. В. Ломоносова

Эл. почта: t.drozdyuk@narfu.ru

В современном материаловедении широкое распространение получают структурно-энергетические подходы к оценке значительного спектра физико-химических свойств минералов и горных пород, используемых в качестве сырьевой базы при производстве разнообразной номенклатуры материалов и изделий. Энергетические подходы применяются при количественном описании физических свойств и дают возможность целенаправленного выбора тех энергетических параметров, которые обеспечивают наиболее достоверные зависимости по оценке необходимой характеристики [1].

В настоящее время сформировалось новое научное направление — геоника [2], целью которого является разработка принципов управления развитием объектов неорганического мира. Ценность этого научного направления для строительной отрас-

ли, заключается в том, что энергетический критерий, позволяющий ранжировать сырье, используемое для производства материалов, в основе синтеза которого лежит полное разрушение породы, является фактором повышения эффективности производства. В качестве такого критерия может быть использована величина свободной внутренней энергии породообразующих минералов и породы в целом [3]. В исследованиях [4, 5] показано, что для горных пород в высокодисперсном состоянии (размер частиц порядка 100 — 500 нм) термодинамический подход позволяет выделить основную энергетическую характеристику состояния вещества – свободную поверхностную энергию (критическое поверхностное натяжение,  $\sigma_k$ ), которая связана с генезисом породы. Экспериментальное определение этого параметра основано на измерениях краевого угла смачивания поверхности твердой фазы, и рассчитывается методами Г. А. Зисмана или ОВРК.

Первый метод показывает хорошие результаты при определении  $\sigma_k$  однородных, беспористых структур, для которых свойственно состояние устойчивого равновесия капли жидкости на границе раздела трех фаз (твердое тело – раствор — воздух).

Метод ОВРК (Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле) рассматривает поверхностное натяжение как сложную величину. Т.е. энергия поверхности твердого тела включает две составляющие: дисперсионную и полярную. Дисперсионная составляющая в основном определяется силами Ван-дер-Ваальса, полярная составляющая – сильные (химические) взаимодействия и водородные связи [6, 7]. На наш взгляд, использование для расчета свободной поверхностной энергии образцов с активной поверхностью (с точки зрения наличия, например, Льюисовских или других центров взаимодействия) второй метод наиболее предпочтителен, так как дает возможность получить сведения о механизме процессов трансформационных превращений на поверхности высокодисперсных систем. Рассчитано поверхностное натяжение ( $\sigma_s$ ) нескольких высокодисперсных систем нанокомпозитов и их дисперсионные ( $\sigma^D$ ) и поляризационные ( $\sigma^P$ ) составляющие.

Поверхностное натяжение нанокомпозитов:

1. Нанокомпозит: древесина (сосна): 70% по массе, средний размер частиц 1,3 мкм; базальт: 30% по массе, средний размер частиц 157 нм:  $\sigma_s = 70,18$  мН/м;  $\sigma^D = 63,68$  мН/м;  $\sigma^P = 6,50$  мН/м;
2. Нанокомпозит: наноструктурированное вяжущее на основе кварцевого песка (4 часа помола, размер частиц 550-850 нм):  $\sigma_s = 66,42$  мН/м;  $\sigma^D = 11,36$  мН/м;  $\sigma^P = 55,06$  мН/м;
3. Нанокомпозит: наноструктурированное вяжущее на основе гранита (3 часа помола, размер частиц 170-520 нм):  $\sigma_s = 65,19$  мН/м;  $\sigma^D = 11,02$  мН/м;  $\sigma^P = 54,17$  мН/м.

Приведенные данные показывают, что в высокодисперсной системе на основе древесины и базальта взаимодействие компонентов обусловлено физическими силами притяжения, поэтому при создании прочной связи между древесной матрицей и минеральным наполнителем поровой структуры древесины, необходимо учитывать в качестве основного фактора электростатический барьер, обусловленный величиной поверхностного заряда частиц. При создании минерального наноструктурированного вяжущего на основе высокодисперсных материалов горных пород главным фактором является химическое взаимодействие компонентов.

## Список литературы

1. Зуев В.В., Пощелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки магнезиальных свойств твердотельных материалов (включая магнезиальные цементы). СПб, 139 с, 2006.
2. Лесовик В.С. Геоника. Предмет и задачи /Белгород: Изд-во БГТУ, 213 с, 2012;
3. Лесовик В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород /М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 526 с, 2006;
4. Фролова М.А., Тутыгин А.С., Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Махова Т.А., Поспелова Т.А. Критерий оценки энергетических свойств поверхности/ Наносистемы: физика, химия, математика, № 2(4). – с. 120-125, 2011;
5. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов. — Физика и химия обработки материалов, №2, с.68-72, 2015;
6. Яковец Н.В., Крутько Н.П., Опанасенко О.Н. Определение свободной поверхностной энергии порошкообразных смолисто-асфальтовых веществ методом Оуэнса–Вендта–Рабея–Каелбле // Свиридовские чтения: сб. ст. Вып. 8. Минск, С. 253-259, 2012;
7. Войтович Е.В., Айзенштадт А.М. Проектирование состава композиционного гипсового вяжущего с применением наноструктурированного кремнеземного компонента (термодинамический аспект) // Промышленное и гражданское строительство, № 5, с.16-20, 2014;

## Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия поверхности бумаги

*Соболева Е. А.<sup>1</sup>, Оваско С.-С.<sup>1</sup>, Бакфолк К.<sup>1</sup>, Люютикайнен Й.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>LUT (Lappeenranta University of Technology)

Эл. почта: [katie07@list.ru](mailto:katie07@list.ru)

Люди используют бумагу на протяжении многих тысяч лет для многих целей: хранение и передача информации, упаковочный материал, материал для декоративных украшений и многого другого. В настоящее время многие институты занимаются изучением свойств бумаги и покрытий, которые смогут позволить использовать бумагу во многих пищевых отраслях в качестве упаковки. Одним из методов изучения является конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, позволяющая изучать материалы, не повреждая их, а также наблюдая за процессами в режиме реального времени.

В данной работе исследовался ряд образцов с различными видами покрытий и с использованием различных флюоресцирующих красителей (таких как Rhodamine B, Sudan II и др.). Задачей данного исследования было изучить строение покрытия бумаги и свойств этого покрытия и бумаги.

С целью изучения глубины проникновения флюоресцента в бумагу через покрытие использовался такой метод исследования, как Z-stack. Он позволяет делать послойные снимки в глубь образца. Это позволяет изучать не только поверхность покрытий и бумаги, но и рассмотреть более подробно границу между ними. Также

использовалось исследование среза образца для более точного определения толщины покрытия.

Было выявлено, что толщина покрытий соответствует заявленным данным с лабораторий, а также были определены основные типы покрытий, которые наилучшим образом соответствуют требованиям пищевого производства.

## **Длина спиновой релаксации в тонких пленках палладия**

*Павлов А. В.<sup>1</sup>, Устинов А. Б.<sup>1</sup>, Петров В. Н.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: redbullsf@yandex.ru

Развитие спинтроники, области науки которая исследует поведение систем, в основе работы которых лежит не только перенос заряда, но и играют важную роль магнитные свойства нанобъектов, требует исследования различных магнитных и электрических свойств систем. Важным направлением исследований является изучение того, как изменяются свойства потоков поляризованных электронов при их прохождении внутри твердого тела. Число электронов, преодолевших некоторое расстояние внутри кристалла до рассеяния, определяется длиной пробега относительно неупругих соударений и хорошо изучено. Помимо этого, важным и малоизученным параметром распространения является длина спиновой релаксации.

В данной работе производилось измерение длины спиновой релаксации в палладии. Основной идеей метода являлось наблюдение за поляризацией пучка электронов, выходящих через исследованные структуры. Схема измерения была следующая: на ферромагнитный монокристалл напылялись тонкие пленки Pd различной толщины, для каждой из толщин измерялась поляризация прошедших пленку электронов в зависимости от их энергии. По таким данным была составлена карта длин спиновой релаксации в палладии для различных энергии и толщин.

Предварительные результаты говорят об уникальных спиновых свойствах пленок палладия и характеризуют его как перспективный материал для спиновой электроники.

## **Накопление заряда на сколах GaAs гетероструктур в области р-n перехода**

*Михайлов А. О.<sup>1</sup>, Алексеев П. А.<sup>2</sup>, Шаров В. А.<sup>3</sup>, Дунаевский М. С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

<sup>3</sup>СПбПУ

Эл. почта: alex.mikhaylov94@gmail.com

Для создания и оптимизации параметров полупроводниковых приборных структур с р-n и гетеропереходами необходимо знать, как распределяются электрические поля в объеме структуры (вдоль направления роста структуры). Сканирующая градиентная Кельвин-зонд микроскопия (ГКЗМ) является хорошо себя зарекомендо-

вавшим методом, позволяющим измерять распределения электрических потенциалов с нанометровым разрешением. При измерениях, исследования проводятся на поверхности скола структуры, на который выходят р-п или гетерослой. Однако, стоит отметить, что ГКЗМ — поверхностная методика и измеряет распределение потенциала на поверхности. Для определения распределения приложенного напряжения в объеме структуры записывают распределение поверхностного потенциала заземленной и смещенной структуры с последующим вычитанием одного из другого [1, 2]. При этом делается допущение, что внешнее смещение не приводит к изменениям на поверхности.

Однако, возникает вопрос, насколько допустимо использование подобного метода определения распределения внешнего напряжения в объеме структуры? Ведь распределение внешнего напряжения в приповерхностной области, может значительно отличаться от распределения в объеме. Естественно ожидать, что влияние заряда, захваченного на поверхностных состояниях и в поверхностном оксиде GaAs, должно приводить к изменениям распределения внешнего напряжения в приповерхностной области, и таким образом искажать информацию о распределении напряжения в объеме, получаемую КЗМ методом.

В данной работе проводилось исследование поверхностного потенциала на сколе гетероструктуры с р-п переходом на основе GaAs методом ГКЗМ. Использовался атомно-силовой микроскоп Ntegra Aura производства компании NT-MDT (г. Зеленоград, г. Москва). Исследование проводилось на поверхности скола гетероструктуры, выполненном перпендикулярно направлению эпитаксиального роста. В ходе работы было выявлено положение р-п перехода. При освещении светом исследуемой структуры контраст в получаемом ГКЗМ изображении п и р слоев увеличивался, что связано с уменьшением величины приповерхностного изгиба зон, за счет генерации фотовозбужденных носителей заряда. Для определения областей падения приложенного напряжения в объеме структуры записывалось распределение поверхностного потенциала обратной смещенной структуры. Было обнаружено что, с течением времени, профиль распределения потенциала существенно трансформируется. При снятии внешнего смещения был обнаружен положительный заряд в р-области и отрицательный в п-области, что свидетельствовало о зарядке поверхности. Характерные времена зарядки-разрядки поверхности составляют минуты. В зависимости от величины внешнего напряжения, потенциал от накопленного поверхностного заряда может достигать единиц вольт. Накопление заряда существенно искажает поверхностное распределение внешнего приложенного напряжения. Для корректного определения распределения напряжения в объеме структуры необходимо учитывать данный эффект.

Таким образом, в данной работе методом ГКЗМ было выявлено положение р-п перехода в гетероструктуре на основе GaAs и было обнаружено накопление заряда на поверхности в области р-п перехода. Данный эффект необходимо учитывать при определении распределения внешнего напряжения в объеме структуры методом Кельвин-зонд микроскопии.

#### Список литературы

1. Анкудинов А.В. и др. ФТП. 2006. – 40(8). – С. 1009;
2. Jiang C.-S., et al. J. Appl. Phys. 2008. – 104. – P. 104501;

## Детектирование излучения полупроводникового лазера при помощи сканирующего зондового микроскопа

Шаров В. А.<sup>1,2</sup>, Алексеев П. А.<sup>2</sup>, Дунаевский М. С.<sup>2</sup>, Михайлов А. О.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СПБПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: vl\_sharov@mail.ru

Выходную мощность полупроводниковых лазеров видимого и ближнего инфракрасного диапазона удобно измерять с помощью фотодетектора, но с увеличением длины волны излучения эффективность такого метода снижается. В этом случае фотодетектор можно заменить тепловым детектором и поместить его в ближнее поле лазера. Недавно было показано, что в качестве такого детектора можно использовать сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ). При нагревании СЗМ кантилевера (зонда) излучением лазера изменяется его резонансная частота. Зафиксировав ее изменение, можно с высокой точностью вычислить мощность лазера.

Как правило, кантилевер представляет собой многослойную балку из: верхнего металлического отражающего покрытия, средней части из Si или Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также в некоторых проводящих зондах наносится нижнее проводящее покрытие. В зависимости от состава слоёв поглощение света зондом должно быть различным. Кроме того, кантилевер и зеркало лазера, представляющее собой поверхность скола, образуют резонатор. Взаимное расположение зонда и поверхности лазера также должно влиять на поглощение света зондом. Эти вопросы были изучены в данной работе.

В данной работе исследовались полупроводниковые лазеры с длинами волн  $\lambda$  1.07 и 2.1 мкм. Измерения проводились при помощи полуконтактного метода для нескольких типов зондов производства компании Bruker: Si зонды ppp-fmg (с верхним Au покрытием), ppp-fmau (с верхним и нижним Au покрытием), и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> зонд Orc 8 (с верхним Al покрытием). Для исследований использовался сканирующий зондовый микроскоп Ntegra AURA производства NT-MDT (Россия). Записывались зависимости фазы колебаний зонда от его XY координат и на разной Z высоте от лазерного зеркала, а также при различных углах наклона кантилевера. При XY сканировании в фазовом изображении была обнаружена серия интерференционных полос, которая обусловлена наклоном  $\theta$  зонда относительно плоскости лазерного зеркала. Установлено, что период интерференционных полос  $\Delta$  меняется при изменении угла наклона кантилевера в соответствии с формулой  $\lambda/2 = \Delta \times \text{tg } \theta$ . Данное выражение позволяет с высокой точностью определять длину волны излучения лазера с помощью СЗМ. Использование различных зондов выявило, что самым чувствительным зондом является Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> зонд Orc 8, несмотря на значительно более низкий коэффициент поглощения Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> излучения исследуемых лазеров по сравнению с Si. Более высокая чувствительность обусловлена его геометрическими характеристиками.

Таким образом, в работе показана возможность детектирования ближнего и среднего ИК излучения полупроводниковых лазеров и определение длины волны излучения СЗМ методом. Был определён наиболее чувствительный зонд для детектирования ИК излучения.

### Список литературы

1. Дунаевский М.С., Донцов А.А., Алексеев П.А. Apertureless scanning microscope probe as a detector of semiconductor laser emission, Appl. Phys. Lett. 106, 171105 (2015);



# ПРИБОРЫ И МАТЕРИАЛЫ ТГц и СВЧ ДИАПАЗОНА

---

## Синтез Cu-Diamond/MoC композитов методом горячего изостатического прессования

Юсуф А. А.<sup>1</sup>, Галашов Е. Н.<sup>1</sup>, Мандрик Е. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НГУ

Эл. почта: chessplanet86@yandex.ru

Современные устройства, такие как системы безопасности, оборудование военного (радары, ракеты) и аэрокосмического назначения (спутники) [1,2], медицинское оборудование [3] и т.д. с каждым годом требуют все более и более высоких частот. Этот аспект так же касается и оборудования, имеющего гражданское назначение (связь, поисковое оборудование). Потребность в более высоких частотах приводит к повышению энергий, что в свою очередь приводит к нагреву кристаллов, используемых в СВЧ и ТГц микросхемах. Мощность микросхем можно увеличить за счет отвода тепла с кристалла. Эта задача является очень актуальной, поскольку в России высокотеплопроводные кристаллодержатели, способные эффективно отводить тепло, а также имеющие коэффициент теплового расширения, соответствующий ТКР кристалла (GaAs, ZnSe, GaN), не являются коммерчески доступными.

Наиболее теплопроводным твердым веществом является алмаз – до  $2300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{ К}^{-1}$  [4]. Однако основным его недостатком является высокая цена. Стоимость алмазов на рынке колеблется в пределах  $1000 \text{ USD}/\text{см}^3$ . Поэтому, поиск более дешевого, но в тоже время достаточно теплопроводного материала является актуальной задачей современного материаловедения. В последнее время активно ведутся разработки алмазосодержащих металлических композитов с наиболее теплопроводными металлическими матрицами, такими как Cu, Ag и Al.

Ранее в нашей [5] работе уже были описаны основные проблемы, связанные с синтезом высокотеплопроводных металл-алмазных композитов, а также созданы медно-алмазные/WC композиты, в которых алмазы покрывались карбидом вольфрама методом газофазного осаждения из карбонила вольфрама. Теплопроводность таких подложек составляла  $450 - 650 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  и ТКР  $5.5 - 7.5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . В данной работе алмазы покрывались карбидом молибдена методом газофазного осаждения из карбонила молибдена. Далее алмазы с размерами 18 мкм и 53 мкм в весовом соотношении 30 и 70% соответственно смешивались с медью. Весовое соотношение меди к алмазам составляло 35 и 65% соответственно. Медно-алмазный порошок прессовали в преформу под давлением 40 тонн на  $\text{см}^2$ . Спрессованная таблетка помещалась в горячий изостатический пресс и спекалась при температуре  $1000 ^\circ\text{C}$  и давлении 2000 атмосфер. Измеренная теплопроводность медноалмазных композитов составила

700 – 750 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. Коэффициент теплового расширения ТКР медноалмазного композита составил  $6.5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

#### Список литературы

1. Майская М., На пути к достижению субмиллиметрового диапазона длин волн, *Электроника*, 6, с.44 — 59, 2013;
2. Майская М., Освоение терагерцовой щели. Полупроводниковые приборы вторгаются в субмиллиметровый диапазон, *Электроника*, 6, с.74 — 87, 2011;
3. Чекрыгина И. М., Чекрыгин А. Э., Чекрыгин В. Э., Терагерцовые технологии в медицине, 20th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, 2010;
4. Goela J.S., Shinde S.L., *High Thermal Conductivity Materials*, Springer, N.Y., p 271, 2006;
5. Galashov E. N., Yusuf A. A., Mandrik E. M. Cu/Diamond composite heat-conducting shims, BOOK of ABSTRACTS 2<sup>nd</sup> International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2015». April 6 – 8, 2015 St. Petersburg, P. 363., 2015;

## Моделирование магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX в программе Radia

Сутыгина Я. Н.<sup>1</sup>, Харисова А. Е.<sup>1</sup>, Шкитов Д. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ТПУ

Эл. почта: yana.sutygina@mail.ru

На компактном линейном электронном ускорителе LUCX (КЕК) в Японии планируется установка плоского вигглера [1], состоящего из NdFeB постоянных магнитов, со следующими геометрическими параметрами: количество периодов 5, длина периода 6 см, ширина зазора может меняться от 30 до 60 мм. После установки вигглера на LUCX планируется проведение экспериментов по генерации ондуляторного излучения (ОИ) в терагерцовом диапазоне длин волн [2] на основе заранее сгруппированного электронного пучка с расстояниями между сгустками порядка длины самих сгустков. Чтобы провести детальные расчёты и оптимизацию характеристик ОИ, необходимо знать параметры магнитного поля, создаваемого вигглером. Также знание магнитного поля во всём объёме между полюсами вигглера требуется для того, чтобы сделать оценки изменения и смещения пучка заряженных частиц в процессе движения в вигглере, необходимые для настройки магнитной системы ускорителя. Ранее нами были произведены расчёты магнитного поля [3] вдоль траектории движения пучка электронов (центральная ось вигглера) для нескольких значений ширины зазора между полюсами магнитов. Моделирование проводилось при помощи трёхмерного магнитостатического кода Radia [4-5], основанного на решении дифференциальных уравнений методом граничных элементов, который доступен на сайте ESRF [6], и прошедшего широкую апробацию, например [7]. Сравнение измеренной амплитуды магнитного поля 0,432 Т [1] с величиной, полученной при моделировании поля 0,327 Т вдоль центральной оси для ширины зазора 30 мм, показало, что построение блоков в геометрии модели вигглера по их исходным размерам недостаточно, и для более точных расчётов необходимо провести сегментацию блоков.

Другой причиной данного расхождения амплитуд магнитного поля может быть неточное задание магнитных свойств материала постоянных магнитов в программе Radia. В данной работе представлены уточнённые и расширенные результаты моделирования магнитного поля вигглера по всему объёму между полюсами. Приводятся данные об изменении магнитного поля вдоль оси при возможных ошибках в установке вигглера – наличие угла между осью вигглера и траекторией пучка для трёх возможных направлений отклонения вигглера. Также в работе приводятся данные о достаточном числе разбиений блоков в данной модели вигглера [3] в зависимости от направления разбиения (достаточные для более точных расчётов поля), и исследуются различные возможности задания свойств постоянных магнитов [8]. В дальнейшем планируется провести моделирование траектории электронов [9], проходящих через вигглер, при различных точках влёта частиц, что возможно с помощью функционала Radia. Магнитное поле, полученное при моделировании в Radia, сравнивается с полем, рассчитанным при помощи программы, вычисления которой основаны на другом развитом методе – методе конечных элементов, например, [10].

#### Список литературы

1. Kashiwagi S., et al., Rigorous evaluation of the edge-focusing wiggler based on the magnetic field measurement, PRST AB. V.12. P.120703, 2009;
2. Харисова А.Е., и др., Моделирование характеристик ондуляторного излучения для параметров ускорителя LUCX@КЕК, Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сб. тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, Томск, С.132, 2015;
3. Сутыгина Я.Н., и др., Расчёт магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX@КЕК, Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сб. тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, Томск, С.123, 2015;
4. Elleaume P., Chubar O. and Chavanne J, Computing 3D Magnetic Fields from Insertion Devices, Proceedings of PAC, Canada, P.3509, 1997;
5. Chubar O., et al., A 3D magnetostatics computer code for insertion devices, J. Synchrotron Rad, V.5., P. 481–484, 1998;
6. Radia, <http://www.esrf.eu/Accelerators/Groups/InsertionDevices/Software/Radia>;
7. Петросян М.Л., Габриелян Л.А., и др, Ондулятор с постоянными магнитами из ферритмагнетиков, Известия НАН Армении, Физика, Т.42, №1, С.57–62, 2007;
8. Brandt D, Magnets, Proceedings of CERN Accelerator School, Geneva, P.185–230, 2010;
9. Knyazik A., et al, Status of UCLA helical permanent-magnet undulator, Proceedings of PAC, Canada, P.2441, 2009;
10. FEMM 4.2 – Finite Element Method Magnetics, [www.femm.info](http://www.femm.info);

## Разработка полупроводникового метаморфного буфера для изготовления СВЧ транзисторов

Лазаренко А. А.<sup>1</sup>, Соболев М. С.<sup>1</sup>, Пирогов Е. В.<sup>1</sup>, Никитина Е. В.<sup>1</sup>, Егоров А. Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПб АУ РАН

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: alexashpigun@yandex.ru

Монолитные интегральные схемы и устройства на основе фосфида индия (InP) представляют собой весьма перспективное решение для модулей систем связи для высокочастотных применений [1]. Устройства, выполненные на подложках этого типа, демонстрируют отличные характеристики и идеально подходят для телекоммуникационных приложений. НЕМТ-транзисторы (high electron mobility transistor) на основе InP имеют низкий коэффициент шума, высокую выходную мощность, малое рабочее напряжение, высокий КПД и очень высокое быстродействие. Дрейфовая скорость носителей заряда у фосфида индия в 1.5 раза больше, чем у арсенида галлия. В InGaAs канале электрон достигает подвижности  $10000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , при высокой плотности заряда в слое двухмерного электронного газа  $(3-4.5)\cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  [2]. Типичные значения подвижности и концентрации электронов в канале транзисторных гетероструктур AlGaAs/InGaAs на подложках GaAs лежат в диапазоне  $5000-6500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  и  $(2.0-3.6)\cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре [3, 4].

Однако подложки InP по сравнению с GaAs подложками обладают существенными недостатками, такими как меньший размер коммерчески доступных пластин, высокая хрупкость и высокая цена, что затрудняет производство приборов на их основе. В связи с этим существует интерес к так называемым метаморфным транзисторным гетероструктурам на подложках GaAs, в которых использование специфических технологических режимов выращивания буферного слоя In(Ga)AlAs позволяет перейти от постоянной решетки GaAs к большей постоянной решетке в структуре (до постоянной решетки, соответствующей InP подложки и более).

Метаморфный буфер создается таким образом, что большинство дислокаций не распространяется в направлении роста, а содержатся лишь внутри переходного слоя. Метаморфный буферный слой выполняет две функции. Первая – он изменяет постоянную решетки от подложки GaAs к активному слою с большим содержанием индия. Вторая – он захватывает дислокации и препятствует их попаданию в канал транзисторной гетероструктуры [5].

В работе сравниваются различные конструкции метаморфных буферных слоев на подложках GaAs, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, для InAlAs/InGaAs/GaAs МНЕМТ. Исследования проводились методами сканирующей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и методом Холла. Оптимальная конструкция позволила изменить постоянную решетки растущего слоя от подложки GaAs к активному слою с большим содержанием индия  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  с низким числом порастающих дислокаций и малой шероховатостью.

Таким образом, удалось получить высококачественный метаморфный буфер, который обеспечивает возможность дальнейшего выращивания метаморфных гетероструктур транзисторов с высокой подвижностью электронов на подложках GaAs.

## Список литературы

1. Kastalski A., Keihl R.A. Gallium Arsenide and Related Compounds, IPCS, No 79, 535, 1985;
2. Sato Y., Kita T., Gozu S., Yamada S., Large spontaneous spin splitting in gate-controlled two-dimensional electron gases at normal  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Al}_{0.25}\text{As}$  heterojunctions, J. Appl. Phys., 89, 8017, 2001;
3. Хабибуллин Р.А., Васильевский И.С., Галиев Г.Б. и др., Влияние встроенного электрического поля на оптические и электрофизические свойства Р-НЕМТ наногетероструктур  $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ , ФТП, 45, вып. 5, 666-671, 2011;
4. Егоров А.Ю., Гладышев А.Г., Никитина Е.В. и др., Двухканальные псевдоморфные НЕМТ-гетероструктуры  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  с импульсным легированием, ФТП, 44, вып. 7, 950-954, 2010;
5. Behet M., Van der Zanden K., Borghs G., Metamorphic  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  quantum well structures grown on  $\text{GaAs}$  substrates for high electron mobility transistor applications, Appl.Phys.Lett., 73, 2760, 1998;

## Управление спектром фазовых шумов генераторов на основе спин-волновых линий задержки

*Дроздовский А. В<sup>1</sup>*, Устинов А. Б.

СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: drozdovskyav@gmail.com

Генераторы СВЧ сигнала являются ключевым элементом устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов [1]. Генераторы, с несущей непосредственно в СВЧ, как правило, делаются по стандартной схеме в виде кольца, содержащего усилитель, управляющий элемент и направленный ответвитель для вывода СВЧ сигнала. В качестве управляющего элемента выступает резонатор или линия задержки. При использовании схемы, управляемой резонатором, спектральная плотность мощности фазовых шумов, в основном, определяется добротностью резонатора. Перестройка по частоте осуществляется путем перестройки резонансной частоты резонатора [2]. Генераторы на сферах железо-иттриевого граната (ЖИГ) обладают наибольшей перестройкой по частоте и могут перестраиваться на несколько октав.

Принципиально иной схемой построения генераторов является схема, содержащая линию задержки в качестве частотно-селективного элемента [3]. Для перестройки частоты генерации активного кольца необходимо менять полосу пропускания линии задержки. Из всех возможных конструкций линий задержки наибольшим коэффициентом перестройки по частоте обладает спин-волновая линия задержки [4]. Линия задержки на спиновых волнах обладает малыми размерами и легко перестраивается внешним магнитным полем в диапазоне до 20 ГГц. Данная конструкция является уникальной, поскольку при перестройке рабочего диапазона магнитным полем, длина волны остается неизменной. В тот же момент, конструкции спин-волновых приборов легко реализуются при помощи стандартной фотолитографии и технологией навесных электронных компонентов. Генераторы на основе спин-волновых линий задержки могут иметь следующие достоинства: планарность конструкции, мини-

тюрность, низкий уровень фазовых шумов, перестройка в широком диапазоне частот и относительно низкая себестоимость.

Был проведен эксперимент, в котором активное кольцо, содержащее спин-волновую линию задержки, вводилось в режим монохроматической генерации. Для возбуждения и приема спиновых волн был использован макет линии задержки с одноэлементными антеннами шириной 50 мкм. Расстояние между возбуждающей и приемной антеннами  $d$  можно было варьировать в диапазоне от 1,5 до 19 мм. Сверху на микрополосковые антенны накладывался волновод спиновых волн, изготовленный из эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний галлиевого гранта монокристаллической пленки ЖИГ. Пленка ЖИГ имела толщину 13 мкм и намагниченность насыщения 1950 Гс. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса  $\Delta H$ , измеренная на частоте 5.3 ТГц, была равна 0.5 Э. Пленка, имела свободные поверхностные спины. Чтобы избежать отражения СВ от концов волновода, они были сточены под острыми углами. Экспериментальный макет был помещен между полюсами электромагнита в однородное постоянное магнитное поле. Поле было направлено в плоскости пленки вдоль антенн спиновых волн. Для измерения спектра и фазовых шумов, сигнал с выхода генератора подавался на анализатор спектра Rohde & Schwarz FSUP26 с опцией измерения фазовых шумов.

Для начала генерации сигнала в активном кольце, описанном выше, необходимо одновременное выполнение двух условий. Условия компенсации потерь в активном кольце усилителем и условия фазового синхронизма. При проведении эксперимента макет, при помощи аттенюатора, переводился в режим монохроматической генерации сигнала, так, чтобы значение коэффициента усиления кольца составляло минимально возможное значение для начала устойчивой генерации. Путем изменения величины магнитного поля удалось перестроить частоту генерируемого сигнала в диапазоне 3.5 — 7 ТГц.

Увеличение  $d$  приводило к уменьшению уровня спектра фазовых шумов. Например, при увеличении  $d$  от 1.5 до 19 мм, фазовый шум при отстройке 10 кГц уменьшается с  $-92$  до  $-106$  дБн/Гц. Из результатов сопоставления фазовых шумов при отстройке 10 кГц было получено качественное и количественное совпадение теоретической и экспериментальной зависимостей.

Таким образом, вышеописанное исследование демонстрирует, возможность применения активного кольца, содержащего спин-волновую линию задержки в качестве основы перестраиваемого маломощного генератора монохроматического СВЧ-сигнала. При этом спектром фазовых шумов генератора можно эффективно управлять путем подбора расстояния между возбуждающими приемными антеннами спиновых волн.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (№ 14-02-00496 А).

#### Список литературы

1. Ченакин А., Фазовые шумы в СВЧ-генераторах, Элементная база электроники, Вып. №4, С. 00110, 2011;
2. Westra J.R., Verhoeven C. J. M., Van Roermund A. H. M. Oscillators and Oscillator Systems. – Kluwer, 2000;
3. E. Rubiola, Phase noise and frequency stability in oscillators, Cambridge University Press, Cambridge, 2008;
4. D.D. Stancil and A. Prabhakar, Spin waves: Theory and applications, Springer, New York, 2009;

# Микрополосковый диплексер на основе двухмерного фотонного кристалла

Ходенков С. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СибГАУ им. М.Ф. Решетнева

Эл. почта: hsa-sibsau@mail.ru

Искусственные периодические структуры, размеры неоднородностей в которых сравнимы с длиной электромагнитной волны, так называемые фотонные кристаллы [1], привлекают внимание исследователей перспективой создания на их основе различных устройств СВЧ и оптоэлектроники, в том числе и пространственных частотно-селективных микрополосковых конструкций [2, 3].

В настоящей работе описана разработанная конструкция микрополоскового диплексера на основе двухмерного фотонного кристалла с пространственной размерностью  $3 \times 2$  (три элементарных ячейки вдоль оси  $x$ , две – вдоль оси  $y$ ). Селективное устройство спроектировано с использованием подложки, имеющей высокую диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 80$  и толщину  $h = 1$  мм (керамика ТБНС). Расчет амплитудно-частотной характеристики диплексера произведен с помощью электродинамического численного анализа 3D моделей, который хорошо согласуется с данными, снятыми с экспериментально изготовленных микрополосковых конструкций.

Принцип действия микрополоскового диплексера заключается в следующем: сигнал поступает на вход устройства, представляющий собой точку кондуктивного подключения, расположенную на свернутом проводнике связи, электромагнитно связанным с резонаторами, расположенными в два ряда. В этих рядах шесть полосковых проводников, заземленных на основание со стороны краев подложки, представляют собой аналоги пространственно-периодических изменений диэлектрической проницаемости в структуре двумерных фотонных кристаллов. Более короткие полосковые проводники-резонаторы первого ряда формируют тремя резонансами полосу пропускания  $I$ , при этом обработанный сигнал снимается с последнего проводника в этом ряду (выход 1). Более длинные резонаторы второго ряда, аналогично, формируют полосу пропускания  $II$ , а сигнал, соответственно, снимается с последнего проводника второго ряда (выход 2).

Высокие частотно-селективные свойства СВЧ конструкции обусловлены сильной крутизной склонов полос пропускания, значительным подавлением мощности на частотах низкочастотной и расширенной высокочастотной полос заграждения. Относительная ширина как первой ( $I$ ), так и второй ( $II$ ) полосы пропускания диплексера составила  $\Delta f/f_0 \approx 9.5\%$ , измеренные по уровню  $-3$  дБ от уровня минимальных потерь ( $L_{\min} \approx -1.4$  дБ) на центральной частоте низкочастотной полосы пропускания  $f_0 \approx 0.93$  ГГц и высокочастотной  $-f_0 \approx 1.03$  ГГц.

Важно отметить, что количество одномодовых четвертьволновых резонаторов в рядах может быть увеличено. При этом простота настройки диплексера с улучшенными частотно-селективными свойствами обусловлена тем, что настройка полос пропускания  $I$  и  $II$  по частоте и относительной ширине осуществляется практически независимо.

Таким образом, на основе двухмерного фотонного кристалла предложен микрополосковый диплексер. Использование в конструкции внутренних расположенных в два ряда четвертьволновых одномодовых резонаторов и крайнего свернутого полуволнового позволяет реализовать ей высокие частотно-селективные свойства, обу-

словленные наблюдаемыми на амплитудно-частотной характеристике полюсами затухания мощности, которые приводят к существенному росту крутизны склонов полос пропускания и усилению подавления мощности на частотах низкочастотной и расширенной высокочастотной полос заграждения.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук, МК-5942.2014.8 «Исследование и проектирование современных микрополосковых и полосковых устройств частотной селекции, в том числе с использованием активных сред и на основе фотонных кристаллов».

#### Список литературы

1. Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В., Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности, Новосибирск: Изд — во СО РАН, 240 с., 2005;
2. Беляев Б.А., Ходенков С.А., Борисенков Д.В., Бутиков А.С. Микрополосковые фильтры на основе двумерного фотонного кристалла, 24th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology», с. 572-573, 2014;
3. Беляев Б.А., Лексиков А.А., Ходенков С.А., Шабанов В.Ф., Исследование полосно-пропускающих фильтров на микрополосковом двумерном фотонном кристалле, 17th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology», с. 469 – 470, 2007;

## Исследование микрополосковых фильтров с широкой полосой заграждения

*Ходенков С. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СибГАУ им. М.Ф. Решетнева

Эл. почта: hsa-sibsau@mail.ru

Как известно [1-3], полосно-пропускающие фильтры являются важнейшими элементами современных радиотехнических систем связи, систем радиолокации и радионавигации. Одними из основных требований, предъявляемых к микрополосковым фильтрам, являются миниатюрность, технологичность и высокие частотно-селективные свойства, которые в том числе определяются наличием у СВЧ устройств широкой полосы заграждения с достаточным уровнем затухания мощности.

В настоящей работе описаны исследования таких микрополосковых полосно-пропускающих фильтров с широкой высокочастотной полосой заграждения. Селективные устройства разработаны с использованием подложки, имеющей диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon = 9.8$  и толщину  $h = 1$  мм. Их амплитудно-частотные характеристики, рассчитанные при помощи электродинамического численного анализа 3D моделей, хорошо согласуются с данными, снятыми с экспериментально изготовленных микрополосковых фильтров, что позволяет проводить теоретические исследования таких конструкций на высоком уровне. Настройка фильтров с полосковыми проводниками, обладающими осевой симметрией, осуществлялась «ручным» параметрическим синтезом, при котором подбираются их геометрические размеры. Для объективности сравнения центральная частота полосы пропускания исследуемых конструкций была выбрана равной  $f_0 = 1$  ГГц.



Первый микрополосковый фильтр представляет собой конструкцию с тремя сонаправленными резонаторами. Полосковый проводник, размещенный с одной стороны диэлектрической пластины (резонатор) условно состоит из трех участков: двух узких параллельных отрезков полосковых проводников, заземляемых на основании с одного конца, соединенных друг с другом широким отрезком проводника. Благодаря такой нерегулярности, оптимально подобранной по размерам, можно расширить высокочастотную полосу заграждения до ширины не менее  $3.8f_0$ .

При этом на амплитудно-частотной характеристике рядом с высокочастотным склоном полосы пропускания наблюдается полюс затухания, что соответственно, приводит к росту крутизны последней. Относительная ширина полосы пропускания полосно-пропускающего фильтра –  $\Delta f/f_0 = 10\%$ .

Второй микрополосковый фильтр представляет собой аналогичную трехзвенную конструкцию, реализованную уже на встречно-направленных резонаторах. Отметим, что «перевернутый» центральный резонатор имеет вертикальную раздвижку относительно крайних, в остальном полосковые проводники идентичны проводникам в предыдущей конструкции. Высокочастотная полоса заграждения также имеет ширину не менее  $3.8f_0$ , а полоса пропускания равна  $\Delta f/f_0 = 10\%$ . Однако на амплитудно-частотной характеристике практически в центре высокочастотной полосы заграждения дополнительно наблюдается полюс затухания, что увеличивает подавление мощности в ней.

Таким образом, показаны возможности значительного расширения высокочастотной полосы заграждения (не менее  $3.8f_0$ ) в микрополосковых полосно-пропускающих фильтрах. Применение в селективных конструкциях встречно-направленных резонаторов вместо сонаправленных позволяет наблюдать на амплитудно-частотной характеристике практически в центре высокочастотной полосы заграждения дополнительный полюс затухания, что увеличивает подавление мощности в ней.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук, МК-5942.2014.8 «Исследование и проектирование современных микрополосковых и полосковых устройств частотной селекции, в том числе с использованием активных сред и на основе фотонных кристаллов».

#### Список литературы

1. Chen Y.M., Chang S.F., Chang C.C., Hung T.J., Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, p. 2191–2199, 2007;
2. Belyaev B.A., Butakov S.V., Laletin N.L., Leksikov A.A., Tyurnev V.V., Chesnokov O.N., Selective properties of microstrip filters designed on quarter-wave codirectional hairpin resonators, *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 51, N. 1, p. 20–30, 2006;
3. Lin S.C., Deng P.H., Lin Y.S., Wang C.H., Chen C.H., Wide-stopband microstrip bandpass filters using dissimilar quarter-wavelength stepped-impedance resonators, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, p. 1011–1017, 2006;

## **Новая схема формирования сигнала СВЧ возбуждения для квантового стандарта частоты на атомах цезия-133**

*Петров А. А.<sup>1</sup>, Давыдов В. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: alexandrpetrov.spb@yandex.ru

В настоящее время квантовые стандарты частоты (КСЧ) являются основными устройствами, обеспечивающими формирование и воспроизведение с необходимой точностью физической единицы измерения времени и частоты [1, 2].

Современное развитие научно – технического прогресса постоянно изменяет условия эксплуатации КСЧ. Это приводит к тому, что к КСЧ постоянно предъявляются новые требования по точности измерений, надежности работы и массо – габаритным характеристикам. Для выполнения этих требований необходимо постоянно модернизировать действующие и разрабатывать новые модели КСЧ.

Разработка, на основе фундаментальных научных исследований, и ввод в эксплуатацию новых КСЧ очень долгий и дорогостоящий процесс, на который в большинстве случаев не хватает как средств, так и времени. Поэтому в большинстве случаев для решения конкретных задач, связанных с эксплуатацией КСЧ, проводятся научные исследования с целью его модернизации. Процесс модернизации КСЧ включает в себя различные направления: изменение массы и габаритов, снижение энергопотребления, улучшение метрологических характеристик. Причем для КСЧ характерно то, что модернизации может подвергаться не вся конструкция, а отдельные его узлы или блоки.

В работе представлено одно из направлений модернизации КСЧ на атомах  $^{133}\text{Cs}$ , конкретно отдельного блока – синтезатора частоты с целью улучшения метрологических характеристик стандарта частоты, а именно дисперсии Аллана.

В настоящее время метод формирования выходного сигнала синтезатора частоты исчерпал возможности по увеличению точности. Необходима большая разрешающая способность, поскольку точность воспроизведения сигнала СВЧ – возбуждения атомного перехода оказывает значительное влияние на метрологические характеристики стандарта.

В новой разработанной конструкции цифрового синтезатора частоты используется метод прямого цифрового синтеза (DDS – Direct Digital Synthesis). Выбор такого решения обусловлен рядом достоинств перед остальными методами синтеза частоты. DDS уникален своей цифровой определенностью: генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью. Частота, амплитуда и фаза этого сигнала в любой момент времени точно известна и подконтрольна [3].

Проведенные исследования работы синтезатора частоты показали, что использование метода прямого цифрового синтеза позволило улучшить параметры сигнала СВЧ — возбуждения, такие как точность формирования частоты, шаг перестройки частоты, время перестройки частоты и спектральные характеристики [4, 5]. Благодаря возможности получения различных частот на выходе синтезатора частоты, реализована возможность отстройки на частоту соседнего резонанса спектральной линии, что дает возможность подстраивать среднее поле квантового стандарта частоты, и тем самым устранить один из важных возмущающих факторов, влияющих на долговременную стабильность частоты.

Экспериментальные исследования метрологических характеристик квантового стандарта частоты на атомах цезия – 133 с новой схемой формирования сигнала СВЧ – возбуждения показали улучшение суточной нестабильности частоты на 20%.

#### Список литературы

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. – СПб: издательство Политехнического университета, 2012;
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009;
3. Ридико Л.И. Прямой цифровой синтез частоты. – Компоненты и технологии, № 7, С. 34 – 38, 2001;
4. Петров А.А., Новый метод формирования СВЧ-сигнала возбуждения в цезиевых атомных часах, Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, с. 33 – 35, 13.04. – 17.04.2015;
5. Petrov A.A., Davydov V.V., Vologdin V.A, Dependence of microwave-excitation stability of caesium atomic clock, 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, s.251, April 6-8. 2015;

## Исследование волновых процессов в мультиферроидных структурах на основе модулированной по ширине щелевой линии передачи

Никитин А. А.<sup>1</sup>, Витько В. В.<sup>1</sup>, Никитин А. А.<sup>1</sup>, Устинов А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: alexeynikitin1@gmail.com

Магنونный кристалл (МК) – это объект с периодической структурой, который имеет запрещенные зоны в спектре волн. СВЧ МК обычно создаются с помощью периодической модуляции одного из параметров пленочного магнитного волновода. Это может быть периодическое изменение толщины или ширины волновода, металлизация его поверхности, ионная имплантация, а также модуляция поля подмагничивания пленки. Интерес к МК обусловлен тем, что, с одной стороны, они являются удобной модельной средой для изучения линейных и нелинейных волновых эффектов [1], а с другой — на их основе возможно создание функциональных СВЧ приборов [2]. Однако несмотря на разнообразие существующих подходов [3–5] к описанию свойств МК, детальное теоретическое изучение распространения электромагнитно-спиновых волн (ЭМСВ) в мультиферроидных структурах, содержащих пространственно-периодические щелевые линии передачи, ранее не проводилось.

Хорошо известно, что при исследовании различных линейных и нелинейных спин-волновых явлений в мультиферроиках одним из определяющих факторов является закон дисперсии ЭМСВ. Было показано, что спектр ЭМСВ таких структур характеризуется наличием разрешенных зон, соответствующих частотам, на которых возможно распространение ЭМСВ, а также запрещенных зон, на частотах которых они распространяются с относительно высоким затуханием волны. Возникновение запрещенных зон обусловлено брэгговскими резонансами, возникающими вследствие того, что на различных участках структуры волны имеют разные фазовые ско-

рости, следовательно, различные участки структуры имеют различные волновые сопротивления.

При изучении волновых процессов в МК, содержащих модулированную по ширине щелевую линию, были исследованы дисперсионные и передаточные характеристики ЭМСВ, которые, как уже было сказано выше, характеризуются наличием запрещенных зон. Было продемонстрировано, что расположение этих зон может изменяться под действием внешнего электрического поля. С другой стороны, ферритовая пленка в исследуемом МК позволяет не только реализовывать магнитную перестройку, но и существенно изменяет передаточную характеристику.

На основе проводимых в данной работе исследований было установлено, что тонкопленочные мультиферроидные структуры, содержащие модулированную по ширине щелевую линию, являются перспективной основой для создания новых перестраиваемых СВЧ устройств, поскольку они позволяют использовать тонкопленочные феррит-сегнетоэлектрические структуры. Таким образом, в приборах на их основе можно реализовывать электрическую и магнитную перестройку дисперсионных и передаточных характеристик, минимизировать управляющее напряжение и увеличить эффективность перестраиваемых СВЧ устройств.

#### Список литературы

1. Ustinov A.B., Kalinikos B.A., Demidov V.E., Demokritov S.O., Formation of gap solitons in ferromagnetic films with a periodic metal grating, *Phys. Rev. B.*, v. 81, № 18, p. 180406, 2010;
2. Никитов С.А., Филимонов Ю.А., Высоцкий С.Л., Физические основы фильтрации свч-сигналов с использованием магнетонных кристаллов, *Гетеромагнитная микроэлектроника*, вып. 5, с. 78-86, 2008;
3. Chumak A. V., Serga A.A., Wolff S., Design and optimization of one-dimensional ferrite-film based magnonic crystals, *J. Appl. Phys.*, v. 105, iss. 8, p. 083906, 2009;
4. Elachi C., Waves in active and passive periodic structures: a review, *Proceedings of the IEEE*, v. 64, № 12, p. 1666-1698, 1976;
5. Sykes C.G., Adam J.D., Collins J.H., Magnetostatic wave propagation in a periodic structure, *Appl. Phys. Lett.*, v. 29, №6, p. 388-391, 1976;

## **Многофакторный характер отклика частично упорядоченных сред различной дисперсности на СВЧ облучение в процессе самоорганизации**

*Градов О. В.<sup>1</sup>, Градова М. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ИНЭПХФ РАН

<sup>2</sup>ИХФ РАН

Эл. почта: o.v.gradov@gmail.com

В элементарном случае при неселективном взаимодействии СВЧ поля с коллоидно-дисперсным ионогенным прекурсором происходит рассеяние, обеспечиваемое потерями энергии пучка (диссипация) за счет ионной проводимости и дипольного вращения. Поскольку ионная проводимость обусловлена электрофоретической миграцией ионов в растворе, при наложении электромагнитного поля происходит их перемещение в облучаемом прекурсоре в направлении, детерминированном парамет-

рами поля. Так как движение ионов представляет собой токи, приводящие к потерям энергии, равным по величине количеству выделяемой теплоты за счет сопротивления потоку ионов, возникает локальный разогрев среды, зависящий от ионного состава возникающего в данной области потока. При этом, так как вклад конкретных ионов определяется их подвижностью, возникают предпосылки для гетерогенизации химического состава среды на локальных масштабах.

Поскольку концентрации ионов в локальных зонах меняются и происходит пространственное диспропорционирование потоков в этих направлениях, увеличение концентрации ионов приводит к возрастанию коэффициента рассеяния, то есть потерь в среде, и разогреву прекурсора. Таким образом, формируется обратная связь. Так как по мере возрастания температуры диэлектрические потери, обусловленные вкладом дипольного вращения, уменьшаются (когерентность возрастает), а величина диэлектрических потерь определяется ионной проводимостью, по мере облучения имеет место переход от ориентационного упорядочения в среде к формированию структур за счет ионной проводимости в облучаемом прекурсоре, сопровождаемой тепломассопереносом. Поскольку ионная проводимость зависит от природы и концентрации ионов, их подвижности и температуры раствора, локальный рост концентрации ионов на масштабах самоорганизации, как и нагрев в СВЧ поле, приводят к увеличению коэффициента рассеяния в рамках вышеупомянутой схемы обратной связи.

Поскольку вследствие разнонаправленного разделения потоков ионов формируются структуры, локально различающиеся по химическому составу и, соответственно, проводимости, в разных областях среды в дальнейшем начинают работать разные механизмы СВЧ отклика. Так как эффективность нагрева диэлектрических областей под СВЧ зависит от характеристического времени релаксации диэлектрика, определяемого по его вязкости, меняющейся при дегидратационной поликонденсации прекурсора, переход от ориентационного упорядочения к фиксированной гетерофазной системе напрямую связан с индуцированными фазовыми переходами. Поскольку изменение вязкости приводит к изменению диффузионных характеристик дисперсных частиц, СВЧ-индуцированная самоорганизация дисперсных структур представляет собой типичный реакционно-диффузионный процесс в микрогетерогенной системе. При этом данный процесс обладает свойством эмерджентности, то есть зависимостью свойств структур от полной совокупности всех механизмов, лежащих в основе их формирования, не дающих по отдельности аналогичного эффекта.

Результатом данной совокупности процессов является формирование структур, активных по отношению к факторам, лежащим в основе механизмов их образования. Так, под действием поляризации и ориентированных ионных потоков, участвующих в самоорганизации в среде, формируются мембраномиметические структуры, обладающие как ионным градиентом и свойствами селективной ионной проницаемости, так и электрохимическим потенциалом на поверхности, обеспечивающим их сорбционную активность. Так как при рассеянии на дисперсном прекурсоре энергия поглощается согласно коэффициенту рассеяния в каждой точке, определяемого через отношение величин диэлектрических потерь для материала в этой точке к диэлектрической постоянной (способности вещества данной точки препятствовать прохождению микроволн), в различных областях прекурсора наблюдаются различные диссипативные процессы, зависящие от локального характера материала и ведущие к самоорганизации структур с различающимися электрохимическими и электрофизическими свойствами на локальных масштабах.

## **Сверхвысокочастотный динамический хаос гибридных электромагнитно-спиновых волн в активных кольцах на основе мультиферроиков**

*Кондрашов А. В.<sup>1</sup>, Устинов А. Б.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: kondrashov\_av@inbox.ru

В последние годы все большее внимание уделяется исследованию методов возбуждения СВЧ динамического хаоса в различных нелинейных системах и средах. Интерес к таким исследованиям объясняется возможностью использования хаотических сигналов в телекоммуникационных [1] и радарных [2] системах нового поколения, а также для генерации случайных чисел [3]. К настоящему моменту времени разработаны и изучены различные генераторы СВЧ динамического хаоса, изготовленных на основе дискретных электронных компонентов [4, 5], оптоэлектронных компонентов [6], СВЧ резонанторов [7]. Одним из перспективных материалов для создания генераторов динамического хаоса в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне являются ферромагнитные волноводы спиновых волн [8-10]. К достоинствам таких генераторов можно отнести возможность управления режимом генерации, частотными характеристиками сигнала, а также параметрами хаотического сигнала. Однако управление в таких системах энергозатратно. Использование волноведущих сред комбинирующих в себе ферритовые и сегнетоэлектрические материалы позволяет сохранить все достоинства ферритовых материалов, достигнув при этом более высокого уровня энергоэффективности.

Целью настоящей работы было исследование сверхвысокочастотного динамического хаоса гибридных электромагнитно-спиновых волн в активных кольцах на основе мультиферроиков, а также исследование влияния параметров мультиферроидной структуры на свойства генерируемых сигналов.

Экспериментальный макет активного кольца был сконструирован по аналогии с работой [10]. Его основными элементами являлись нелинейная линия задержки, широкополосный полупроводниковый СВЧ усилитель, переменный аттенуатор и направленный ответвитель. Основным элементом линии задержки был мультиферроидный волновод гибридных электромагнитно-спиновых, представлявший собой прижатые друг к другу пленку железо-иттриевого граната (ЖИГ) и пластину титаната бария-стронция (БСТ). Толщина пленки ЖИГ составляла 5.7 мкм, ширина – 2 мм, длина – 4 см. Пластина БСТ была изготовлена из керамики состава  $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$ . Толщина пластин составляла 500 мкм. Длина зоны контакта ЖИГ и БСТ составляла 5 мм. Принцип работы линии задержки заключался в следующем. В пленке ЖИГ возбуждались спиновые волны, которые распространялись до области контакта ЖИГ-БСТ. Далее спиновые волны преобразовывались в гибридные электромагнитно-спиновые волны. В конечной части структуры распространялись опять чисто спиновые волны. Возбуждение и прием волн осуществлялись микрополосковыми антеннами длиной 2 мм и шириной 50 мкм. Расстояние между антеннами составляло 6.7 мм.

Экспериментальные исследования показали, что в исследуемой структуре при постепенном увеличении коэффициента усиления кольца генерирует различные типы СВЧ сигналов: монохроматический, периодический, в частности, периодическую последовательность нелинейных импульсов — темных солитонов, а также СВЧ динамический хаос. Изменение напряженности прикладываемого к сегнетоэлектриче-

ской пластине электрического поля смещения позволяло управлять параметрами автотенерируемого СВЧ сигнала. В работе было экспериментально исследовано изменение параметров хаотического сигнала при изменении напряженности электрического поля смещения, прикладываемого к сегнетоэлектрическому слою. Так пороговое значение коэффициента усиления кольца, при котором происходил переход к хаотической динамике, снижалось на 0.2 дБ при постепенном уменьшении напряженности от 0 кВ/см до 12 кВ/см. В хаотическом режиме увеличение напряженности электрического поля приводило к росту фрактальной размерности на величины порядка единиц. Таким образом, изменение напряженности электрического поля смещения позволяет управлять параметрами хаотического сигнала в более узком диапазоне значений, по сравнению с рассмотренными в более ранних работах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ в рамках гранта № 14-02-31638 мол\_а.

## СВЧ фильтр на кольцевом резонаторе

*Ходенков С. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СибГАУ М.Ф. Решетнева

Эл. почта: hsa-sibsau@mail.ru

Разработчиков СВЧ устройств, в том числе и полосно-пропускающих фильтров, в настоящее время привлекают многомодовые микрополосковые резонаторы [1-3]. Прежде всего, это связано с возможностью уменьшения габаритов устройств за счет снижения количества резонаторов в них, причем без ухудшения их частотно-селективных свойств. Так, использование многомодовых резонаторов в конструкции фильтра позволяет сформировать его полосу пропускания, используя резонансы сразу нескольких мод колебаний от каждого резонатора, частоты которых удастся сблизить. В результате, при неизменном порядке фильтра, которым и определяются его частотно-селективные свойства, количество резонаторов в нем уменьшается во столько раз, сколько мод колебаний от каждого резонатора участвуют в формировании полосы пропускания.

Настоящая работа посвящена разработке микрополоскового полосно-пропускающего фильтра на многомодовом резонаторе с проводниками в форме двойного прямоугольного кольца. Амплитудно-частотные характеристики конструкции рассчитаны при помощи электродинамического численного анализа 3D моделей. При проектировании использовалась подложка из традиционного СВЧ материала – керамики ТБНС с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 80$  и толщиной  $h = 1$  мм.

В разработанном частотно-селективном устройстве на одну сторону подложки нанесено заземляемое основание, а на вторую сторону – нанесены соединенные в форме прямоугольного кольца четыре отрезка полосковых проводников – два идентичных параллельных и два параллельных различной ширины. Кроме того, внутри этого кольца находится еще одно прямоугольное кольцо. Оно образовано еще тремя дополнительными отрезками полосковых проводников и одним общим для двух колец отрезком.

В такой конструкции многомодовый режим работы двойного кольца-резонатора осуществляется за счет особой формы проводников, протяженных вдоль оси  $x$  и оси  $y$ . Благодаря замкнутому соединению полосковых проводников и их нере-

гулярностям можно сблизить частоты их нижайших резонансов так, чтобы они сформировали полосу пропускания фильтра. Так два резонанса возникает за счет полосковых проводников внешнего кольца, протяженных вдоль оси  $x$  и оси  $y$ . Еще два резонанса, формирующих полосу пропускания, образуются на тех частотах, когда суммарная электрическая длина (набег фазы) полосковых проводников внешнего кольца равна  $360^\circ$ . В этом случае по всей длине кольца укладывается одна полная длина волны, что соответствует резонансу бегущей волны, когда электромагнитная волна вынуждена циркулировать по замкнутой траектории кольца. Благодаря нерегулярностям полосковых проводников наблюдается два таких резонанса. Для одного из них направление циркуляции – по «часовой стрелке», для другого – против «часовой стрелки». Еще два резонанса возникает за счет внутреннего кольца. Таким образом, это фильтр шестого порядка.

Отметим, что существенному увеличению подавления мощности на частотах полос заграждения способствует смежное подключение тракта СВЧ не непосредственно к внешнему кольцу, а к одиночным полосковым проводникам, за счет чего возникает одновременно и емкостная, и индуктивная связь этих проводников с проводниками колец. В результате на АЧХ рядом с первой полосой пропускания наблюдаются два полюса затухания мощности. Первый полюс располагается рядом с низкочастотным склоном полосы пропускания, а второй – рядом с высокочастотным.

Таким образом, разработан на многомодовом резонаторе с проводниками в форме двойного прямоугольного кольца микрополосковый полосно-пропускающий фильтр шестого порядка. Устройство отличается миниатюрностью и обладает высокими частотно-селективными свойствами, обусловленными в основном сильной крутизной склонов полосы пропускания.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук, МК-5942.2014.8.

#### Список литературы

1. Ходенков С.А., Беляев Б.А., Мочалов В.В., Микрополосковые фильтры на двухмодовых резонаторах, Известия высш. учеб. заведений. Физика, Т. 56 № 8, с. 80–84, 2013;
2. Бальва Я.Ф., Беляев Б. А., Ходенков С.А, Исследование микрополосковых многомодовых резонаторов и конструирование полосно-пропускающих фильтров на их основе, Известия высш. учеб. заведений. Физика, Т. 55 № 8/3, с. 153 – 156, 2012;
3. Александровский А.А., Беляев Б.А., Лексиков А.А, Синтез и селективные свойства микрополосковых фильтров на шпильковых резонаторах со шлейфными элементами, Радиотехника и электроника, Т. 48. №4, с. 398-405, 2003;



## Спин-волновой согласованный фильтр на активном кольцевом резонаторе

Мартынов М. И.<sup>1</sup>, Никитин А. А., Калиникос Б. А.<sup>1</sup>, Устинов А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: nitrogeniumfirst@gmail.com

Постоянно растущие требования к радиотехническим системам и разнообразие их применений требуют искать новые принципы передачи-обработки информации. Отдельные виды сигналов, такие как управляющие аналоговые сигнал и радиолокационные сигналы длинноволнового диапазона могут обрабатываться посредством прямой фильтрации. Одним из возможных методов фильтрации аналоговых периодических сигналов является их обработка с помощью фильтра с гребенчатой передаточной характеристикой. Такую характеристику, в широком диапазоне частот, можно получить с помощью активных кольцевых резонаторов.

В работе был исследован фильтр на основе активного кольцевого резонатора с применением ферритовой линии задержки. Амплитудно-частотная характеристика такого фильтра имеет гребенчатый вид, с множеством полос пропускания. Фильтрация сигнала происходит посредством прямого преобразования входного сигнала, причем передаточная характеристика фильтра подбирается таким образом, чтобы захватить максимальное количество гармоник спектральной плотности сигнала. В таком случае происходит прямое «согласование» спектральной плотности сигнала и передаточной характеристики фильтра, поэтому фильтр, работающий по такому принципу, можно считать согласованным.

В работе исследован согласованный фильтр на активном кольцевом резонаторе (АКР), макет которого был сконструирован из спин-волновой линии задержки, переменного аттенюатора, СВЧ усилителя и двух направленных ответвителей. Все элементы были последовательно соединены СВЧ кабелями, образуя замкнутое кольцо. Широкополосный СВЧ усилитель с переменным аттенюатором обеспечивал регулируемое усиление СВЧ сигнала в кольце. Полосы пропускания фильтра формируются на частотах, соответствующих резонансным частотам кольца. Амплитуда СВЧ сигнала, циркулирующего в кольце, резонансно возрастает на тех частотах, на которых полный набег фазы кратен  $2\pi$ . Если потери при распространении спиновых волн (СВ) в линии задержки превосходят усиление, то АКР представляет собой многополосный СВЧ фильтр.

Важным фактором формирования АЧХ АКР является конфигурация микрополосковых антенн. Антенны формируют собственную АЧХ, которая определяется геометрией микрополосковых линий и направлением токов, что позволяет выделять нужную область АЧХ, не сдвигая полосы пропускания. Поэтому вид результирующей АЧХ можно определять не только линией задержки, но и конструкцией антенн.

В качестве согласованного сигнала был выбран периодический амплитудно-модулированный прямоугольный сигнал. Это обусловлено максимальной идентичностью его спектральной плотности с АЧХ АКР. На основе проведенных экспериментов определено, что для ферритовой линии задержки толщиной 9,64 мкм, намагниченностью насыщения 1750 Э, и для расстояния между микрополосковыми антеннами 5 мм — несущая частота составляла 5,45 ГГц, а частота модуляции 12,32 МГц. Произведено моделирование фильтрации для данных параметров эксперимента в трех различных случаях: при наличии собственных девиаций сигнала по амплитуде 0,8-

1 и по фазе  $-0,9\pi$   $-0,9\pi$  ; при наличии собственных девиаций сигнала и наличии помех во всем частотном диапазоне; при уровне сигнала ниже уровня помех, что сравнимо с условием полного подавления эфира. Показано, что в случае собственных девиаций происходит очищение центральной частоты и захват всего центрального лепестка спектра сигнала. В случае наличия помех ниже уровня сигнала происходит захват и подавление паразитных гармоник спектра, что приводит к возникновению паразитной модуляции с амплитудой на уровне 0,1 от максимальной; в случае полного подавления сигнала на входе происходит выделение паразитных гармоник, близких по частоте к гармоникам полезного сигнала, что приводит к возникновению паразитных модуляционных всплесков. Необходимо подчеркнуть, что выделение только центрального лепестка спектральной плотности приводит к размытию фронтов и срезов сигнала, однако при этом сохраняется отношение модуляционных амплитуд исходного сигнала.

#### Список литературы

1. Баскаков С. И., Радиотехнические цепи и сигналы, М. Высшая школа, с.458, 2000;
2. Порохнюк А. А., Устинов А. Б., Ковшиков Н. Г., Исследование оптимальной фильтрации СВЧ-сигнала многополосным спин-волновым кольцевым резонатором, Письма в ЖТФ, Т.35 В. 18, с.17, 2009;
3. Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А., Калиникос Б.А., Теоретическое исследование резонансных свойств активного кольца на основе слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик, ЖТФ, Т. 82 В. 7, с. 98, 2012;
4. A.V. Ustinov G. Srinivasan, B.A. Kalinikos High-Q active ring microwave resonators based on ferrite-ferroelectric layered structures, Appl. Phys, Lett. 92 193512, 2008;

## Измерительная ячейка для исследования СВЧ-свойств дельта-легированных алмазных образцов

*Витко В. В.<sup>1</sup>, Кондрашов А. В.<sup>1</sup>, Никитин А. А.<sup>1</sup>, Белявский П. Ю.<sup>1</sup>,  
Устинов А. Б.<sup>1</sup>, Батлер Дж. Э.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

<sup>2</sup>ИПФ РАН

Эл. почта: vitaliy.vitko@gmail.com

В настоящее время актуальна проблема измерения СВЧ-характеристик структур, созданных на основе искусственно выращенных алмазных пленок с легированным дельта-слоем [1]. Для определения качества алмазной структуры необходимо знать концентрацию носителей заряда и их подвижность. Неразрушающее исследование этих параметров на СВЧ может выполняться резонансными и волноводными методами. Широкую рабочую полосу частот демонстрируют методы на основе линий передач, не имеющих частоты отсечки [2]. Наиболее часто в качестве линии передач используется коаксиальный волновод [3], аналогом которого в тонкопленочном исполнении является симметричная микрополосковая линия.

В настоящей работе представлены результаты моделирования измерительной ячейки на симметричной микрополосковой линии для исследования СВЧ-свойств дельта-легированных алмазных образцов.

Уровень потерь, вносимых образцом в волноведущий тракт, определяется мнимыми частями его комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей. В работах [4] и [5] описан метод расчета указанных проницаемостей по результатам измерения мощностей прошедшей и отраженной волн. Этим методом комплексную диэлектрическую проницаемость можно определить, зная S-параметры измеряемой структуры и ее геометрические размеры. Нахождение комплексных магнитных и диэлектрических проницаемостей проводится в соответствии с алгоритмом Николсона-Росса [5]. Комплексную диэлектрическую проницаемость можно легко пересчитать в проводимость дельта-легированного слоя.

В результате проведенной работы было выявлено, что измерительная ячейка для исследования характеристик экспериментальных алмазных образцов, содержащих дельта-слой, наиболее эффективно может быть реализована с помощью симметричной полосковой линии. Симметричная полосковая линия состоит из тонкого металлического проводника прямоугольной формы – полоска, находящегося в диэлектрической среде между двумя заземленными металлическими пластинами. Полосковая линия обычно заполняется однородным диэлектриком, но возможно и частичное диэлектрическое заполнение разными диэлектриками. Низшей модой в такой линии является квази ТЕМ-волна, которая характеризуется отсутствием частот отсечки. Другой особенностью такого волновода является интенсивное проникновение поля электромагнитной волны в окружающий полосок диэлектрик.

Численное моделирование S-параметров такой структуры показало возможность измерения свойств алмазных слоев. Моделирование проводилось при следующих условиях: металлические экраны параллельны плоскости алмазного образца и расположены на равном расстоянии от полоска; расстояние между металлическим экраном и полоском равнялось толщине исследуемого образца алмаза. В ходе моделирования рассчитывались передаточные характеристики полосковой линии при изменении концентрации носителей заряда в дельта-легированном слое алмаза.

В заключение отметим, что предлагаемый метод позволяет проводить измерения СВЧ-параметров образцов дельта-легированного алмаза в широком диапазоне частот (практически в интервале 0.1...100 ГГц). В ходе представленной работы проведено моделирование измерительной ячейки. Установлено, что конструкция измерительной ячейки, построенной на симметричной полосковой линии передачи, не ограничивает геометрические размеры образца и обладает высокой чувствительностью к изменению его СВЧ-параметров.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке в рамках гранта Правительства Российской Федерации по Постановлению № 220 (Договор № 14.В25.31.0021 от 26 июня 2013 г).

#### Список литературы

1. Gurbuz Y. et al., Diamond semiconductor technology for RF de-vice applications, Solid-state electronics, Vol. 49, № 7, P. 1055-1070, 2005;
2. Blackham D.V, Pollard R.D., An Improved Technique for Per-mittivity Measurements Using a Coaxial Probe, IEEE Trans. On Instr. Meas., vol. 46, № 5, P. 1093-1099, 1997;
3. Baker-Jarvis J., Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements, Colorado: National institute of standards and technology, 151 p., 1990;

4. Domich P.D., Baker-Jarvis J., Geyer R.G., Optimization techniques for permittivity and permeability determination, J. res. nation. inst. stand. technol, Vol. 96, № 5, P. 565–575, 1991;
5. Nicolson A.M., Ross G.F., Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques, IEEE Trans. in-strum. and meas., Vol. IM-19, №. 4, P. 377–382, 1970;

## **Исследование планарных сегнетоэлектрических конденсаторов на ферритовых подложках для СВЧ фильтра с двойным управлением**

*Витко В. В.<sup>1</sup>, Белявский П. Ю.<sup>1</sup>, Мыльников И. Л.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: vitaliy.vitko@gmail.com

Данная работа является продолжением научно-исследовательской работы по разработке СВЧ фильтра на феррит-сегнетоэлектрической структуре с двойным электронным управлением для телекоммуникационных систем. Ранее в работе [1] были проведены расчеты элементов СВЧ полосно-пропускающего фильтра на связанных четвертьволновых резонаторах. Была предложена компактная конструкция полосно-пропускающего фильтра и разработана его топология на связанных четвертьволновых резонаторах, нагруженных планарными сегнетоэлектрическими конденсаторами, сформированными на ферритовой керамической подложке.

Целью настоящей работы является создание и исследование свойств сегнетоэлектрических пленок на ферритовых подложках с необходимыми для выполнения дальнейших работ характеристиками.

В настоящее время существует несколько способов нанесения пленок сегнетоэлектрика: золь-гель технология, катодное и магнетронное напыления. Наиболее перспективным, с нашей точки зрения, методом получения тонких сегнетоэлектрических пленок является реактивное высокочастотное магнетронное напыление. Данный метод позволяет получать сегнетоэлектрические пленки титанатов бария стронция с толщинами, варьирующимися от десятков нанометров до нескольких микрометров на различных диэлектрических и ферритовых подложках. Одним из важных преимуществ метода высокочастотного магнетронного напыления является высокая скорость роста пленок при сохранении качества пленок. В работе [2] представлена математическая модель, позволяющая описать процессы высокочастотного магнетронного распыления мишени и диффузионного переноса атомов распыленного вещества от катода-мишени до подложки, а также скорость реактивного высокочастотного напыления пленок титанатов бария стронция. На основании модели был проведен расчет и определены технологические параметры, позволяющие получить сегнетоэлектрические пленки с заданными характеристиками.

В качестве ферритовой подложки использовались различные образцы ферритовой керамики (никель-цинковые шпинели, иттрий-гадолиниевые и иттрий-гадолиний-алюминиевые гранаты) для получения конденсаторных структур на основе пленок титанатов бария стронция. На каждой из подложек был получен ряд сегнетоэлектрических пленок различной толщины и различного состава ( $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ ). На поверхности сегнетоэлектрических пленок были сформированы металлические

контакты для создания планарных конденсаторов. Данные структуры исследовались на специально разработанном измерительном стенде на основе LCR-метра Agilent E4980A. Измерения проводились в широком диапазоне температур (от 77 до 400 К) и широком диапазоне смещающих напряжений (от -200 до 200 В). В результате измерений были получены зависимости ёмкостей планарных конденсаторов от температуры и семейства вольт-фарадных характеристик, соответственно.

По результатам проведенных измерений можно сделать вывод о том, что метод высокочастотного магнетронного распыления позволяет создавать качественные сегнетоэлектрические пленки на поверхности ферритовых керамических подложек. Наиболее подходящим ферритовым материалом является феррит марки ЗСЧ20 (производство ОАО «Завод «Магнетон») с намагниченностью насыщения 1780 Гс, номинальной шириной линии ферромагнитного резонанса 45 Э. Сочетание такой подложки с сегнетоэлектрической пленкой  $Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$  толщиной порядка 1 мкм позволяет получить диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика порядка 800 с управляемостью более 2 (при управляющем напряжении ~200 В). Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках гранта УМНИК.

#### Список литературы

1. Белявский П.Ю., Семенов А.А., Витько В.В., Никитин А.А., Мыльников И.Л., Ефимов С.В., Кожусь Н.В., Полосно-пропускающий СВЧ фильтр с двойной электрической и магнитной перестройкой, тезисы доклада всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», С.-Петербург, с. 466-471, 2014;
2. Белявский П.Ю., Карманенко С.Ф., Никитин А.А., Семенов А.А., Тумаркин А.В., Процессы микро- и нанотехнологий: Методические указания к лабораторным работам, СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 67 с, 2013;

## ПРИМЕСИ И ДЕФЕКТЫ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

---

### Синтез и исследование монокристаллов $\text{GaVO}_3:\text{Ni}$

Скуткявичюте К. Р.<sup>1</sup>, Могиленец Ю. А.<sup>1</sup>, Селезнева К. А.<sup>1</sup>, Стругацкий М. Б.<sup>1</sup>, Ягупов С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КФУ им. В.И.Вернадского

Эл. почта: vessna13@mail.ru

Известно, что монокристаллы  $\text{FeVO}_3:\text{Ni}$  обладают эффектами фотомагнитной памяти и динамической неустойчивости доменной структуры, что обусловлено наличием в них малого количества ионов никеля [1]. Однако, механизм формирования этих эффектов, несмотря на большие усилия исследователей, до сих пор неясен. Одним из экспериментальных методов определения роли ионов Ni может быть электронный парамагнитный резонанс. Но в этом случае необходимо заменить магнитную матрицу, образованную ионами железа, диамагнитной. Кристалл  $\text{GaVO}_3:\text{Ni}$  может быть использован в качестве такого модельного объекта.

Методом раствор-расплавной кристаллизации [2] получены монокристаллы  $\text{GaVO}_3:\text{Ni}$  размерами от 0,5 до 1,5 мм и с концентрацией никеля от 0,04 до 0,12 %, определенной методом рентгенофлуоресцентного анализа. Этот диапазон соответствует концентрациям ионов никеля, при которых наблюдаются упомянутые эффекты в кристаллах  $\text{FeVO}_3:\text{Ni}$ .

#### Список литературы

1. Федоров Ю.М., Лексиков А.А., Аксенов А.Е., Светоиндуцированная динамическая неустойчивость доменной структуры  $\text{FeVO}_3:\text{Ni}$ , Письма в ЖЭТФ, т.37, вып.3, с.134-136, 1983;
2. Стругацкий М.Б., Ягупов С.В., Постывей Н.С., Селезнева К.А., Милюкова Е.Т., Ягупов В.С., Монокристаллы  $\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}\text{VO}_3$  для исследования в физике твердого тела, Ученые записки ТНУ, Серия «Физико-математические науки», т. 24 (63), No. 2, с.169-174, 2011;

## Влияние замещения железа на элементы IV группы (Ge, Sn, Pb) на структуру, электрические и магнитные свойства сверхпроводящих халькогенидов железа

Русаков В. А.<sup>1</sup>, М.П. Волков<sup>1</sup>, Б.А.-Т. Мелех<sup>1</sup>, Н.Ф. Картенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: sevarus@mail.ru

Сверхпроводящие халькогениды железа  $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x)_y$  — перспективны для использования в качестве материала для сверхпроводящих проводов и кабелей гелиевого уровня температур. Достоинствами этих материалов, по сравнению с традиционными низкотемпературными сверхпроводниками типа  $\text{NbTi}$  и  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  являются чрезвычайно высокие критические магнитные поля, относительная простота получения, простейшая структура среди железосодержащих сверхпроводников. Сверхпроводящие халькогениды железа имеют невысокие критические температуры (15К для оптимального состава), но существенное повышение критической температуры под давлением и в тонких пленках указывают на возможность оптимизации сверхпроводящих свойств этого материала.

В настоящей работе проведено систематическое исследование влияния замещения части атомов железа в системе  $\text{Fe}(\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.8})_{0.82}$  на элементы IV группы (Ge, Sn, Pb) на ее структуру, фазовый состав, электрические и магнитные свойства. В связи с небольшой термодинамической стабильностью монотеллурида и моноселенида железа по сравнению с халькогенидными соединениями Ge, Sn, Pb предполагалось образование двухфазных систем и слабое влияние замещения на структуру и свойства исходного материала. Нами показано, что в полученной двухфазной системе критические температуры сверхпроводимости практически такие же (или немного выше) как в исходном материале, а критические магнитные поля заметно выше. Кроме того, можно ожидать, что микроскопические выпадения второй фазы (халькогениды Ge, Sn, Pb), могут быть эффективными центрами пиннинга магнитного потока.

Образцы  $\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x(\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.8})_{0.82}$ , где  $\text{M} = \text{Ge}, \text{Sn}, \text{Pb}$  были получены через расплав с использованием технологических режимов, предложенных в [1]. Для замещения выбран состав  $\text{Fe}(\text{Se}_{0.2}\text{Te}_{0.8})_{0.82}$ , атомы железа в этом составе замещались на 5 или 10 ат.% другого элемента. Полученные образцы были характеризованы рентгеновским анализом и измерениями их электрических и магнитных свойств.

Было показано, что замещение на элементы IV группы приводит к похожим результатам, а именно: параметры структуры основной тетрагональной фазы меняются незначительно, практически вся введенная примесь выпадает в виде отдельной халькогенидной фазы, критические температуры сверхпроводимости практически такие же, как в исходном материале, критические магнитные поля заметно выше, а ширина перехода заметно увеличивается. При замещении на Ge и Pb критическая температура  $T_c$  выше, чем  $T_c$  исходного материала.

При замещении части атомов Fe на атомы Ge полученные образцы имеют повышенную температуру перехода ( $T_c = 13 \text{ K}$ ), при этом почти весь введенный Ge выпадает в виде соединения  $\text{GeSeTe}$ , которое имеет высокую стеклообразующую способность. В экспериментах с быстрым охлаждением расплава было обнаружено, что фаза  $\text{GeSeTe}$  фиксируется в образцах как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. При большом содержании Ge в исходном составе был получен композитный материал, в котором кристаллическая сверхпроводящая фаза состава  $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$

погружена в матрицу, состоящую в основном из аморфной фазы состава GeSeTe. Сверхпроводимость фазы Fe(Se,Te) в этом композитном материале установлена при измерении зависимости магнитного момента от температуры.

Данная работа была поддержана грантом УМНИК.

Список литературы

1. М.П. Волков, Б.А.-Т. Мелех и др. Письма ЖТФ, 36, №6, с.8-14, (2010);

## **Исследование вакансионных спиновых центров в ромбическом карбиде кремния методами ДЭЯР и ОДМР**

*Анисимов А. Н., Баранов П. Г.<sup>1</sup>, Бабунц Р. А.<sup>1</sup>, Бадалян А. Г.<sup>1</sup>, Ильин И. В.<sup>1</sup>, Романов Н. Г.<sup>1</sup>, Музафарова М. В.<sup>1</sup>, Солтамов В. А.<sup>1</sup>, Толмачев Д. О.<sup>1</sup>, Явкин Б. В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>КФУ

Эл. почта: aan0100@gmail.com

Вакансионные спиновые центры в ромбическом карбиде кремния - это аксиально-ориентированные центры, обладающие спином  $S = 3/2$ . Находятся центры в ромбической кристаллической матрице и обладают уникальной характеристикой — выстраивание спинов при температурах до 250°C.

Исследуемые нами монокристаллы SiC-15R были выращены методом физического переноса из газовой фазы. Концентрация нескомпенсированного азота составляла порядка  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Вакансии вводились путем облучения кристалла электронами с энергией 1.4 МэВ с дозой  $10^{18} \text{ см}^{-2}$ .

В работе были измерены спектры электронно парамагнитного резонанса (ЭПР) X-диапазона ( $\approx 9.3 \text{ ГГц}$ ), они записывались при различных температурах (до 250°C) и непрерывном лазерном облучении с  $\lambda = 785 \text{ нм}$ . Магнитное поле было ориентировано параллельно с-оси кристалла ( $B \parallel c$ ). Для одного из двух переходов в каждой паре линий наблюдается обратная фаза сигнала. Такое поведение в режиме излучения/поглощения СВЧ-мощности может быть объяснено оптически индуцированным выстраиванием спинов спиновых подуровней центров.

Нами были проведены измерения оптических свойств центров, для получения резонансного оптического контроля их спиновых состояний. Для этих исследований был измерен спектр низкотемпературной фотолюминесценции.

В работе проведены записи спектров оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), которые представляют собой изменение интенсивности фотолюминесценции DPL / PL в зависимости от приложенного радиочастотного поля. В этих спектрах наблюдается резонанс при  $\nu = 13,1 \text{ МГц}$ ,  $\nu = 50.6 \text{ МГц}$  и  $\nu = 138 \text{ МГц}$ , что хорошо согласуется с нулевыми расщеплениями центров полученных из наших измерений ЭПР. Используя спин-гамильтониан  $H = g\mu_B B_0 S + D((S_z)^2 - 1/3 S(S+1))$  мы вычислили, что основные состояния исследуемых центров имеют спин  $S = 3/2$ . Расчетные частотные зависимости ОДМР сигналов в различных магнитных полях ( $B \parallel c$ ) хорошо совпадают с наблюдаемыми спектрами.

Были записаны спектры двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР) путем мониторинга интенсивности электронного спинового эха (ЭСЭ), следующего



после трех микроволновых  $\pi/2$ -импульсов, как функция частоты импульса, приложенного между вторым и третьим микроволновым импульсом. В спектрах ДЭЯР мы обнаружили сверхтонкое взаимодействие (СТВ) с  $^{29}\text{Si}$  с отрицательной спиновой плотностью такую же анизотропную зависимость как для  $^{13}\text{C}$ , расположенного в ближайшем окружении, и наблюдаемую в спектрах ЭСЭ. Константы СТВ с отрицательной спиновой плотностью относительно велики и примерно соответствуют  $A_{\parallel} \approx 2.2$  МГц ( $\gg 0,8$  Гц)  $A_{\perp} = 1,3$  МГц ( $\gg 0,5$  Гц). Полученные нами константы хорошо описывают анизотропию ширины линии наблюдаемой в ЭСЭ.

В результате работы по анализу и регистрации спектров было показано, что семейство вакансионных центров, связанных с кремнием, представляет собой отрицательно заряженную вакансию кремния в парамагнитном состоянии со спином  $S = 3/2$ ,  $V_{\text{Si}}^{-}$ , возмущенную нейтральной углеродной вакансией в непарамагнитном состоянии,  $V_{\text{C}}^0$ , не имеющей ковалентной связи с кремниевой вакансией и расположенной рядом с кремниевой вакансией вдоль оси с кристалла.

#### Список литературы

1. Солтамов В.А., Явкин Б.В., и др., Optically addressable silicon vacancy-related spin centers in rhombic silicon carbide with high breakdown characteristics and ENDOR evidence of their structure, PRL. Solt. arch. arXiv:1506.05625;
2. Солтамов В.А., Явкин Б.В., и др., supplemental Material for Optically addressable silicon vacancy-related spin centers in rhombic silicon carbide with high breakdown characteristics and ENDOR evidence of their structure, Physics — Materials Science 1506.05625v1;

## Особенности генерации второй гармоники на границах наноразмерных микрокристаллов дихалькогенидов переходных металлов

*Шестакова А. П.<sup>1</sup>, Лавров С. Д.<sup>1</sup>, Мишина Е. Д.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>МИРЭА

Эл. почта: nastik\_shestakova@mail.ru

Одной из основных задач микро- и нанoeлектроники является поиск материалов для быстродействующих устройств на их основе, а также для миниатюризации интегральных схем. Открытый недавно графен [1] демонстрирует высокую проводимость, механическую прочность, подвижность носителей. Однако у него отсутствует запрещенная зона, что ограничивает его применения.

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) рассматриваются совместно с графеном как альтернативные материалы традиционной кремниевой электронике. Наибольшее применение находят монослои дихалькогенидов, но, несмотря на их уникальность, перспективными для электроники оказываются также многослойные структуры [2]. На основе ДПМ возможно создание транзисторов, диодов, фотоэлектрических устройства и биологических сенсоров.

Нами были экспериментально исследованы многослойные структуры ДПМ, полученные двумя способами с различным количеством слоев. Выявлены особенности генерации второй оптической гармоники (ГВГ) на краях микрокристаллов ДПМ, заключающиеся в усилении и ослаблении сигнала. Возникновение эффектов ГВГ на

границах связано с интеркаляцией молекул  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$  и атомов Na, приводящей к повышению их концентрации на границах [3]. Такая интеркаляция веществ происходит за счет особенностей методов получения слоистых соединений. Наличие закрепленных на границах молекул подтверждается данными фотолюминесцентной спектроскопии для  $\text{WS}_2$  и  $\text{MoS}_2$ .

Усиление и ослабление ГВГ на краях также может быть связано с электроиндуцированной второй гармоникой, возникающей в полупроводниках при искривлении зон на поверхности или границе раздела.

Работа выполнена при поддержке РФФ, соглашение № 14-12-01080.

#### Список литературы

1. A.K. Geim, K.S. Novoselov, The rise of graphene, *Nature Materials*, 6, 183-191, 2007;
2. Huo N., Yang S., Wei Z., Li S.-S., Xia J.-B., Li J., Photoresponsive and Gas Sensing Field-Effect Transistors based on Multilayer  $\text{WS}_2$  Nanoflakes, *Scientific Reports*, 4, 5209, 2014;
3. Мишина Е.Д., Шерстюк Н.Э., Шестакова А.П., Лавров С.Д., Семин С.В., Сигов А.С., Митиоглу А., Ангел С., Кулюк Л., Краевые эффекты в генерации второй гармоники в наноразмерных слоях дихалькогенидов переходных металлов, *ФТП*, 49, 6, 810-816, 2015;

## **Пик поглощения ультразвука в $\text{ZnSe}:\text{Cr}$ в малых магнитных полях**

*Барышников К. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: barysh.1989@gmail.com

Теоретически исследуется наличие пика в зависимости поглощения ультразвука на ян-теллеровском центре  $\text{Cr}^{2+}$  в кубическом полупроводнике ZnSe от магнитного поля. В эксперименте [1] при низких температурах (1.4 К, 2 К и 4 К) было обнаружено сначала резкое увеличение поглощения ультразвука с магнитным полем до максимального значения в поле 0.2 Тл, а затем более медленное его падение вплоть до 2 Тл. При тех же температурах в магнитных полях от 2 Тл до 12 Тл в эксперименте наблюдался плавный и относительно небольшой рост поглощения. Рассчитан энергетический спектр и собственные волновые функции основного состояния примесного центра  $\text{Cr}^{2+}$  в окружении атомов Se, с учетом сильного эффекта Яна-Теллера и спин-орбитального взаимодействия электронов на d-оболочке иона  $\text{Cr}^{2+}$ . Показано отсутствие резонансного поглощения ультразвука в системе в условиях эксперимента. Предложена феноменологическая модель, согласно которой существуют две подсистемы, участвующие в поглощении ультразвука, с одинаковыми временами релаксации в нулевом магнитном поле и с разными временами релаксации в полях, сравнимых с 0.2 Тл. Данная модель приводит к наличию пика релаксационного поглощения ультразвука на центре в малых магнитных полях ( $< 2$  Тл). Приводятся микроскопические расчеты времен релаксации для расщепленных магнитным полем уровней центра и производится сравнение их с экспериментом.

## Список литературы

1. V.V. Gudkov et al., Moscow International Symposium on Magnetism, Book of Abstracts, 22PO-J-11, 177 (2011);

## Масс-спектрометрическое исследование веществ при малых энергиях ионизирующих электронов

Романов П. А.<sup>1</sup>, Федичкин И. Л.<sup>1</sup>, Попов Е. О.<sup>1,2</sup>, Филиппов С. В.<sup>1,2</sup>, Колосько А. Г.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбПУ

<sup>3</sup>СПбГУТ

Эл. почта: pashtinho@mail.ru

В современной микро- и нанoeлектронной промышленности анализу примесей в конструкционных материалах микросхем уделяется серьёзное внимание. Особое требования предъявляются к элементной базе изделий, производимых для космических аппаратов [1]. В изготавливаемых интегральных схемах необходимо контролировать в подкорпусном пространстве содержание не только влаги, но и всех микропримесей, содержащихся в конструкционных элементах, а также проводить идентификацию и определение присутствующих органических веществ, химически активных радикалов и продуктов газовой выделения. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе разработан масс-спектрометрический комплекс для решения прикладных задач: определение состава газов и паров в подкорпусном пространстве устройств физической электроники, термоанализ конструкционных материалов до температуры 800°C, анализ полимерных материалов клеев, эпоксидных смол и т.п. до 400°C, ступенчатый газовый анализ содержания подкорпусного пространства микросхем до 250°C, поиск и идентификация неизвестных веществ и соединений, находящихся в деталях исследуемых устройств. Основной отличительной особенностью измерительного комплекса является применение нового ионизационного источника, позволяющего в пределах одного измерительного цикла осуществлять ионизацию с различными энергиями в диапазоне 10-150 эВ. Благодаря этому стало возможным определение как первичного состава высокомолекулярного соединения с низкой энергией диссоциации, так и детектирование ионов, экранированных осколочными пиками исследуемых соединений [2]. В результате проведенных исследований в режимах с малыми энергиями ионизирующих электронов (15-30 эВ) было проведено надежное детектирование гидроксильных групп ОН (17 а.е.м.) и изотопов хлора (35 и 37 а.е.м.). Известно, что гидроксильная группа ОН имеет высокую химическую активность, и представляется важным контролировать ее концентрацию во время испытаний микросхем на допустимое содержание влаги. При использовании низкоэнергетичных ионизирующих электронов удалось снизить интенсивность фонового «осколка» воды с а.е.м. 17 в 20 раз. Проведенные нами исследования состава парогазовой фазы, находящейся под корпусами различных ИС, выявили присутствие в ней гидроксильной группы ОН, содержание которой в различных образцах микросхем было от 0,1% до 0,35% независимо от количества присутствующих молекул Н<sub>2</sub>О. Было показано, что источником их появления являются различные клеевые и полимерные структуры, используемые при фиксации кристалла, корпусировании и т.п. Путем снижения энергии электронов было

произведено устранение мешающих пиков органических веществ для обнаружения в составе парогазовой фазы изотопов хлора. В работе было показано, что при малых энергиях ионизирующих электронов, близких к потенциалам ионизации исследуемых веществ, возможности масс-рефлектрона значительно расширяются в области детектирования и идентификации многокомпонентных веществ.

Список литературы

1. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. Москва: Техносфера, 696 с., 2015;
2. Каратаев В.И., Аруев Н.Н. Ионный источник с магнитным полем для время-пролетного масс-спектрометра. Письма в ЖТФ, том 37, вып. 12, с. 67-72, 2011;

## Фоторазложение воды до водорода с использованием тиоксантеновых красителей

Глухова Я.С.<sup>1</sup>, Поняев А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГТИ(ТУ)

Эл. почта: jancha@mail.ru

Фоторазложение воды является одним из привлекательных путей аккумуляции солнечной энергии и с использованием красителей-сенситизаторов-фотокатализаторов - простейшей моделью восстановительной ветви природного фотосинтеза. Известно большое количество каталитических реакций, пригодных для использования в системах аккумуляции солнечной энергии. Конструирование искусственных фотосинтетических систем ведется в направлении разработки путей фотокаталитического разложения воды на кислород (полная аналогия с природным фотосинтезом) и водород. Водород интересен как наиболее экологически чистое, наиболее энерговыделяемое топливо и как ценное химическое сырье. Важным аргументом в пользу именно такого направления использования солнечной энергии является возможность сдерживания катастрофических последствий парникового эффекта, обусловленного антропогенными выбросами диоксида углерода и пыли в атмосферу при сжигании органических топлив. Широкое использование солнечной энергетики позволит сдерживать негативное изменение климата в планетарном масштабе. Известно несколько фотокаталитических систем разложения воды с использованием органических красителей. В таких системах к красителю предъявляются значительные требования. Выбор таких красителей крайне ограничен, из-за жесткости предъявляемых к ним требований, как по линии фотофизических параметров (заселенность триплетного состояния), так и по линии фотохимических (способность к фотовосстановлению и отсутствие побочных необратимых фотохимических реакций), фотокаталитических (способность эффективно взаимодействовать с катализатором), электрохимических (достаточность потенциала). Кроме того, они должны обладать спектром поглощения в максимальной степени, использующим излучение Солнца, быть светостойкими в системе с восстановителем, катализатором и в водородной атмосфере. В фотокаталитических системах разложения воды до водорода впервые исследован ряд принципиально важных новых тиоксантеновых красителей. При их использовании, благодаря большому времени жизни анион-радикала можно отказаться от переносчика электрона на катализатор.

Эффективность сенситизации ксантеновыми красителями реакции фоторазложения воды определяется, главным образом, эффективностью образования триплетов и радикалов. Фотофизические параметры ксантеновых красителей очень чув-

ствительны к природе заместителей и групп, входящих в состав их молекул. Показано, что замена атома кислорода в ксантоновом фрагменте на атом серы увеличивает квантовый выход триплетов и фотоводорода. Исследовано влияние компонент фотокаталитической системы на спектральные, люминесцентные, кинетические характеристики промежуточных продуктов и на фотокаталитическую активность. На выход водорода влияет присутствие внутренних триплетных сенсibilизаторов, тяжелых атомов, поверхностно-активных веществ, некоторых редкоземельных ионов, органических растворителей. Совокупность полученных данных позволила построить двухкомпонентную фотокаталитическую систему на основе тетрабромтиофлуоресцеина, который эффективно работал сотни часов с начальной квантовой эффективностью 15%.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание, соглашение 14.574.21.0002 идентификационный номер RFMEFI57414X0002) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-01425).

## **Физико-технические аспекты эффективного применения сегнетоэлектриков для увеличения удельной мощности и удельной энергии устройств альтернативной энергетики**

*Зубцов В. И.<sup>1</sup>, Зувцова Е. В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ШГУ

<sup>2</sup>МВГК ГА

Эл. почта: subcv@ Rambler.ru

Использование сегнетоэлектриков для получения энергии в настоящее время, к сожалению, сталкивается с определенными трудностями, которые в основном заключаются в получении значительных токов на выходе устройств, высокой точности обработки поверхностей элементов устройств, затруднительной работе при высоких механических нагрузках и температурах [1].

Теоретические и экспериментальные исследования [2-5] показывают, что устройства на основе сегнетоэлектриков, в качестве которых использована искусственно полученная сегнетопъезокерамика, могут быть применены как более эффективная альтернатива устройствам и технологиям, используемым в настоящее время для электротяги зарубежными фирмами.

Сейчас во всем мире эффективно используется легкий электротранспорт с приводом от электродвигателя, который питается аккумуляторными батареями. Аккумуляторные батареи могут обеспечивать высокую удельную мощность, но обладают низкой удельной энергией. В результате дальность проезда на одной зарядке батарей ограничена.

Для эффективного использования сегнетоэлектриков требуется разработка системы, позволяющей, по сравнению с используемыми в настоящее время устройствами электротяги, расходовать меньше энергии от аккумуляторных батарей. Кроме того, нужно увеличить эффективность преобразования механической энергии в электрическую, ориентировочно на порядок, за счет электрических характеристик сегнетопъезокерамики и физико-технических решений, т. е. новых технологий. По данным публикаций ОАО «НИИ «ЭЛПА» (г. Зеленоград) хорошо сконструированная система

на основе сегнетоэлектриков может преобразовывать до 90% поступившей энергии в полезную.

Предлагается экологически чистая энергоустановка на основе сегнетопьезоактивной керамики, работа которой основана на своеобразном электрохимическом генераторе. Кратко принцип работы генератора состоит в освобождении «замороженной» энергии химических реакций твёрдого раствора окислителя и вещества сегнетопьезокерамики. Высокая эффективность преобразования в установке механической энергии в электрическую достигается также модификацией сегнетопьезоактивной керамики и электрической схемы, в которой имеются, кроме электрохимического генератора, источник питания (для электротранспорта — это аккумуляторная батарея), устройство для получения механической энергии и электромеханический преобразователь. Потребление от батареи 1 Дж энергии, при использовании механической энергии, даёт возможность получить на выходе энергоустановки 3-5 Дж электрической энергии. Получение используемой механической энергии происходит практически без затрат за счет устройства очень простой конструкции. Предварительные расчёты показывают, что, например, электровелосипед с аккумулятором 10 А.ч, электродвигателем 220 Вт и такой энергоустановкой способен проехать до 100 км, вместо 30 с традиционной технологией.

Предлагаемая установка может быть использована также, например, и для энергоснабжения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, загородных помещений и др. Кроме того, по сравнению с устройствами солнечной и ветроэнергетики она имеет преимущества: независимость от времени суток и климатических условий.

#### Список литературы

1. Зубцов В.И., Бозылев В.В., Зубцова Е.В. Проектирование и исследовательские испытания пьезопреобразователей контроля напряженного состояния внутри деформируемых сред// Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2011 — № 2. – С. 45-50;
2. Зубцов В.И. Физические основы работы пьезорезонансных аналоговых преобразователей и расширение диапазона линейности измерения // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2000. — № 2. — С. 57-61.
3. Зубцов В.И., Зубцова Е.В. Пьезопреобразователи для контроля механических напряжений внутри деформируемых сред// Контроль. Диагностика. – 2012. — № 6. — С. 51-57;
4. Трофимов. А. И. Измерительные преобразователи механических величин. Томск, «ТПИ», 1979. — 95 с.;
5. Zubtsov V.I. Control of the physical properties of materials using piezoelectrics - Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. -262 p.;

## Исследование электрокалорического эффекта в керамических сегнетоэлектриках

Белявский П. Ю.<sup>1,2</sup>, Еськов А. В.<sup>2</sup>, Анохин А. С.<sup>2</sup>, Мыльников И. Л.<sup>1,2</sup>, Пахомов О. В.<sup>2</sup>, Семенов А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

<sup>2</sup> ИТМО

Эл. почта: pbeliavskiy@gmail.com

Одной из важнейших проблем современной электроники является проблема эффективного отвода тепла от электронных компонентов. Компоненты микроэлектроники, в особенности функциональной микроэлектроники, при работе нагреваются, при этом их характеристики могут достаточно существенно изменяться, в результате характеристики приборов и устройств могут заметно отклоняться от заданных, а сами приборы и устройства могут выходить из строя. Кроме того, нагрев компонентов ограничивает некоторые характеристики, такие как рабочее напряжение и рабочая частота. Вследствие этого одной из актуальных проблем современной электроники является проблема охлаждения и термостабилизации компонентов.

Данная проблема на практике решается применением различных методов охлаждения. Пассивный метод охлаждения достаточно экономичен, однако малоэффективен и не предполагает возможности управления изменением температуры компонента, так же он плохо сочетается с тенденциями к миниатюризации компонентов электроники. Активный метод основан на использовании различных охлаждающих устройств, потребляющих энергию внешнего источника и позволяющих управлять процессом отвода тепла от компонента.

Существующие системы активного охлаждения можно разделить на 3 вида:

- 1) Компрессионные охладители.
- 2) Системы твердотельного охлаждения, основанные на термоэлектрических эффектах в металлах и полупроводниках.
- 3) Системы твердотельного охлаждения, основанные на калорических эффектах в нелинейных диэлектриках.

Наиболее перспективным с точки зрения микроэлектроники методом охлаждения является охлаждение на основе электрокалорического эффекта в сегнетоэлектриках [1], это связано с простотой создания в сегнетоэлектриках электрических полей с высокой напряженностью. Такой метод обеспечивает высокий теоретический КПД, так же он позволяет изготавливать миниатюрные охлаждающие системы, основанные на применении многослойных конденсаторов (MLC).

Основной задачей данного исследования являлось измерение величины адиабатического изменения температуры вследствие электрокалорического эффекта в керамических конденсаторах на основе твердых растворов титаната бария-стронция (BST) и магнониобата свинца–титаната свинца (PMN-PT). Выбор BST для исследования обусловлен широким его распространением в микроэлектронике СВЧ, высокой диэлектрической проницаемостью и вариативностью свойств в зависимости от выбранного состава твердого раствора. Выбор PMN-PT для исследования обусловлен высокой величиной адиабатного изменения температуры и более размытым по температуре, в отличие от BST, фазовым переходом.

Одной из особенностей проведенного исследования является проведение прямых измерений температуры как в статическом, так и в динамическом режиме, то



есть при постоянной и переменной внешней температуре. Измерения проводились в автоматическом режиме с помощью специально созданного измерительного стенда, полученные температурные диаграммы обрабатывались автоматически с помощью созданного в математическом пакете алгоритма.

Результатами исследований являются зависимости адиабатического изменения температуры вследствие электрокалорического эффекта от температуры образца  $\Delta T(T)$ , полученные при разных напряженностях электрического поля. Величина обнаруженного эффекта составляет более 0.2K при напряженности электрического поля 20 кВ/см вблизи фазовых переходов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-6229.2015.8.

#### Список литературы

1. Karmanenko S.F., Semenov A.A., Dedyk A.I., Eskov A.V., Ivanov A.S., Beliaevskiy P.Y., et al, *Electrocaloric Materials: New Generation of Coolers*; Chapter: New Approaches to Electrocaloric-Based Multilayer Cooling, Springer Berlin Heidelberg, 253 p., 2014;

## Фотоэлектрический и фотомагнитный отклик пленок ИТО

Плясов С. А.<sup>1</sup>, Мешковский И. К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИТМО

Эл. почта: s.plyastsov@gmail.com

При исследовании пленок твердых растворов оксида индия и оксида олова (ИТО) был обнаружен эффект появления электрического напряжения при воздействии мощным ультрафиолетовым и инфракрасным лазерным излучением [1]. Упомянутый эффект был использован для построения измерителей энергии импульса эксимерного лазера [1] и полностью оптического модулятора [2].

Целью настоящей работы явилось исследование фотоэлектрического и фотомагнитного откликов пленок ИТО на воздействие мощного импульса ультрафиолетового излучения от лазерного источника. Наши исследования показали, что величина фотоэлектрического эффекта примерно на порядок больше, чем в работе [1] при облучении от Nd/YAG лазера, что свидетельствует об особенностях физических механизмов, обуславливающих электрический отклик в наших экспериментах.

Впервые нами был обнаружен и исследован фотомагнитный эффект пленок ИТО.

Пленки ИТО ( $\text{In}_2\text{O}_3 + 10\%\text{SnO}_2$ ) были нанесены методом магнетронного распыления на подложки из силикатного стекла. Толщина пленок составила около 350 нм.

Для проведения исследований были изготовлены образцы с различными контактами. Для измерений использовались прижимные алюминиевые контакты, вакуумно напыленные контакты из меди и лантана. Контакты из меди и лантана были нанесены на ИТО с помощью электронно-лучевого напыления.

В качестве источника излучения был использован KrF лазер Coherent COMPix 102 F. Длительность импульса лазера составляла 22 нс. Энергия изменялась в диапазоне от 10 мДж до 148 мДж. Измерение энергии производилось с помощью датчика

фирмы Coherent J-50MUV 248. Измерение напряжения на образце производилось с помощью осциллографа Tektronix 3300. Внутренне сопротивление щупа было равно 1 МОhm. Форма импульса измерялась скоростным фотоприемником фирмы «Alfalas».

Магнитное поле измерялось с помощью аналогового датчика Холла фирмы HoneyWell G420 и магнито-резистивного мостового датчика HoneyWell HMC1512.

Фотоэлектрический отклик при воздействии лазерного излучения видимого диапазона наблюдался ранее в различных аморфных тонких пленках: CdTe [3-4], германия [5], платины и палладия [6], молибдена и вольфрама [7]. В работе [1] был обнаружен фотоэлектрический эффект при воздействии на пленки ИТО УФ лазерного излучения. Для описания эффекта возникновения разности потенциалов при воздействии лазерного излучения был предложен ряд моделей, объясняющих наблюдаемое явление с помощью множества p-n переходов обусловленных неоднородностями пленки [2], нормальным и аномальным эффектом Дембера [4], а также, в случае металлических пленок, возникновением микроскопических термопар на границах зерен и эффекта Зеебека [6-7].

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты, по нашему мнению, обусловлены возникновением циркуляции возбужденных носителей, что теоретически было предсказано в работе Браже [8] и напоминает образование ячеек Бенара при проявлении синергетических взаимодействий частиц [8].

Принимая во внимание, что пленки ИТО, полученные магнетронным распылением, обладают поликристалличностью [10], а также учитывая данные о зонной структуре монокристаллов  $\text{In}_2\text{O}_3$ , можно предположить, что мощное ультрафиолетовое лазерное облучение обеспечивает заселение синглетных и триплетных уровней в двух долинах пленки ИТО.

Высокая концентрация фотонов лазерного излучения создает высокую концентрацию носителей в обеих долинах благодаря большим значениям электрического поля световой волны ( $\sim 10^{11}$  В/см) и высокой энергии фотонов (5 эВ).

После прекращения воздействия лазерного излучения долгоживущие возбужденные носители образуют замкнутые токи, которые создают магнитное поле, но не вносят вклад в наблюдаемую разность потенциалов. Мы предполагаем, что поведение долгоживущих носителей заряда может быть описано с помощью теории, представленной в [8] и напоминает поведение атомов жидкости или газа при формировании ячеек Бенара.

#### Список литературы

1. M.A. Gondala, S.M.A. Durrani, and E.E. Khawaja, "Laser pulse photodetectors based on Sn-doped indium oxide films», *Eur. Phys. J.* 8, 37–42 (1999);
2. Naohiko Kato, Tomoyoshi Motohiro, Tadashi Ichikawa, Hiroshi Ito, Tatsumi Hio-ki, and Shoji Noda, «All-optical modulation with anomalous photovoltaic film on a Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide modulator,» *Appl. Opt.* 36, 7870-7875 (1997);
3. H. Pensak, "High-Voltage Photovoltaic Effect", *Phys. Rev.* 109, 601 (1958);
4. H. Onishi, S. Kurokawa, K. Ieyasu, "Photovoltaic polarity of CdTe films obliquely deposited in vacuum", *J. Appl. Phys.* 45, 3205 (1974);
5. S.K. Sharma and R.S. Srivastava, "Study of anomalous photovoltaic effect in vacuumdeposited wedgedshaped CdTe films", *J. Appl. Phys.* 62, 907 (1987);
6. H. Kallmann, G. Marmor Spruch, and S. Trester, "Photovoltages larger than band-gap in thin films of germanium", *Appl. Phys.* 43, 469 (1972);

7. R.J. von Gutfeld, E.E. Tynan, "Temperature dependence of transverse planar voltages in laserirradiated Pt and Pd films", Appl. Phys. Lett. 26, 680 (1975);
8. A. Olivei, "Voltage generation by laser pulses in thin films", J. Phys. D Appl. Phys. 8, 561 (1975);
9. R.A. Brazhe, "Electrodynamic convection of free charge carriers in semiconductors", Fiz. Tverd. Tela, 39, 280-283 (1997);
10. Manneville P. "Rayleigh-Benard convection, thirty years of experimental, theoretical, and modeling work", Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures Springer Tracts in Modern Physics Volume 207, pp 41-65 (2006);

## Дополнительный вклад в термоэдс в нанокристаллических пленках системы Cr-Si

Новиков С. В.<sup>1</sup>, Бурков А. Т.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: S.Novikov@mail.ioffe.ru

В работе исследовались транспортные свойства тонких пленок системы  $\text{Cr}_{1-x}\text{Si}_x$ , где  $x = 0.65, 0.67, 0.72, 0.85$ , полученные методом магнетронного распыления на холодную  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  подложку. Образцы представляли собой аморфные тонкие пленки. В ходе изотермического отжига происходил процесс кристаллизации с образованием нанокристаллитов.

Термоэлектрическую эффективность тонких пленок можно охарактеризовать с помощью фактора мощности  $P=S^2\sigma$ , где  $S$  — коэффициент термоэдс,  $\sigma$  — удельная проводимость. Ранее [1], было установлено, что значения фактора мощности нанокристаллических пленок выше, чем микрокристаллических того же состава. Увеличение фактора мощности связано с большими значениями коэффициента термоэдс. Его рост может быть связан с наличием сильного селективного рассеяния на границах нанокристаллитов.

Для описания характера изменения термоэдс от соотношения фаз было использовано уравнение Нордгейма – Гортера [2], где  $S_A$  и  $\rho_A$  — характеристическая термоэдс и удельное сопротивление аморфной фазы,  $S_N$  и  $\rho_N$  — характеристическая термоэдс и удельное сопротивление, связанные с появлением нанокристаллической фазы. При этом предполагается, что общее сопротивление подчиняется правилу Матиссена [3],  $\rho = \rho_A + \rho_N$ . Где  $\rho_N$  связано с центрами рассеяния, а  $\rho_A$  связано с исходной аморфной матрицей.

$$S = (S_A - S_N) \frac{\rho_A}{\rho_A + \rho_N} + S_N$$

Используя соотношение Нордгейма – Гортера и данные, полученные в ходе изотермических отжигов пленок, удалось определить значения дополнительного вклада в термоэдс за счет нанокристаллизации ( $S_N$ ) для различных составов. Значения оказались сравнимы с термоэдс исходного аморфного состояния.

Было установлено, что дополнительный вклад в термоэдс в нанокристаллическом состоянии оказывается различным для пленок разного состава. Максимальный вклад имеют пленки стехиометрического состава.

Список литературы

1. Novikov S.V., Burkov A.T., Schumann J. Enhancement of thermoelectric properties in nanocrystalline M–Si thin film composites (M =Cr, Mn). *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 239-243, 2013;
2. Лившиц Б.Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.;
3. Блатт Ф.Дж., Шредер П.А., Фойлз К.Л., Грей Г.Д. Термоэлектродвижущая сила металлов / Под ред. Д.К. Белашенко. Металлургия, М. (1980). 248 с.;

## Влияние нитридной химической пассивации поверхности на характеристики GaAs фотодиодов

Контрош Е. В.<sup>1</sup>, Лебедева Н. М.<sup>1</sup>, Калиновский В. С.<sup>1</sup>, Солдатенков Ф. Ю.<sup>1</sup>, Улин В. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ им.А.Ф.Иоффе

Эл. почта: kontrosh@mail.ru

Монослойные пленки нитрида галлия GaN, формируемые на поверхности кристаллов GaAs, могут использоваться для эффективной химической и электронной пассивации поверхности полупроводниковых структур на их основе. Вследствие высокой прочности связей Ga–N, когерентные нитридные покрытия проявляют достаточную химическую стабильность, чтобы защитить поверхность GaAs от окисления на воздухе. Тем самым предотвращается появление характерных для окисленной поверхности GaAs внутризонных поверхностных состояний, создающих паразитные каналы проводимости на поверхности структур с *p-n* переходами, таких как фотодиоды. Кроме того, при замещении поверхностных атомов мышьяка значительно более электроотрицательным азотом новые поверхностные состояния оказываются углублены в валентную зону GaAs и становятся электрически неактивными. Таким образом, в нитридизированном кристалле существенно снижается скорость поверхностной рекомбинации [1], что в свою очередь существенно улучшает зависящие от состояния поверхности электронные и оптические характеристики данных полупроводников.

В настоящей работе исследовался эффект нитридной химической пассивации поверхности на эффективность GaAs фотодиодов вследствие снижения влияния туннельно-ловушечного (избыточного) и рекомбинационного механизмов токопрохождения.

Структуры фотодиодов изготавливались в два этапа. Сначала на подложке *n*-типа ориентации (100) выращивались слабелегированные эпитаксиальные слои GaAs с концентрацией свободных электронов от  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , затем на поверхности выращенного слоя проводили диффузию цинка для получения слоя *p*<sup>+</sup> с концентрацией дырок около  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Чипы фотодиодов представляли собой мезаструктуры с кольцевыми контактами, которые изготавливались с помощью оптической литографии путем жидкостного травления до подложки.

Сплошной мономолекулярный слой GaN, когерентно связанный с невозмущенной поверхностью (001) GaAs, создается за счет диссоциативной хемосорбции молекул гидразина (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) из раствора гидразин-гидрата, содержащего небольшие добавки сульфидов [2, 3]. Взаимодействие с раствором приводит к удалению с поверхности

GaAs слоя естественного окисла, а затем и атомов мышьяка за счет их реакции с анионами  $\text{SH}^-$  и образования растворимых производных тиомышьяковистой кислоты. Первичное покрытие поверхностных атомов галлия формируется в результате хемосорбции на них анионов  $\text{OH}^-$ , присутствующих в сильнощелочных ( $\text{pH} = 13$ ) сульфидных растворах. Формирование нитридной пленки происходит в результате необратимого замещения адсорбированных анионов  $\text{OH}^-$  атомами азота молекул гидразина и образования на поверхности мостиковых связей Ga–N–Ga.

Анализ темновых прямых ВАХ GaAs фотодиодов показал, что после химической нитридизации боковой поверхности мез приборов предэкспоненциальные множители  $J_{0l}$ ,  $J_{0r}$  туннельно-ловушечного (избыточного, Esaki) и рекомбинационного (Sah-Noyce-Shockley) механизмов транспорта носителей снизились в несколько раз. Это свидетельствует о снижении плотности состояний на боковых поверхностях исследуемых образцов фотодиодов.

При сравнении спектров поглощения GaAs фотодиодов до и после химической нитридизации поверхности выяснено, что внешняя квантовая эффективность преобразования падающего оптического излучения увеличивается после нитридизации  $\sim$  на 20% вблизи длинноволнового края поглощения и до 100 % на длине волны 400 нм, что также может свидетельствовать о существенном снижении плотности поверхностных состояний в исследуемых образцах. Совпадение спектров поглощения образцов с нитридным покрытием спустя один год свидетельствует о высокой химической стабильности создаваемого покрытия.

Настоящая работа, выполненная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, поддержана Министерством образования и науки России, Соглашение о предоставлении субсидии от 27.06.2014 г. № 14.604.21.0088 на выполнение прикладных научных исследований по теме работы, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60414X0088.

#### Список литературы

1. Berkovits V.L., Ulin V.P., Losurdo M., Capezzuto P., Bruno G., Perna G., Capozzi V., Wet chemical nitridation of GaAs(100) by hydrazine solution for surface passivation, *Appl. Phys. Lett.*, v. 80, P. 3739, 2002;
2. Paget D., Berkovits V.L., Ulin V.P., Ozanam F., Dumas P., Kubsky S, Lahlil K., Bideux L., Monier G., Real time infra-red absorption analysis of nitridation of GaAs(001) by hydrazine solutions, *J. Electrochem. Soc.*, v. 160, H229-H236, 2013;
3. Berkovits V.L., Ulin V.P., Tereshchenko O.E., Paget D., Rowe A.C., Chiaradia P., Doyle B.P., Nannarone S. Chemistry of wet treatment of GaAs(111)B and GaAs(111)A in hydrazine-sulfide solutions, *J. Electrochem. Soc.*, v. 158, D127-D135, 2011;

## Угловая зависимость квантовых осцилляций магнитосопротивления в сильно анизотропных слоистых квазидвумерных проводниках

Могильюк Т. И.<sup>1</sup>, Григорьев П. Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ Курчатовский институт

<sup>2</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау

Эл. почта: 5taras@mail.ru

В сильно анизотропных почти двумерных слоистых металлах в режиме сильного магнитного поля, когда расстояние между уровнями Ландау  $\hbar w_c$  больше межслоевого интеграла перескока  $t_z$  и ширины уровней Ландау  $G_0$ , возможны отклонения от стандартной теории магнитосопротивления. Недавно автором было показано [1], что в этом пределе амплитуда угловых осцилляций монотонной части магнитосопротивления зависит от формы уровней Ландау (то есть от плотности электронных состояний на каждом уровне Ландау, которая в этом пределе не лоренцевская [2] и определяется типом рассеяния и соотношением параметров  $\hbar w_c$ ,  $t_z$  и  $G_0$ ). В этой работе мы изучаем угловую зависимость квантовых осцилляций магнитосопротивления в пределе  $\hbar w_c \gg t_z, G_0$ . Согласно стандартной теории квантовых осцилляций [3] угловую зависимость амплитуды квантовых осцилляций дают только так называемые спиновые нули, которые возникают, когда вклады в квантовые осцилляции от разных компонент спина находятся в противофазе. Однако в квазидвумерных металлах сильные угловые осцилляции монотонной части магнитосопротивления (см., например, [4] или обзор [5]) могут привести также к отклонениям в угловой зависимости квантовых осцилляций. В нашей работе теоретически показано, что эти отклонения действительно возникают и достаточно велики. Также получены аналитические формулы, включающие как угловые, так и квантовые осцилляции магнитосопротивления.

При большей величине магнитного поля  $G_0 \ll \hbar w_c$  в самосогласованном борновском приближении в углах Ямаджи максимум осцилляций межслоевой проводимости обратно пропорционален величине магнитного поля:  $\sigma_{zz} \sim (G_0 / \hbar w_c)$ , а минимум осцилляций близок к нулю. В этом случае усреднённая проводимость по положению уровня Ферми между двумя ближайшими к нему уровнями Ландау в углах Ямаджи обратно пропорциональна величине магнитного поля в степени  $3/2$ :  $\sigma_{zz} \sim (G_0 / \hbar w_c)^{3/2}$ .

При малой величине магнитного поля  $G_0 \gg \hbar w_c$  результат для осцилляций межслоевой проводимости повторяет соотношения, найденные в работах.

Список литературы

1. P.D. Grigoriev, T.I. Mogilyuk, Phys. Rev. B 90, 115138, 2014;

2. Tsunea Ando, J. Phys. Soc. Jpn. 36, 1521 1974; I.V. Kukushkin, S.V. Meshkov and V.B. Timofeev, Sov. Phys. Usp. 31, 511 1988; A.D.Mirlin, E.Altshuler, P.Wolfle, Annalen der Physik 5, 281 1996;
3. D. Shoenberg, "Magnetic oscillations in metals", Cambridge University Press 1984;
4. R. Yagi, Y. Iye, T. Osada, S. Kagoshima, J. Phys. Soc. Jpn. 59, 3069, 1990.;
5. M.V. Kartsovnik, Chem. Rev. 104, 5737, 2004;

## **Изучение динамики отрицательной циркулярной поляризации люминесценции квантовых точек InP/InGaP в поперечном магнитном поле**

*Некрасов С. В.<sup>1</sup>, Кусраев Ю. Г.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: nekrasov108@yandex.ru

Следствием пространственного ограничения носителей заряда в квантовых точках (КТ) по трем направлениям является не только дискретизация энергетического спектра носителей, но и подавление основного механизма релаксации спина в объемных материалах – механизма Дьяконова-Переля [1], что позволяет рассматривать КТ как перспективные объекты для создания устройств, работа которых основана на использовании спиновой степени свободы.

Объектом исследования были квантовые точки InP в матрице InGaP. Особенностью данной структуры является наличие двух характерных латеральных размеров точек [2]. Размер больших КТ — 150 нм, маленьких — 40 нм. Двум размерам соответствуют два пика в спектре интенсивности люминесценции. В пике излучения больших точек наблюдается необычное явление отрицательной степени циркулярной поляризации люминесценции (ОЦП). ОЦП называют циркулярную поляризацию люминесценции, спиральность которой противоположена спиральности циркулярной поляризации возбуждающего луча.

Была исследована динамика ОЦП в поперечном магнитном поле. При этом не наблюдалось ожидавшихся осцилляций поляризации во времени. С ростом поля время затухания поляризации уменьшалось. Было предложено три механизма, которые могут приводить к наблюдаемым эффектам. (i) Накопление ориентации спинов резидентных электронов за много возбуждающих импульсов лазера; (ii) Разброс g-фактора дырок; (iii) Разброс ядерных полей, действующих на электроны. Первый сценарий будет рассмотрен подробно, для остальных приведены краткие пояснения.

(i) ОЦП люминесценции, как правило, имеет место при рекомбинации комплекса, состоящего из трех частиц — электрон и экситон (а также электрон на нейтральном доноре). Кроме этого наличие ОЦП свидетельствует об ориентации спина резидентного электрона. Предположим, что такая ориентация происходит за много возбуждающих импульсов лазера. Если при этом приложить поперечное магнитное поле, то произойдет дефазировка спинов электронов, ориентированных в разные моменты времени, что может вызвать наблюдавшуюся картину «замывания» осцилляций и ускорения затухания.

Был проведен ряд экспериментальных исследований для проверки состоятельности данной гипотезы. Из зависимости интегральной по времени степени ОЦП от

периода возбуждающих импульсов был сделан вывод о наличии двух режимов накачки спина резидентного электрона. В одном из режимов наблюдается накопление спиновой ориентации за много импульсов, в другом – нет. Каждому режиму соответствуют свои значения периода возбуждающих импульсов. Исследования динамики в поперечном поле показали, что осцилляции отсутствуют как при накоплении ориентации спинов резидентных электронов за много импульсов, так и в отсутствие накопления. Таким образом, можно сделать вывод о непригодности сценария (i) для данного случая.

(ii) Рассмотрим второй сценарий. В квантовых точках поперечный  $g$ -фактор тяжелой дырки отличен от нуля в меру анизотропии в ее плоскости. Соответственно,  $g$ -фактор может иметь существенный разброс по ансамблю. В таком случае, если поляризация люминесценции определяется спиновой ориентацией дырок, в магнитном поле могут отсутствовать осцилляции и наблюдаться рост затухания с ростом поля.

(iii) Рассмотрим случай, когда поляризация люминесценции по большей части определяется ориентацией спинов резидентных электронов. Было показано, что в структуре присутствует влияние ядерных магнитных полей на спиновую поляризацию электронов, причем, характерной особенностью является наличие ядерного квадрупольного взаимодействия. Значение ядерных полей имеет разброс по ансамблю КТ. На спины электронов действует поле равное сумме внешнего и ядерного полей, меняющееся по ансамблю, что также может вызывать «замывание» осцилляций во времени.

Таким образом, первый из трех предложенных сценариев не реализуется, а остальные требуют дальнейшего исследования.

#### Список литературы

1. Дьяконов М.И., Перель В.И. О спиновой ориентации электронов при межзонном поглощении света в полупроводниках. ЖЭТФ. Т. 60. С.1954. 1971;
2. A.M. Mintairov, James L. Merz, Steven A. Blundell. Molecular states of electrons: emission of Single Molecules in self-organized InP/GaInP quantum dots. Fingerprints in the optical and transport properties of quantum dots. Edited by Dr. Ameenah Al-Ahmadi. InTech. 2012;

## **Измерение спин-волновой жесткости в гелимагнетиках методом малоуглового рассеяния нейтронов**

Суханов А. С.<sup>1</sup>, Григорьев С. В.<sup>1</sup>, Алтынбаев Е. В.<sup>1</sup>, Siegfried S.-A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

<sup>2</sup>Helmholtz Zentrum Geesthacht

Эл. почта: alexander.s.sukhanov@gmail.com

В настоящей работе разработан и описан метод для изучения спин-волновой динамики в гелимагнетиках со взаимодействием Дзялошинского-Мория (ДМ) с использованием малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. Метод использован для соединения MnSi в интервале внешних магнитных полей, выше критического поля  $H_{c2}$ , необходимого для фазового перехода из состояния со структурой спиновой спирали в индуцированный полем ферромагнетик. Как известно [1, 2], закон дисперсии спиновых волн в ДМ-гелимагнетиках в этом случае имеет следующий вид:



$\epsilon_q = A(\mathbf{q} - \mathbf{k}_s)^2 + H - H_{c2}$ . Показано, что малоугловое рассеяние нейтронов, во-первых, ограничено внутри круга с центром в  $\mathbf{Q} = \pm \mathbf{k}_s$  и радиусом, равным  $k_i \theta_c(H)$ . Во-вторых, рассеяние зависит от поляризации падающего пучка нейтронов и демонстрирует киральную природу спиновых волн в таких системах. Угол отсечки зависит от спин-волновой жесткости  $A$  и от значения внешнего магнитного поля  $H$ :  $\theta_c^2(H) = \theta_0 - \theta_0(H - H_{c2})/E_i$ , где  $\theta_0 = (2AM_N)^{-1}$ . Таким образом, была определена температурная зависимость жесткости спиновых волн  $A$  в соединении MnSi. Обсуждаются сходства и различия этого метода в сравнении с методом, используемым ранее для обычных ферромагнетиков [3, 4].

#### Список литературы

1. O. Nakanishi, A. Yanase, A. Hasegawa, and M. Kataoka, *Solid State Commun.* 35, 995 (1980);
2. S. V. Maleyev, *Phys. Rev. B* 73, 174402 (2006);
3. V. Deriglazov, A. Okorokov, V. Runov, B. Toperverg, R. Kampmann, H. Eckerlebe, W. Schmidt, and W. Lobner, *Physica B* 181182, 262 (1992);
4. S. V. Grigoriev, E. V. Altynbayev, H. Eckerlebe, and A. I. Okorokov, *Journal of Surface Inv.* 8, 5 (2014);

## Долинное расщепление в нанопроволоках из селенида свинца

*Авдеев И. Д.*<sup>1,2</sup>, Нестоклон Михаил Олегович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбАУ НОЦ НТ

Эл. почта: ivan-avdeev505@mail.ru

В работе методом сильной связи исследуются нанопроволоки из широко используемого в оптоэлектронике материала – селенида свинца. Современными химическими методами возможно получение различных наноструктур на их основе, в том числе наностолбиков – проволок конечной длины. В объемном кристалле все состояния 4-хкратно вырождены, так как имеется 4 независимые L долины, отвечающие потолку валентной зоны и дну зоны проводимости. В нанопроволоках вырождение снимается за счет анизотропии массы [1] и наличия долинного взаимодействия [2]. Для описания оптических переходов важно знать детальную структуру спектра. Как было показано в работе [3] размерное квантование вдоль оси роста наностолбиков сильно повышает плотность спектра, поэтому для изучения долиного расщепления нами были выбраны одномерные структуры – цилиндрические нанопроволоки, так как в них размерное квантование удается выделить отдельно.

В ходе расчетов нами была получена зависимость энергетического спектра от радиуса нанопроволок, дисперсия во всей зоне бриллюэна, построена радиальная часть локальной плотности состояний (волновые функции), проведено подробное сравнение полученных результатов с расчетами в рамках КР теории возмущений согласно [1]. Параметры сильной связи взяты из работы [2], их особенность в том, что эффективные массы подбирались близкими к экспериментальным значениям. Пара-

метры для КР теории возмущений были получены непосредственно из рассчитанной нами в методе сильной связи зонной структуры.

Показано, что микроскопическая структура проволок сильно зависит от положения ее оси в элементарной ячейке объемного кристалла. Нами был проведен расчет для трех различных положений оси соответствующих точечной симметрии проволок  $D_{3d}$ ,  $D_3$ ,  $C_{2h}$ . В группе  $D_3$  (без центра инверсии) снято крамерсово вырождение по спину в зоне Бриллюэна. Также при понижении симметрии величина долиного расщепления уменьшается. Кроме того, зависимость от радиуса энергии размерного квантования и константы спинового расщепления носит осциллирующий характер.

В результате работы был предложен подход, позволяющий вычислить величину долиного расщепления для первых трех уровней размерного квантования поперек проволоки путем сравнения волновых функций метода сильной связи и КР теории, и расчета эффективных масс для каждого из них. Сравнение расчета методом сильной связи и в рамках КР теории показывает их сильное различие. Долиное расщепление уровней оказывается порядка расстояния между уровнями размерного квантования и растет с уменьшением радиуса проволок.

#### Список литературы

1. A.C. Bartnik, A.L. Efros, W.-K. Koh, C.B. Murray, and F.W. Wise, "Electronic states and optical properties of pbse nanorods and nanowires," Phys. Rev. B, vol. 82, p. 195313, Nov 2010;
2. A.N. Poddubny, M.O. Nestoklon, and S.V. Goupalov, "Anomalous suppression of valley splittings in lead salt nanocrystals," Phys. Rev. B, vol. 86, p. 035324, 2012.;
3. S.V. Goupalov, "Finite-height effect on electron energy structure of lead salts nanorods," J. Phys. Chem. C, vol. 117, pp. 6476–6479, March 2013;

## **Поглощение микроволнового излучения и осцилляции Шубникова – де Гааза в композитных квантовых ямах на основе разъединённых гетеропереходов II типа InAs/GaSb/AlSb**

*Кочман И. В.<sup>1</sup>, Вейнгер А. И.<sup>1</sup>, Михайлова М. П.<sup>1</sup>, Семенихин П. В.<sup>1</sup>,  
Калинина К. В.<sup>1</sup>, Pangrac J.<sup>2</sup>, Hospodkova A.<sup>2</sup>, Hulicius E.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>Institute of Physics AS CR, v.v.i, Prague, Czech Republic

Эл. почта: kochman@mail.ioffe.ru

Магнитнотранспортные, оптические, спин-зависимые и топологические свойства композитных квантовых ям (ККЯ) на основе гетеропереходов InAs/GaSb, перспективных для спинтроники и наноэлектроники, интенсивно изучаются в последние годы [1-3].

Уникальные свойства разъединённых гетеропереходов обусловлены тем, что в них зона проводимости InAs лежит на 150 мэВ ниже валентной зоны GaSb [1, 2]. В широких квантовых ямах зонная структура инвертирована, т.е. состояние зоны проводимости  $E_1$  лежит ниже, чем основное состояние зоны тяжелых дырок  $H_1$ ,

приводя к перетеканию заряда между GaSb и InAs за счет кулоновского взаимодействия. Такая система обладает полуметаллическими свойствами. В отсутствие электрического поля в нелегированной ККЯ присутствуют только электроны.

В представленной работе впервые наблюдалось поглощение микроволнового излучения двумерными электронами и эффект Шубникова – де Гааза (ШдГ) в композитных InAs/GaSb/AlSb ККЯ при низких температурах. Использовался метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [4, 5].

Структуры для исследования были впервые выращены методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений на изопериодной подложке n+ GaSb:Te(100) и состояли из буферного слоя GaSb 30 нм, барьера AlSb (30 нм), нелегированных квантовых ям InAs (15 нм или 12,5 нм) и GaSb (10 нм или 8 нм), второго барьера AlSb (30 нм) и накрывающего слоя GaSb (3 нм). Выбор размеров ККЯ был обусловлен возможностью получения полуметаллической структуры [2].

На двух структурах с разной шириной квантовых ям исследовались осцилляции ШдГ в магнитных полях до  $H = 14$  кЭ и температурах 2.7 – 20 К. В эксперименте измерялась производная микроволновой мощности  $dP/dH$  ( $f = 10$  ГГц). Исследуемый образец размером  $5 \times 3 \times 0.3$  мм<sup>3</sup> помещался в пучность магнитного поля объемного резонатора. На двух структурах с разной шириной квантовых ям InAs A ( $d = 15$  нм) B ( $d = 12,5$  нм) исследованы полевые зависимости частоты и амплитуды осцилляций, а также угловые и температурные зависимости эффекта ШдГ. В магнитных полях свыше 7 — 8 кЭ, наблюдались интенсивные осцилляции производной микроволнового поглощения.

Из экстраполяции числа осцилляций в область сильных магнитных полей было оценено поле циклотронного резонанса для двух образцов:  $H_c = 392,17$  кЭ (A),  $H_c = 374,98$  кЭ (B). Концентрация двумерных электронов была определена из линейной зависимости фактора заполнения от обратной напряженности магнитного поля:  $N_c(A) = 1.9 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>,  $N_c(B) = 1.84 \times 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Значение эффективных масс оценивалось из температурной зависимости амплитуд при постоянном значении магнитного поля 11,2 кЭ и составило  $m^* = 0,029m_0$  (для образца A) и  $m^* = 0,0408m_0$  (для образца B). Оценка уровня Ферми дала значение  $E_F = 125$  мэВ, то есть уровень Ферми лежал в КЯ в интервале между уровнем  $E_1$  и  $H_1$ .

Исследование угловой зависимости осцилляций ШдГ в интервале углов  $0^\circ - 180^\circ$  показало, что амплитуда осцилляций зависит от угла между направлением магнитного поля и нормалью к плоскости квантовой ямы. По мере отклонения от нормали амплитуда падает вплоть до угла  $60^\circ$ , затем снова начинает расти, при переходе к направлению [110]. Поскольку структуры выращены так, что нормаль совпадает с осью [100], направление минимума амплитуды наблюдается при  $H \parallel [111]$ .

Необычная угловая зависимость амплитуды осцилляций в исследуемых ККЯ позволяет предположить, что она связана с механизмом инверсионной асимметрии характерной для полупроводниковых структур  $A_3B_5$  без центра инверсии [7, 8].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в поглощении микроволнового излучения в исследуемых композитных квантовых ямах участвуют двумерные электроны из полуметаллической квантовой ямы InAs на уровне Ферми. Наблюдаемые осцилляции с малым периодом указывают на роль двумерных электронов в условиях вырождения в квантовой яме InAs, с высокой концентрацией, которая и определяет период осцилляций ШдГ.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 15-02-03151.

Список литературы

1. Y. Naveh, B. Laikhtman, Band-structure tailoring by electric field in a weakly coupled electron-hole system, Applied Physics Letters, 66 (15), 1980, (1995);
2. C. Liu, T.L. Hughes, X.L. Qi, K. Wang, S-C. Zhang, Quantum spin Hall effect in inverted type-II semiconductors, Physical Review Letters, 100 (23), 23661, (2008);
3. I. Knez, C.T. Rettner, S-H. Yang, S.S. P. Parkin, L. Du, R-R. Du, and G. Sullivan, Observation of Edge Transport in the Disordered Regime of Topologically Insulating InAs/GaSb Quantum Wells, Physical Review Letters, 112, 026602, (2014);
4. A.I. Veinger; A.G. Zabrodskii; T.V. Tisnek; G. Biskupski, Distinctive features of the magnetoresistance of degenerately doped n-InAs and their influence on magnetic-field-dependent microwave-absorption, Semiconductors, 32 (5), 497, (1998);
5. H.J. von Bardeleben, Y.Q. Jia, M.O. Manasreh and C.E. Stuz, Electron paramagnetic resonance study of the two-dimensional electron gas in  $Ga_{1-x}Al_xSb/InAs$  single quantum wells, Applied Physics Letter, 62, 90, (1993);
6. D. Shoenberg, Magnetic Oscillations in Metals, Cambridge University Press, 570, (1984);
7. E.I. Rashba, V.I. Sheka, Combined resonance in electron InSb, Sov. Soviet Physics-Solid State, 3, 1357, (1961);
8. N.S. Averkiev, L.E. Golub, and M. Willander, Spin relaxation anisotropy in two-dimensional semiconductor systems, Journal Of Physics: Condensed Matter, 14, R271, (2002);

## Электрон-электронные взаимодействия в сильнолегированных гетеропереходах

Сафoшкин А. С.<sup>1</sup>, Дюбуа А. Б.<sup>1</sup>, Бухенский К. В.<sup>1</sup>, Кучерявый С. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РГРТУ

<sup>2</sup>ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Эл. почта: safoshkin.a.s@rsreu.ru

The report is aimed at clarifying the contribution of intrasubband and intersubband electron – electron interactions to Landau quantization damping of transverse magnetoresistance oscillations. Our analysis of electron – electron is based on the calculation of the conduction band energy structure of strongly doped (charge density  $n_s = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) heterojunction  $Al_xGa_{1-x}/GaAs$ . The system of equations which describe the model is the following: Schrödinger equation for the states of the conduction electrons, a constitutive equation giving the charge density in terms of the occupied states and the uniform-background charge density, and Poisson equation giving the potential in terms of the charge density. The potential well of this heterojunction was approximated by the triangular profile [1]. Expressions are derived for the time of electron-electron interaction, matrix elements of the full screening potential and dynamic dielectric function in a 2D electron system. One of the important points in the derivation of expression for  $\tau_{ee}^{intra}$  and  $\tau_{ee}^{inter}$  is the calculation of the full screening potential matrix elements which, within the perturbation theory approach, implies the transformation of the potential  $V(\mathbf{r}, t)$  into  $V_{tot}(\mathbf{q}, \omega)$ . To within the second

order in external potential  $V_{tot}(\mathbf{q}, \omega)$  in the perturbation theory expansion, the time required for the e-e interaction to change the state  $\langle \mathbf{k} | \mathbf{p} \rangle$  into  $\langle \mathbf{k} + \mathbf{q} | \mathbf{p} - \mathbf{q} \rangle$  is given by a expression [2]:

$$\frac{1}{\tau_{ee}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi^2 \cosh^2(\hbar\omega / 2k_B T)} \sum_{i,j,k,m} \sum_{\mathbf{q}} |V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)| \chi_{ik}(\mathbf{q}, \omega) \chi_{ik}^*(\mathbf{q}, \omega),$$

with matrix elements  $V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$  and dielectric function  $\chi_{ik}(\mathbf{q}, \omega)$ .

In conclusion, it should be noted that characteristic features of 2D electron systems, such as the amplitude – frequency modulation, beatings, and sharp bends in the oscillation amplitude magnetic field dependence make the description of Landau quantization damping in terms of the Dingle temperature rather problematic. Another point to be pointed out is the fact that in the magnetic field range where a strong amplitude – frequency modulation takes place the second – subband electrons are in the state close to the quantum limit and one can only speak of the oscillations period in a rather limited sense.

Список литературы

1. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафошкин А.С. Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе. Вестник РГРТУ, № 3 (выпуск 45), с. 88-92, 2013;
2. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhensky K.V., Dubois A.B., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Kucheryavy S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction. Nanosystems: physics, chemistry, mathematics, Vol. 5, Issue 3, pp. 343-353, 2014;

## Электроотражение периодических гетероструктур с тройными квантовыми ямами InAs/GaAs

*Большаков А. С.<sup>1</sup>, Чалдышев В. В.<sup>1</sup>, Бабичев А. В.<sup>1,2</sup>, Кудряшов Д. А.<sup>2</sup>, Гудовских А. С.<sup>2,3</sup>, Морозов И. А.<sup>2</sup>, Соболев М. С.<sup>2</sup>, Никитина Е. В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбАУ НОЦ НТ

<sup>3</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: bolsh\_as@mail.ioffe.ru

Оптический отклик экситона может быть существенно усилен в периодической системе квантовых ям (КЯ) с периодом, допускающим брэгговский резонанс на частоте возбуждения экситонов в КЯ [1]. В системах, содержащих более одной КЯ в периоде, этот отклик может быть еще больше при той же толщине всей структуры [2]. Для этого КЯ одного периода должны располагаться достаточно близко друг к другу, чтобы не терялась когерентность взаимодействия экситонов со светом. Однако при этом должно возникать расщепление уровня энергии экситона, тем большее, чем ближе КЯ расположены друг относительно друга.

В данной работе исследовались спектры отражения и электроотражения света от периодической гетероструктуры, содержащей 60 периодов по три сверхтонкие (1 монослой) КЯ InAs/GaAs. Толщина барьеров GaAs, разделяющих смежные КЯ, по данным рентгеноструктурного анализа составляла примерно 9.3 нм, при этом период

структуры оценивался в 118 нм. Образец был изготовлен на *p*-легированной подложке GaAs, а поверх структуры был нанесен слой оксида индия-олова (ITO), что позволило прикладывать модулирующее напряжение напрямую к структуре и получать большое модулирующее поле при умеренном прикладываемом напряжении.

Были проведены измерения спектров электроотражения при температурах 10 – 300 К, различных углах падения и поляризациях света. Типичное прикладываемое к образцу напряжение равнялось 3 В. При пренебрежении экранировкой (периодическая структура не легировалась) это соответствует напряженности электрического поля около 4 кВ/см. Обнаружено, что величина и форма особенностей в спектре заметно меняются с изменением угла падения света. Также обращает на себя внимание значительная абсолютная величина особенностей: глубина модуляции достигает и даже превышает 10%. Мы связываем этот факт с проявлением брэгговской дифракции, когда волны, отраженные от каждого периода, взаимно усиливают друг друга.

Была произведена подгонка спектра электроотражения, измеренного при комнатной температуре. Расчет проводился в предположении гауссовой формы экситонных линий, которая является более приемлемой при комнатной температуре, чем лоренцева [3]. Из подгонки были определены значения энергии отдельных экситонных резонансов в КЯ. Далее было проведено моделирование посредством численного решения уравнения Шредингера для системы, содержащей 3 прямоугольные потенциальные ямы соответствующей ширины и высоты. Таким путем были определены расчетные значения уровней размерного квантования электронов и дырок в КЯ. Полученные затем на основе этих данных, с учетом энергии связи экситона в GaAs, значения резонансных энергий экситонов в КЯ оказались весьма близкими к значениям, определенным из подгонки эксперимента. Это дало возможность идентифицировать отдельные спектральные особенности как связанные с экситонами, образованными носителями на конкретных уровнях размерного квантования.

Квантовомеханический расчет показал, что два экситонных резонанса (с легкой и тяжелой дыркой), которые существовали бы в структуре с одиночной КЯ, расщепляются на четыре разрешенных по симметрии перехода. Расщепление оказывается настолько сильным, что экситонные линии не перекрываются. Таким образом, в рассматриваемой структуре теряется когерентность между экситонными резонансами одного узла, и брэгговская дифракция должна приводить к усилению главным образом того резонанса, который оказывается ближе к брэгговской частоте, что и наблюдалось в спектрах немодулированного оптического отражения исследованной структуры.

#### Список литературы

1. Ивченко Е.Л., Несвижский А.И., Йорда С., Брэгговское отражение света от структур с квантовыми ямами, ФТТ, т. 36, с. 2118–2129, 1994;
2. Большаков А.С., Чалдышев В.В., Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Лундин В.В., Цацульников А.Ф., Яговкина М.А., Резонансная брэгговская структура со двоянными квантовыми ямами InGaN, ФТТ, т. 55, с. 1706–1708, 2013;
3. Shanabrook B.V., Glembocki O.J., Beard W.T., Photoreflectance modulation mechanisms in GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple quantum wells, Phys. Rev. B, v. 35, pp. 2540–2543, 1987;

# Резонансный перенос энергии электронного возбуждения по механизму Декстера в системе квантовых точек

Самосват Д. М.<sup>1</sup>, Чикалова-Лузина О.П.<sup>1</sup>, Вяткин В. М.<sup>2</sup>, Зегря Г. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: samosvat@yandex.ru

Резонансный перенос энергии электронного возбуждения происходит в результате диполь-дипольного, диполь-квадрупольного и обменного взаимодействий между донором и акцептором энергии. Первые два взаимодействия имеют электростатическую природу, в основе последнего лежит антисимметрия волновых функций электронов системы, состоящей из донора и акцептора энергии. Необходимым условием резонансного переноса энергии является равенство энергий возбуждения электрона в доноре и акцепторе. Теоретическое описание переноса энергии между молекулами по электростатическим механизмам было разработано Ферстером и Декстером [1, 2]. Декстером была развита теория переноса энергии по обменному механизму [2]. Было показано, что обменный вклад в перенос энергии важен в двух ситуациях: первая — расстояние между донором и акцептором мало и их волновые функции не сильно локализованы; вторая — диполь-дипольные переходы в акцепторе запрещены.

Теоретическое описание переноса энергии между квантовыми точками было разработано в [3, 4] в предположении, что взаимодействие между ними описывается кулоновским потенциалом, включающим все мультипольные члены. В настоящей работе анализируется обменный перенос энергии между квантовыми точками. Принято в рассмотрение кулоновское взаимодействие донора и акцептора. Предполагается, что квантовая точка-донор и квантовая точка-акцептор изготовлены из одного и того же полупроводникового соединения  $A_3B_5$  и помещены в матрицу из другого материала, создающую потенциальные барьеры для электронов и дырок. С использованием трехзонной модели Кейна [5], которая наиболее адекватно описывает спектр полупроводников  $A_3B_5$ , найдена зависимость скорости переноса энергии в зависимости от расстояния между центрами квантовых точек  $d$  и от параметров квантовой точки.

Скорость переноса энергии  $W_{if}$  определяется матричным элементом взаимодействия  $M_{if}$  электронов донора и акцептора для перехода системы из начального состояния, когда электрон донора возбужден, в конечное состояние, когда в возбужденном состоянии электрон акцептора. В первом порядке теории возмущений, вероятность переноса энергии равна:

$$W_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \rho,$$

где  $i$  и  $f$  обозначают начальное и конечное состояние системы,  $\rho$  — плотность конечных состояний.

Матричный элемент обменного взаимодействия равен:

$$M_{if} = \int d^3r_1 d^3r_2 \psi_{cD}(\mathbf{r}_1) \psi_{cA}^*(\mathbf{r}_1) \frac{e^2}{\varepsilon |\mathbf{d} + \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} \psi_{hD}^*(\mathbf{r}_2) \psi_{hA}(\mathbf{r}_2) \times \\ \times \sum_{\sigma_1, \sigma_2} \chi_{hD}^*(\sigma_2) \chi_{cA}^*(\sigma_1) \chi_{cD}(\sigma_1) \chi_{hA}(\sigma_2)$$

Здесь индексы  $c$  и  $h$  относятся к зоне проводимости и валентной зоне, индексы  $D$  и  $A$  — к донору и акцептору;  $\chi_{hA}(\sigma_2)$  — спиновые волновые функции,  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$  — координатыносителей заряда в доноре и акцепторе.

Для низколежащих энергетических состояний донора и акцептора найдена скорость переноса энергии вида

$$W_{i \rightarrow f} \sim d^{-4} \exp[-2(\kappa_c + \kappa_h)(d - 2R)]$$

Здесь  $R$  — радиус квантовой точки, и  $\kappa_c$  и  $\kappa_h$  — обратные длины туннелирования электронов и дырок из квантовой точки в матрицу. Выполнены численные расчеты зависимости скорости переноса энергии от расстояния  $d$  и от параметров квантовой точки. Для расстояний близких к контактным получены значения скорости обменного переноса порядка  $10^9$  с, что сопоставимо со значениями скорости переноса по электростатическим механизмам [4].

Список литературы

1. Forster Th., Ann. Phys. (1948) V. 2, P. 55 — 75;
2. Dexter D. L., J. Chem. Phys., 1953, V. 21, P. 836 – 850;
3. Kruchinin S. Yu., Fedorov A.V., Baranov A.V., Perova T.S., Berwick K. //Phys. Rev. B. 2008. V. 78. P. 125311-1- 125311-13;
4. Самосват Д.М., О.П. Чикалова-Лузина, Зегря Г.Г., ЖЭТФ. 2015. Т. 148. В. 1 С. 88.;
5. Kane E.O., J. Phys. Chem. Solids. 1957. V.1. P. 249- 261;

## **Обменно-связанные комплексы ионов марганца и локализованных дырок в квантовых ямах (CdMn)Te/(CdMg)Te с двумерным дырочным газом**

Гурин А. С.<sup>1</sup>, Толмачев Д. О.<sup>1</sup>, Романов Н. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: sasha.gurin@mail.ioffe.ru

В магниторазбавленных полупроводниках (МРП) сильное взаимодействие между двумя спиновыми системами (свободными электронами и локализованными спинами примесных ионов), приводит к гигантскому Зеемановскому расщеплению зоны проводимости и валентной зоны [1]. Поскольку магнитооптические свойства МРП определяются магнитными примесными ионами (примесями ионов Mn в большинстве случаев), важно исследовать структуру связанных с парамагнитных центров. Было показано, что изменение плотности двумерного дырочного газа влияет на ферромагнитные свойства магнитных квантовых ям (КЯ) [2]. Плотность двумерного дырочного газа в нелегированных КЯ (CdMn)Te/(CdMg)Te может контролироваться оптически благодаря поверхностным состояниям [3], если расстояние от квантовой ямы до поверхности структуры не превышает 2 нм. В таких КЯ были обнаружены новые спектры ОДМР, приписанные обменно-связанным комплексам, состоящим из локализованной дырки и ионов Mn [4].

В настоящей работе подобные комплексы были исследованы методом ОДМР на частоте 35 ГГц в структурах с квантовыми ямами CdMn)Te/(CdMg)Te, содержащих КЯ различной ширины. Присутствие таких комплексов указывает на избыточную



концентрацию дырок, которая создается в самых узких КЯ благодаря направленному туннелированию электронов от более узких к более широким ямам.

Спектры ОДМР комплексов Mn-дырка анизотропны: с увеличением угла между осью роста [001] и магнитным полем сигналы ОДМР смещаются из низких магнитных полей, соответствующих эффективному  $g$ -фактору  $g > 2$ , в более высокие поля ( $g < 2$ ). Увеличение СВЧ-мощности приводит к более симметричной форме линии ОДМР и сдвигу линии в направлении поля, соответствующего  $g = 2$ . Эти изменения могут быть объяснены, если предположить, что существует распределение обменно-связанных комплексов, в которых дырка связана с несколькими ионами Mn.

Обменно-связанные комплексы, состоящие из локализованной дырки и ионов магнана могут быть описаны с помощью спин-гамильтониана, который включает в себя спиновые гамильтонианы для изолированного  $Mn^{2+}$  ( $S = 5/2$ ) и локализованной дырки с эффективным спином  $S^* = 1/2$ , а также член, описывающий обменное взаимодействие между локализованной дыркой и несколькими ионами  $Mn^{2+}$ . Расчеты выполнены с использованием программы EasySpin, учитывающей бoльцмановское распределение населенностей между спиновыми подуровнями, со следующими параметрами:  $g = 2$  для Mn,  $g_{\parallel} = 2,4$  и  $g_{\perp} = 1,1$  для дырки, и константы обменного взаимодействия  $c_i = -1 \text{ см}^{-1}$ . Результаты расчетов показали, что для обменно-связанных комплексов, состоящих из локализованной дырки и  $n = 1, 2, 3$ , и 4 ионов Mn, линия ОДМР смещается к  $g = 2$  с увеличением числа ионов Mn в комплексе и величина сдвига уменьшается с увеличением  $n$ .

Известно, что время спин-решеточной релаксации уменьшается с увеличением числа частиц в обменно-связанных системах [5]. Для регистрации ОДМР необходимо, чтобы резонансное СВЧ-поле могло изменить разность населенностей между спиновыми подуровнями, то есть скорость СВЧ-переходов должна быть больше, чем скорость спин-решеточной релаксации. С увеличением мощности СВЧ вклад сигналов от комплексов, включающих большее число ионов Mn и имеющих более короткое время релаксации, увеличивается, что объясняет сдвиг линии ОДМР и изменение ее формы.

В заключении, исследования ОДМР квантовых ям  $(CdMn)Te/(CdMg)Te$ , содержащих двумерный дырочный газ, позволили выявить образование обменно-связанных комплексов, состоящих из локализованных дырок и нескольких ионов Mn. Анизотропия спектров ОДМР изменения формы линии, связанные с уровнем микроволновой мощности, объяснены наличием распределения комплексов, в которых дырка связана с несколькими ионами Mn. Получены параметры спинового гамильтониана этих комплексов и выполнено моделирование их спектров ОДМР, которое показало хорошее согласие с экспериментальными спектрами.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 14-12-00859.

#### Список литературы

1. J.K. Fudyna, J. Appl. Phys. 64, R29, 1988;
2. H. Boukari, P. Kossacki, M. Bertolini, D. Ferrand, J. Cibert, S. Tatarenko, A. Wasiela, J. A. Gaj, and T. Dietl, Phys. Rev. Lett. 88, 207204-1,2002;
3. S. Tarasenko, M. Bertolini, W. Maslana, H. Boukari, B. Gilles, J. Cibert, D. Ferrand, P. Kossacki, and J.A. Gai, Opto-Electron. Rev. 11, 133, 2003;
4. A.S. Gurin, N.G. Romanov, D.O. Tolmachev, P.G. Baranov, B.R. Namozov, Yu.G. Kusrayev, G. Karczewski, Proc. 21st Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology" Saint Petersburg, p. 72, 2013;

5. A Bencini and D. Gatteschi, Electron Paramagnetic Resonance of Exchange Coupled Systems, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1990;

## Плазмонное усиление люминесценции квантовых точек

Матюшкин Л. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Эл. почта: leva.matyushkin@gmail.com

Наноструктуры с линейными размерами 1–100 нм существенно изменяют характер распространения электромагнитного поля. Так, локализованный плазмонный резонанс металлических наночастиц приводит к эффекту локального усиления электромагнитного поля, в которое может быть помещена двухуровневая система, например, квантовая точка. При близком расположении частиц происходит быстрая безызлучательная передача энергии от квантовой точки плазмонной частице с соответствующим тушением люминесценции. Это явление традиционно рассматривается как полезное при измерении Рамановского спектра в устройствах, основанных на эффекте гигантского комбинационного рассеяния, в сравнении с обычной ситуацией, когда исследуемый отклик маскируется интенсивной люминесценцией.

Процесс передачи энергии между металлической и полупроводниковой частицами подобен Фёстеровскому резонансному переносу энергии и существенно зависит от расстояния между частицами  $l$ . Безызлучательный перенос для единичной плазмонной наночастицы и одиночной молекулы впервые рассмотрен в работе [1]. Текущее решение проблемы усиления люминесценции лежит в поиске компромиссного значения  $l$ , при котором усиление люминесценции двухуровневой системы в локальном поле плазмонной частицы преобладает над тушением резонансного эффекта, что осуществляется за счет создания *стейсера* – диэлектрической прослойки между плазмонной и квантовыми системами [2]. Экспериментальное рассмотрение подобных эффектов носит лишь единичный характер, а в теоретическом описании плазмонного усиления остается ряд вопросов.

Целью настоящей работы являлось развитие модельных представлений о физических эффектах, возникающих при различном отношении частоты фундаментального излучательного перехода в квантовых точках и частоты плазмонного резонанса металлических наночастиц, расположенных на различных расстояниях относительно слоя квантовых точек, а также развитие методик создания оптоэлектронных структур, в которых могут использоваться эффекты, возникающие при взаимодействии квантовой и плазмонных подсистем.

Исследования выполнены в рамках гранта РФФ, проект № 14-15-00324.

### Список литературы

1. Ruppin R. Decay of an excited molecule near a small metal sphere //The Journal of Chemical Physics. 1982. Т. 76. №. 4. С. 1681-1684;
2. Kulakovich O. et al. Enhanced luminescence of CdSe quantum dots on gold colloids // Nano Letters. 2002. Т. 2. №. 12. С. 1449-1452;

## Ферромагнитные свойства $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ и $(\text{In},\text{Mn})\text{As}$ нитевидных нанокристаллов

Резник Р. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: moment92@mail.ru

Одна из основных проблем современной полупроводниковой спинтроники — поиск новых материалов, обладающих ферромагнитными и полупроводниковыми свойствами. Особый интерес уделяется так называемым разбавленным магнитных полупроводниках (DMS, diluted magnetic semiconductors), таких как  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  и  $(\text{In},\text{Mn})\text{As}$  соединений. Тем не менее, до сих пор не существует универсальной модели, которая способна адекватно описывать процессы магнитного упорядочения в таких материалах. Фундаментальный вопрос об истинной природе магнетизма, несмотря на его важность в плане технологических аспектов создания таких соединений, до сих пор открыт. В связи с этим, особый интерес к изучению наноструктур, таких, как, например, нановискеры (ННК).

В этой работе представлены результаты исследования различных свойств, особенно магнитных, из  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ , а также  $(\text{In},\text{Mn})\text{As}$  выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs при промежуточных температурах роста выше, чем те, которые используются для низко- температурного роста DMS тонких пленок.

Ростовые эксперименты проводили с использованием установки молекулярно-пучковой эпитаксии ЭП1203. Перед ростом ННК проводилась осаждение Mn на подложку с образованием капель, используемых в качестве катализатора. Следует отметить, что рост ННК происходил при металлически стабилизированных условиях роста. Температуры роста варьировались в диапазоне от 470°C до 500°C.

Морфологию полученных нанокристаллов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Zeiss Supra 25. Показано, что большая часть  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  ННК имеют преимущественное направление роста вдоль  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$ . Некоторые из них были ориентированы вдоль  $\langle 310 \rangle$  кристаллографического направления. Характерные размеры  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  ННК составляют 0,8 — 4 мкм в длину и 50 — 90 нм в диаметре. В свою очередь,  $(\text{In},\text{Mn})\text{As}$  ННК обладают длиной до 5 мкм и диаметром, близким к 40 нм.

Магнитные свойства образцов с ННК были измерены с использованием сверхпроводящего квантового интерференционного устройства (СКВИД-магнитометра) Quantum Design MPMS-XL7. Следует отметить, что измерения проводились не только для образцов с ННК, но и для снятых с подложки одиночных нанокристаллов. В температурной зависимости намагниченности для снятого с подложки  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  ННК ферромагнитное поведение наблюдается до  $\sim 70\text{K}$ . Но самые интригующие результаты были получены в исследовании полевой зависимости от намагниченности. Было обнаружено, что с увеличением магнитного поля, а не насыщения намагниченности, мы могли видеть разрушение ферромагнитного состояния.

## Нанокристаллы кремния: эффект деформации

Герт А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: anton.gert@ioffe.mail.ru

Нанокристаллы кремния, благодаря наличию эффективной фотолюминесценции в видимом диапазоне спектра при комнатной температуре, на протяжении последних 20 лет вызывают большой интерес в научном сообществе и весьма перспективны для применения в фотонике, фотовольтаике и медицине [1].

Излучательная рекомбинация неравновесных носителей заряда в объемном кремнии маловероятна, что обусловлено его непрямозонностью. В нанокристаллах кремния, как показано в работе [2], можно создать условия, при которых будут происходить прямые излучательные рекомбинационные переходы электронов. Свойства нанокристалла также сильно зависят от поверхностного покрытия: при пассивации нанокристаллов кремния алкильными цепочками,  $\text{CH}_3$ , вероятность прямых излучательных переходов возрастает по сравнению с кристаллами, покрытыми водородом. Этот эффект обусловлен большей делокализацией волновой функции электрона в  $k$ -пространстве по сравнению с нанокристаллами, покрытыми водородом, для низкоэнергетических электронных состояний. В работе [3] показано, что причиной повышения скорости излучательной рекомбинации нанокристаллов кремния, покрытых алкильными цепочками, может служить деформация кристаллической структуры наночастиц.

В данной работе мы изучили эффекты деформации кремниевых нанокластеров кремния, покрытых водородом и углеродом. Определение оптимальной структуры нанокластеров было выполнено с использованием методов молекулярной динамики. Расчеты энергетической структуры проведены методом DFT для кластеров малого размера и методом сильной связи в базисе  $\text{sp}3\text{d}5\text{s}^*$  для нанокристаллов большего размера. На основе расчетов из первых принципов определены параметры межатомной связи кремний-углерод на поверхности нанокристалла, необходимые для применения метода сильной связи к нанокристаллам, покрытым углеродом. Применение этого метода дает возможность нахождения волновых функций, расчета фононого и энергетического спектров для нанокластеров размеров до 5 нм. Показано, что деформация существенно увеличивает вероятность прямых излучательных переходов.

### Список литературы

1. F. Priolo, T. Gregorkiewicz et al., Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics, *Nature Nanotechnology*, 9, 19, 2014;
2. A.N. Poddubny and K. Dohnalova, Direct band gap silicon quantum dots achieved via electronegative capping, *Phys. Rev. B* 90, 245439, 2014;
3. P. Napala, K. Kůsová et al., Theoretical analysis of electronic band structure of 2- to 3-nm Si nanocrystals, *Phys. Rev. B* 87, 195420, 2013;

## Внутризонное поглощение излучения дырками в глубоких квантовых ямах

Павлов Н. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: pavlovnv@mail.ru

Основной проблемой при создании полупроводниковых устройств инфракрасного диапазона является высокая интенсивность процессов, снижающих эффективность преобразования электрического тока в излучение. Основными из них являются оже-рекомбинация и поглощение света свободными носителями. Структуры с глубокими квантовыми ямами частично решают данные проблемы: наличие высоких гетеробарьеров становится причиной подавления беспорогового канала оже-рекомбинации, а также процесса поглощения излучения свободными электронами с переходом в сплошной спектр. Таким образом, поглощение света свободными носителями заряда будет существенным лишь в «резонансных» случаях, когда значение эффективной ширины запрещенной зоны внутри квантовой ямы будет близко к значению расстояния между уровнями размерного квантования.

Поглощение света свободными электронами является хорошо изученным процессом, однако для дырок данный процесс изучен гораздо слабее. Причиной этого является сложная структура валентной зоны в соединениях  $A_3B_5$ , необходимость учета взаимного превращения различных типов дырок и существенная непараболичность энергетических спектров носителей заряда в узкозонных полупроводниках.

Наиболее точной моделью, учитывающей непараболичность энергетического спектра носителей заряда, является четырехзонная модель Кейна. В рамках данной модели в гамильтониане точно учитываются электронные состояния в зоне проводимости, а также дырочные состояния в подзонах тяжелых, легких и спин-отщепленных дырок в валентной зоне. Этот подход позволяет получить выражения для волновых функций дырок с учетом подмешивания  $s$ -компоненты, что позволяет в аналитическом виде выразить матричный элемент оптического перехода.

В настоящей работе произведен расчет коэффициента поглощения излучения тяжелыми дырками с переходом в подзоны легких и спин-отщепленных дырок в гетероструктуре с глубокими квантовыми ямами  $AlSb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/AlSb$ . Показано, что уровни размерного квантования в спин-отщепленной зоне располагаются существенно ближе друг к другу, чем уровни легких и тяжелых дырок. Также вследствие утяжеления дырок с ростом энергии зависимость частоты перехода тяжелая дырка — спин-отщепленная дырка от компоненты волнового вектора в плоскости квантовой ямы оказывается существенно слабее, чем для переходов тяжелая дырка — легкая дырка. Показано, что матричный элемент для межзонных оптических переходов пропорционален квадрату интеграла перекрытия  $p$ -компоненты волновой функции начального состояния и  $s$ -компоненты волновой функции конечного состояния. Таким образом, максимальное значение матричного элемента имеют переходы  $HH1-LH1$  и  $HH1-SH1$ . Показано, что значения коэффициента поглощения для переходов в спин-отщепленную зону значительно превосходят значения коэффициента поглощения для переходов в подзону легких дырок за счет того, что вследствие большого значения константы спин-орбитального расщепления масса спин-отщепленных дырок будет примерно на порядок превосходить массу легких дырок. Максимальное

значение коэффициента поглощения оказывается у перехода HH1-SH1 и составляет  $4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ .

Список литературы

1. Павлов Н.В., Зегря Г.Г. Оптические свойства гетероструктур с глубокими квантовыми ямами AlSb/InAs<sub>0.84</sub>Sb<sub>0.16</sub>/AlSb, ФТП, Т. 48, С. 1217-1227, 2014;
2. Павлов Н.В., Зегря Г.Г. Влияние непараболичности энергетического спектра электронов и легких дырок на оптические свойства гетероструктур с глубокими квантовыми ямами AlSb/InAs<sub>0.84</sub>Sb<sub>0.16</sub>/AlSb, ФТП, Т. 49, С. 617-627, 2015;

## **Влияние нановключений As на фотолюминесценцию квантовых точек InAs в GaAs**

*Косарев А. Н.<sup>1,2</sup>, Чалдышев В. В.<sup>1,2</sup>, Неведомский В. Н.<sup>2</sup>, Берг Н. А.<sup>2</sup>, Преображенский В. В.<sup>3</sup>, Путятю М. А.<sup>3</sup>, Семягин Б. Р.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

<sup>3</sup>ИФП СО РАН

Эл. почта: sash778@gmail.com

В структурах, где полупроводниковые квантовые точки (КТ) и металлические нановключения расположены близко друг к другу, возможна гибридизация экситонных и плазмонных возбуждений [1]. Это позволяет усилить взаимодействие света с веществом и увеличить эффективность оптоэлектронных приборов на КТ.

В данной работе исследовалась фотолюминесценция (ФЛ) двух пространственно-совмещенных слоев полупроводниковых КТ InAs, полученных методом Странского-Крастанова на поверхности GaAs. Выращивание производилось методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией (001). Слои КТ InAs зарастивались слоем GaAs при низкой температуре (LT-GaAs), обеспечивающей большой избыток мышьяка в материале [2-4]. С помощью последующего отжига в LT-GaAs формировался массив нановключений As [5]. Нами обнаружено сложное влияние LT-GaAs на ФЛ КТ InAs. При непосредственном зарастивании слоем LT-GaAs ФЛ из КТ InAs исчезает. Просвечивающая электронная микроскопия показала, что это происходит из-за появления дефектов в процессе низкотемпературного роста. Добавление разделительного слоя GaAs между КТ InAs и LT-GaAs устраняет дефекты. При этом наблюдается изменение интенсивности и формы спектра ФЛ. Наш анализ показал, что это явление вероятно связано с туннелированием электронов из КТ InAs через разделительный слой в континуум состояний LT-GaAs. Использование AlAs в качестве разделительного слоя устраняет эффекты туннелирования и спектр восстанавливает свою форму. После отжига в структурах с разделительными слоями GaAs и AlAs наблюдалось увеличение интенсивности ФЛ, которое может объясняться взаимодействием между КТ и формируемыми в процессе отжига нановключениями As.

## Список литературы

1. Zhang W., Govorov A.O. and Bryant G.W., Semiconductor-metal nanoparticle molecules: hybrid excitons and the nonlinear fano effect, *Phys.Rev.Lett.* 97, стр. 146804, год 2006;
2. Неведомский В.Н., Берг Н.А., Чалдышев В.В., Преображенский В.В., Путято М.А., Семягин Б.Р., Структуры GaAs с квантовыми точками InAs и As, полученные в едином процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, *ФТП* 43, вып. 12 стр.1662, год 2009;
3. Неведомский В.Н., Берг Н.А., Чалдышев В.В., Преображенский В.В., Путято М.А., Семягин Б.Р., Электронная микроскопия структур GaAs с квантовыми точками InAs и As, *ФТП* 45, вып 12, стр. 1642, год 2011;
4. Неведомский В.Н., Берг Н.А., Чалдышев В.В., Преображенский В.В., Путято М.А., Семягин Б.Р., Электронная микроскопия структур на основе GaAs с квантовыми точками InAs и As, разделенными барьером AlAs *ФТП* 47, вып. 9, стр. 1196, год 2013;
5. Chaldyshev V.V., Two-dimensional organization of As clusters in GaAs, *Materials Science and Engineering*, B88, стр. 195– 204,год 2002;

## Спектрально-угловые распределения нелинейного томсоновского рассеяния острогофокусированного лазерного импульса релятивистской интенсивности при фокусировке в дифракционный предел

Вайс О. Е.<sup>1</sup>, Бочкарев С. Г.<sup>2</sup>, Быченков В. Ю.<sup>2</sup>, Андрияш И. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова

<sup>2</sup>ФИАН

<sup>3</sup>Laboratoire d'Optique Appliquée, Ecole Polytechnique, Paris, France

Эл. почта: vays.oljga@physics.msu.ru

Современные фемтосекундные лазерные технологии позволили достигнуть очень высокой концентрации энергии в остром фокусе лазерного пучка с пиковой интенсивностью вплоть до  $2 \cdot 10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>, что делает возможным генерацию ярких аттосекундных рентгеновских импульсов в процессах лазерно-плазменных взаимодействий, или с помощью обратного комптоновского рассеяния и нелинейного томсоновского рассеяния лазерного импульса на свободных электронах, находящихся вблизи лазерного фокуса. Такие импульсы имеют много приложений в атомной и молекулярной физике, химии, и др.

Целью нашей работы является изучение нелинейного томсоновского рассеяния фемтосекундного релятивистски интенсивного острогофокусированного лазерного импульса. В данном сообщении рассмотрен режим, когда размер фокального пятна,  $D_F$ , сравним с  $\lambda$ . Для описания электромагнитных полей мощностью 150 ТВт, 30÷50 фс гауссовского лазерного импульса за пределами параксиального приближения мы используем точное решение векторного уравнения Гельмгольца, полученное спектральным методом. В работе анализируется влияние жесткой фокусировки на прямое ускорение электронов и генерацию вторичного излучения электронами, расположенными изначально в непосредственной близости от фокальной плоскости.

Для вычисления траектории электронов и углового энергетического спектра нелинейного рассеяния Томсона используются различные модели описания ЭМ полей, такие как параксиальное приближение гауссова лазерного импульса, и точное решение уравнения Гельмгольца с/без учета продольной составляющей электрического поля. На основании детального сравнения этих моделей мы делаем вывод, что параксиальное приближение описывает характеристики излучения некорректно для  $D_F < 10 \lambda$ , где  $\lambda$  является длиной волны лазерного пучка. Наш анализ показывает необходимость учета продольной компоненты электрического поля для корректного описания спектров вторичного излучения в дифракционном пределе ( $D_F \approx \lambda$ ). По сравнению со спектрами излучения, полученными при использовании паракси-



альных формул для лазерного импульса, спектральная функция для непараксиальных полей имеет сдвиг в область фотонов с низкой энергией, и, что самое важное, происходит генерация изолированных аттосекундных импульсов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 14-02-31407 мол-а, 13-02-00426) и Учебно-научного комплекса ФИАН.

#### Список литературы

1. Lee K., Chung S.-Y., and Kim D.-E., Relativistic Nonlinear Thomson Scattering: Toward Intense Attosecond Pulse, in book: Advances in Solid-State Lasers, INTECH, 509-538, 2010;
2. Corde S., Ta Phuoc K., Lambert G. et al., Femtosecond x rays from laser-plasma accelerators, Rev. Mod. Phys., 85, 1-48, 2013;
3. Koga J., Esirkepov T.Zh., and Bulanov S.V., Phys. Plasmas, 12, 093106 1-8, 2005;
4. Бочкарев С.Г., Быченков В.Ю., Ускорение электронов при острой фокусировке фемтосекундного лазерного импульса, Квант. эл., 37(3), 273-284, 2007;

## **Использование оптимизированной доплеровской рефлектометрии на стеллараторе Л-2М для исследования плазменной турбулентности**

*Харчевский А. А.<sup>1,2</sup>, Малахов Д. В.<sup>1,2</sup>, Скворцова Н. Н.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>ИОФ РАН

<sup>2</sup>МГТУ МИРЭА

Эл. почта: kharchevsky@yandex.ru

Доплеровская рефлектометрия (ДР) является общепризнанной диагностикой для исследования плазменной турбулентности и определения полоидальных скоростей вращения плазменного шнура на тороидальных установках. В настоящее время такая диагностика установлена на крупных установках магнитного удержания плазмы, таких как: ASDEX, TEXTOR, Туман-3, Глобус-М, ФТ-2, стеллараторе TJ-II и Л-2М [1]. Доплеровский рефлектометр входит в диагностический комплекс практически каждой тороидальной установки, направленной на исследование пространственной структуры возмущений плотности плазмы и их радиальных распределений в области удержания. Так же диагностика даёт представление о процессах, влияющих на перенос и изменение времени удержания энергии и частиц плазмы в объёме установки. На стеллараторе Л-2М в настоящее время проведена оптимизация ДР. Введённый в эксплуатацию новый гиротронный комплекс электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы МИГ-3 позволил получить максимальный импульсный удельный энерговыдел в плазму среди всех тороидальных установок — до 4 МВт/м<sup>3</sup>, для примера: энерговыдел греющего СВЧ излучения ЭЦР нагрева в токамаке Т-10 составляет 0,4 МВт/м<sup>3</sup>, а в стеллараторе LHD — 0,02 МВт/м<sup>3</sup>. Это событие повлекло за собой создание новых условий для развития разряда в установке и определило необходимость модификации диагностики. Выявлено, что во время разряда плазмы в стеллараторе Л-2М изменяется Фурье-спектр турбулентности плазмы. Было установлено, что структурная турбулентность в области измерения доплеровским рефлектометром описывается лишь тремя — четырьмя процессами,

которые были определены по разложению гистограммы амплитуд приращений флуктуаций [2]. Разложение спектра на компоненты может дать представление о поведении различных типов колебаний плазмы. Обнаруживаемые доминирующие компоненты выделяют неустойчивости, которые формируют турбулентность в краевой плазме (ITG и ETG).

Список литературы

1. Пшеничников А.А., Терещенко М.А., Харчев Н.К. и др., Применение доплеровской рефлектометрии на стеллараторе Л-2М, Физика плазмы. – Т.31, №7. – С. 604-611. – 2005;
2. Batanov G.M., Gorshenin A.K., Korolev V.Yu, Malakhov D.V., Skvortsova N.N., The evolution of probability characteristics of low-frequency plasma turbulence, Mathematical Models and Computer Simulation.–Т.4, №1. – С. 10-25. – 2012;

## **Исследование структуры естественной конвекции над горизонтальным нагретым диском**

*Храпунов Е. Ф.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: hrevgen1993@yandex.ru

Восходящие или свободноконвективные течения различной природы остаются объектом изучения на протяжении многих лет. Обусловлен такой интерес огромным количеством задач, в которых естественная конвекция является определяющим процессом: от задач кондиционирования помещений до задач метеорологии. Особенно сложны свободноконвективные процессы в атмосфере и гидросфере в силу многих факторов, оказывающих влияние на потоки: большие размеры областей, вращение Земли, существенно неоднородные поля температуры и плотности. Установлено, в частности, что основной причиной формирования смерчей является свободноконвективное взаимодействие нагретых воздушных масс, однако до сих пор не существует единой теории их образования и развития.

Очевидно, что решение сложных задач связанных с учетом многочисленных дополнительных факторов невозможно без наличия подробной информации о структурах течения в простейших конфигурациях, например, естественная конвекция над точечным источником [1] или свободноконвективный подъем масс над источниками конечных размеров различных конфигураций [2, 3]. Несмотря на многолетний опыт исследования подобных течений ряд вопросов, связанных со структурными особенностями потоков, не теряет актуальности. Течения трудно поддаются численному моделированию в частности в силу недостатка информации о «тонких» характеристиках турбулентности [4]. Экспериментальные данные нередко носят отрывочный характер, в силу сверхчувствительности течения к внешним возмущениям и изменениям параметров окружающей среды [5]. Таким образом, продолжает оставаться актуальным дальнейшее накопление экспериментальных результатов для создания обширной базы данных, на основе которой можно будет создавать новые и совершенствовать существующие модели турбулентности.

Целью работы является экспериментально – численное исследование структуры свободноконвективного потока от нагрываемого диска.

Основной задачей является описание особенностей структуры области формирования течения: экспериментально с использованием методов визуализации и измерений поля температуры внутри потока, а также численно, на основе системы уравнений Навье – Стокса.

Для проведения экспериментального исследования разработан стенд, позволяющий воспроизводить течение необходимой конфигурации. Основным элементом стенда – нагреваемый горизонтально расположенный диск диаметром 0.19 м и толщиной 4 мм, температуру которого можно варьировать и поддерживать заданный режим достаточно долго. Локализация диска обеспечивается путем системы охлаждения. Пространство, в котором проводится исследование, окружено мелкой сеткой, демпфирующей внешние возмущения не нарушая при этом конфигурацию исследуемого потока. С той же целью дополнительно используется защитная камера. Для визуализации использовалась оптическая система, позволяющая развернуть сфокусированный лазерный луч в плоскость, и генератор дыма. Точечные измерения производились с помощью термометра сопротивления.

Система уравнений Навье – Стокса решалась численно в приближении Буссинеска в осесимметричной постановке. Основная цель расчета – проверка возможности воспроизведения структур потока, исследованных в эксперименте.

В ходе работы получены данные о периодическом низкочастотном подъеме вихревых структур, в литературе называемых термиками. Подъем данных вихрей, в частности, отражается на профилях осредненной температуры в виде локальных максимумов. При увеличении температуры диска происходит увеличение частоты подъема термиком.

В результате численного моделирования были так же получены поднимающиеся вихревые структуры, частота всплытия которых близка к экспериментально определенной частоте.

#### Список литературы

1. Гебхарт Б., Джалурия Й, «Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен», М.: Мир, т1, 678 стр., 1991;
2. Эльтерман В. М, «Вентиляция химических производств», М.: Химия, 284 стр, 1980;
3. Посохин В. Н., Зигагин А. М., Романов С. В, «Численное исследование конвекции над объемным заглубленным протяженным теплоисточником», Региональная архитектура и строительство №1, 135 — 139 стр., 2011;
4. Chaengbarnung A, «Turbulent plumes generated by a horizontal area source of buoyancy», A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the degree PhD of Engineering, 2005;
5. Minh Vuong Pham, Frédéric Plourde, Son Doan Kim, «Three-dimensional characterization of a pure thermal plume», Journal of Heat Transfer, vol 125, 624-636 pp., 2005;

## Экспериментальное исследование нелинейных колебаний газа в трубе при переходе к ударным волнам вблизи резонансов

Шайдуллин Л. Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КФУ

Эл. почта: liqn@mail.ru

Исследования волновой динамики в резонансных режимах, представляют собой одну из актуальных проблем, особенно в ограниченных однородных и многофазных средах, которые сопровождаются рядом нелинейных эффектов. При нелинейных колебаниях газа значительно интенсифицируются различные процессы тепло- и массообмена [1]. Результаты теоретических и экспериментальных исследований анализируются в обзорах [2, 3]. В основном изучались режимы безударно-волнового течения при малых амплитудах возбуждения газа [4] и с образованием ударных волн при больших амплитудах. Колебания газа создаваемые плоским поршнем на одном из концов трубы длиной 938 мм при переходе к ударным волнам при малых значениях амплитуд возбуждения практически не исследовался.

В настоящем цикле исследований на новой экспериментальной установке на базе виброгенератора фирмы TIRA vib 5220/LS с цифровой обработкой данных изучались различные газодинамические характеристики колебаний газа в закрытой и открытой трубах. Данные о колебаниях давления регистрировались пьезоэлектрическим датчиком модели 8530C-15 фирмы Bruel & Kjaer. Выяснились особенности процесса колебаний давления газа при переходе к ударным волнам. На основе полученных данных определялись изменения форм волн давления при переходе через резонанс, строились зависимости для амплитуд колебаний давления для разных частот и амплитуд возбуждения газа. Проводилось подробное изучение среднего течения газа термоанемометром в радиальном и осевом направлении с помощью координатника фирмы DISA в нелинейном волновом поле вблизи открытого конца трубы. Это позволило определить область возникновения вихревого движения газа при приближении к резонансу. Также исследовались особенности поля скоростей вне трубы и вдали от открытого её конца. Получены новые данные о нелинейных колебаниях газа в трубах в широком диапазоне частот и амплитуд возбуждения.

### Список литературы

1. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Болдырев А.М., Терлеев П.Н., Тепло- и массообмен в звуковом поле, Новосибирск: Наука. Сибир. Отд-е, 253 с., 1970;
2. Ilgamov M.A., Zaripov R.G., Galiullin R.G., Repin V.B., Nonlinear oscillations of gas in a tube, Applied Mechanics Reviews, V. 49, № 3, p. 137–154, 1996;
3. Зарипов Р.Г., Галиуллин Р.Г., Галиуллина Э.Р., Нелинейные колебания газа в трубах, Казань: Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, с. 19 – 35, 2001;
4. Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaydullin L.R., Drift of a flat particle at longitudinal oscillations of gas in an open tube, Journal of Physics: Conference Series, V. 567, 012042, 2014;

## Применение методов DDES и IDDES в сочетании с подсеточным масштабом, адаптированным к слоям смешения, к расчетам отрывных течений

Гусева Е. К.<sup>1</sup>, Гарбарук А. В.<sup>1</sup>, Стрелец М. Х.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: katia.guseva@inbox.ru

В настоящее время гибридные RANS-LES подходы к моделированию турбулентности, сочетающие в себе экономичность RANS в пристенной области течения и высокую точность LES вне ее, находят все большее применение в различных отраслях промышленности. Среди гибридных RANS-LES методов наиболее популярным является метод моделирования отсоединенных вихрей (DES, [1]) и его модификации. Однако при их применении к течениям с умеренной отрывной зоной зачастую происходит сильное затягивание развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в оторвавшихся слоях смешения и перехода в них к развитому турбулентному течению [2], что приводит к значительному снижению точности расчета.

Для устранения этого недостатка в работе [3] было предложено новое определение линейного подсеточного масштаба турбулентности  $\Delta_{SLA}$ , адаптированного к слоям смешения. Масштаб  $\Delta_{SLA}$  построен с учетом возможной анизотропии расчетных сеток, и в квазидвумерных течениях его определение не включает в себя размер сетки в направлении, поперечном плоскости развития течения. Кроме того, с помощью специальных кинематических параметров, идентифицирующих начальные участки слоев смешения, масштаб  $\Delta_{SLA}$  дополнительно уменьшается в этих областях. Замена традиционного подсеточного масштаба на  $\Delta_{SLA}$  приводит к существенному снижению уровня подсеточной вязкости на начальных участках слоев смешения, что, в свою очередь, существенно ускоряет развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

Цель настоящей работы — всестороннее тестирование нового подсеточного масштаба  $\Delta_{SLA}$ , оценка его эффективности для расчета задач внешней аэродинамики и проверка его совместимости с различными гибридными подходами к моделированию турбулентности. В частности, представлены результаты применения методов DDES [4] и IDDES [5], построенных на основе моделей SA [6] и SST [7], в сочетании с масштабом  $\Delta_{SLA}$  к расчетам ряда отрывных течений.

Показано, что при расчете течений с умеренной отрывной зоной применение нового масштаба в рамках метода DDES существенно увеличивает точность предсказания средних и пульсационных характеристик потока. В то же время на результаты IDDES новый масштаб влияет слабо, поскольку в рассмотренных задачах оригинальная версия IDDES практически не затягивает RANS-LES переход в оторвавшемся слое смешения.

В течениях около плохообтекаемых тел, для которых характерно образование крупных отрывных зон, применение нового масштаба почти не влияет на средние характеристики течения, поскольку в таких течениях имеет место крупномасштабная неустойчивость со структурами типа дорожки Кармана, и ускорение развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в возникающих слоях смешения не приносит принципиальных изменений в решение.

Таким образом, применение нового масштаба приводит к улучшению результатов там, где оригинальная версия метода не может точно предсказать характеристики

течения вследствие затянутого RANS-LES перехода и не приводит к негативным побочным эффектам в остальных случаях.

Кроме того, при расчете квазидвумерных течений использование подсеточного масштаба  $\Delta_{SLA}$  независимо от выбора базовой модели снижает чувствительность обоих методов к размеру сетки в поперечном (гомогенном) направлении, что позволяет уменьшить вычислительные затраты примерно в 2 раза без потери точности.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-11-00060) с использованием ресурсов СПб Филиала МСЦ РАН (<http://scc.ioffe.ru/>).

#### Список литературы

1. Spalart P.R., Jou W.-H., Strelets M., Allmaras S.R., Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach, Proceedings of first AFOSR international conference on DNS/LES, Ruston, Louisiana, USA, C. 137–147, 1997;
2. Spalart P.R., Detached-eddy simulation, Annual Review of Fluid Mechanics, T. 41, № 1, C. 181–202, 2009;
3. Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., Travin A.K., An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows, Flow Turbulence and Combustion, T. 95, 2015;
4. Spalart P. R., Deck S., Shur M. L., Squires K. D., Strelets M. Kh., Travin A., A New Version of Detached-eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, T. 20, №3, C. 181-195, 2006;
5. 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, T. 26, №6, C.1638-1649, 2008;
6. Spalart P.R., Allmaras S.R., A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA, AIAA paper 92–0439, 1992;
7. Menter F.R., Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, T. 32, № 8, C. 1598–1605, 1994;

## **Приближенный полуэмпирический метод определения трения осесимметричных тел**

*Нестеренко Е. А.<sup>1</sup>, Бондарев А. Е.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша

Эл. почта: [nesterenko\\_ea@bk.ru](mailto:nesterenko_ea@bk.ru)

В работе рассматривается приближенный полуэмпирический подход для оценки сопротивления трения и характерных толщин (толщины пограничного слоя, толщины вытеснения, толщины потери импульса).

Данный метод может быть использован для верификации разностных схем и численных методов, а также настройки моделей турбулентности.

В 60-е годы XX века Л.В. Козловым [1-3] был проделан ряд экспериментов для определения коэффициента трения в турбулентном пограничном слое на пластине. Позднее эта методика была обобщена В.С. Авдеевским [4] на случай осесимметрич-

ных тел. В своих работах он ввел понятие эффективной длины. Эффективная длина – это длина плоской пластины, на которой при внешнем течении с такими же параметрами, как и в рассматриваемой точке обтекаемого тела, нарастает такой же пограничный слой с аналогичными свойствами. Введение этого понятия позволило применить зависимости, полученные Л.В. Козловым, к телам вращения с криволинейной образующей.

В данной работе на языках FORTRAN и C# был написан самостоятельный программный модуль, который, использует газодинамические величины, полученные в других программных модулях при расчете сложных газодинамических задач. По оценке коэффициента трения, полученного в написанном модуле, можно сделать выводы о корректности выбора или реализации численной схемы и модели турбулентности.

Местный коэффициент трения для пластины можно определять с помощью следующей аппроксимирующей формулы:

$$C_f = C_1 Re_x^{c_2} (1 + 0.72 r \frac{\gamma - 1}{2} M_w^2)^{c_3},$$

где  $r \approx 0.88$ ;  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  – соотношение удельных теплоемкостей;  $M_w = \frac{u_w}{a_w}$  – местное число Маха на теле,  $u_w$  и  $a_w$  – значение скорости потока и скорости звука на внешней границе пограничного слоя, соответственно. Коэффициенты  $C_i$  получены из экспериментальных зависимостей.

В этих формулах  $Re_x = \frac{\rho_w u_w x}{\mu_w}$  – это местное число Рейнольдса, вычисляемое по длине пластины  $x$  в каждой точке пластины;  $\mu_w$  – коэффициент динамической вязкости;  $\rho_w$  – значение плотности на внешней границе пограничного слоя.

Для определения местного коэффициента трения на теле вращения число Рейнольдса высчитывается по эффективной длине  $Re_{x_{ef}} = \frac{\rho_w u_w x_{ef}}{\mu_w}$ . Где эффективная длина вычисляется следующим образом:

$$x_{ef} = \frac{\int_0^{l^*} \rho_w u_w R^{c_4} dl}{\rho_w u_w R^{c_4}}$$

$l^*$  — точка рассматриваемого тела вращения.

Суммарный коэффициент трения тела вращения будет выглядеть следующим образом:

$$C_\tau = \frac{W}{0.5 \rho_{oc} u_{oc}^2 S} = \frac{\int_0^S \tau_w dS \cos \alpha}{0.5 \rho_{oc} u_{oc}^2 S} = \frac{\int_0^S C_f dS \cos \alpha}{S}$$

здесь  $\rho_{oc}$  и  $u_{oc}$  – плотность и скорость в набегающем потоке соответственно;  $S$  – характерная площадь (площадь миделя тела или площадь боковой поверхности);  $W$  – суммарная сила трения;  $C_f$  – местный коэффициент трения;  $\alpha$  – угол между осью OX и касательной к поверхности рассматриваемого тела.

Рассматриваемый подход можно использовать для тел под нулевым и малыми углами атаки. В случае малых углов атаки на поверхности тела с некоторым шагом строятся линии тока. Далее к каждой линии тока применяется рассмотренный под-

ход. Таким образом получается распределение местного коэффициента трения. Интегрированием же получаем суммарный коэффициент трения.

#### Список литературы

1. Козлов Л.В. Экспериментальное исследование поверхностного трения на плоской пластине в сверхзвуковом потоке при наличии теплообмена // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1963. №2. С.11-20;
2. Козлов Л.В. Экспериментальное определение закона теплообмена для турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке // Исследование теплообмена в потоках жидкости и газа. М.: Машиностроение. 1965. С. 91-109;
3. Козлов Л.В. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. М.: Машиностроение, 1971. 380 с.;
4. Авдучевский В.С. Метод расчета пространственного турбулентного пограничного слоя в сжимаемом газе // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1962. №4. С.3-13;
5. Бондарев Е.Н и др. Аэрогидромеханика М.: Машиностроение, 1993. 608 с.;
6. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. М.: «Высшая школа», 1976;

## **Настройка $k-\omega$ SST модели турбулентности для расчета обтекания аэродинамических профилей при углах атаки в окрестности срыва потока**

*Матюшенко А. А.<sup>1</sup>, Гарбарук А. В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: alexey.matyushenko@gmail.com

Задача точного определения аэродинамических характеристик крыловых профилей крайне важна как для авиационной промышленности и ветроэнергетики, так и для энергомашиностроения. Расчеты этих характеристик выполняются, как правило, в рамках осредненных уравнений Рейнольдса в сочетании с полуэмпирическими моделями турбулентности. Однако, даже при использовании наиболее совершенных из них, наблюдается систематическое значительное завышение максимального коэффициента подъемной силы и критического угла атаки, при котором происходит срыв потока на стороне разряжения, по сравнению с экспериментальными данными. Это является очередным подтверждением общепризнанного несовершенства полуэмпирических моделей турбулентности и ограниченности их области применимости.

Следует отметить, что при рассматриваемых режимах обтекания на верхней поверхности крылового профиля (сторона разряжения) происходит отрыв пограничного слоя под воздействием неблагоприятного градиента давления. Положение точки отрыва и, как следствие, аэродинамические характеристики сильно зависят от выбранной модели турбулентности. Одним из возможных путей повышения точности расчета аэродинамических характеристик является специальная настройка полуэмпирических моделей турбулентности для рассматриваемого класса течений. Настоящая работа посвящена именно такой настройке модели турбулентности  $k-\omega$  SST [1].

Предварительные расчеты показали, что для решений двумерных уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи  $k-\omega$  SST модели турбулентности Ментера, характерна существенная недооценка размера отрывной зоны, что и приводит к завы-



шению коэффициента подъемной силы. Проведенная оценка чувствительности положения точки отрыва к изменению различных констант модели показала, что даже относительно незначительное уменьшение константы  $a_1 = 0.31$  до значения 0.28 приводит к существенному улучшению согласования с экспериментом.

В работе рассмотрены пять крыловых профилей S805, S809, S827, DU-96-W-180 и NASA-4412, различной толщины (от 12% до 21%) и формы. Их обтекание в широком диапазоне углов атаки было исследовано экспериментально [2-6] в аэродинамических трубах с низким уровнем турбулентности ( $I < 1\%$ ). Во всех случаях эксперименты проводились при высоком числе Рейнольдса ( $Re > 10^6$ ), что позволяет не принимать во внимание ламинарно-турбулентный переход [7] и при проведении расчетов использовать допущение о полностью турбулентном режиме течения. Поскольку числа Маха в экспериментах не превышали 0.15, в расчетах использовалась несжимаемая постановка задачи. Расчеты проводились на структурированных сетках С-типа, удовлетворяющих общепринятым критериям для подобных течений и обеспечивающих сеточно-независимое решение.

Результаты расчетов продемонстрировали убедительное преимущество модифицированной модели над оригинальной версией. Так, аэродинамические характеристики исследуемых профилей хорошо согласуются с экспериментом в широком диапазоне углов атаки ( $0^\circ - 30^\circ$ ). В частности, ошибка в предсказании максимального коэффициента подъемной силы не превышает 5%.

Следует, однако, отметить, что изменение константы  $a_1$  приводит к снижению точности расчета базовых турбулентных течений, на которых производилась настройка констант оригинальной версии модели SST. В частности, при расчете турбулентного пограничного слоя ошибка в определении коэффициента трения достигает 25%, что в очередной раз подтверждает несовершенство полумпирических моделей турбулентности, одинаково хорошо подходящих для всех типов течений.

Расчеты проведены при поддержке Санкт-Петербургского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (СПбФ МСЦ РАН) (<http://scc.ioffe.ru/>)

#### Список литературы

1. Menter F. R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598–1605, 1994;
2. Somers D. M., Design and Experimental Results for the S805 airfoil, NREL/SR-440-6917, 1997;
3. Somers D. M., Design and Experimental Results for the S827 Airfoil, NREL/SR-500-36345, 2005;
4. Somers D. M., Design and Experimental Results for the S809 Airfoil, NREL/SR-440-6918, 1997;
5. W.A. Timmer, R.P.J.O.M. van Rooij, Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils, 41 Aerospace Sciences Meeting, Paper no. AIAA-2003-0352, January, 2003;
6. Wadcock A.J., Investigations of low-speed turbulent separated flow around airfoils, NASA CR 177450, 1987;
7. Carmichael B. H., Low Reynolds Number Airfoil Survey, NASA, 1981;

## Относительные концентрации молекул $H_2$ , HD, $D_2$ в тлеющем и дуговом разрядах низкого давления в водородно-дейтериевых смесях

Жуков А. С.<sup>1</sup>, Лавров Б. П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: al.s.zhukov@yandex.ru

В нашей недавней статье [1] показано, что в рамках простых кинетических моделей можно найти связь относительных концентраций молекул  $H_2$ , HD и  $D_2$  с относительными интенсивностями спектральных линий серии Бальмера атомов водорода и дейтерия (модели 1a и 1b для случаев достаточно высокой и достаточно низкой степени диссоциации молекул в плазме), а также линий Q-ветвей диагональных полос  $\alpha$ -системы Фулхера этих изотопологов молекулы водорода (модель 2). В настоящей работе показано, что спектроскопические методики, основанные на этих моделях, могут быть использованы для измерения относительных концентраций молекул  $H_2$ , HD и  $D_2$  в неравновесной водородно-дейтериевой плазме по измеренным относительным интенсивностям линий.

Экспериментальная проверка работоспособности методик проводилась путем измерения эмиссионных спектров плазмы тлеющего (в дейтерии с малой примесью водорода) и капиллярно-дугового (в смеси сравнимых количеств  $D_2$ ,  $H_2$  и Ne) разрядов при давлениях 6-8 торр и плотностях тока 0.4 и 8.5-17 А/см<sup>2</sup> соответственно. Использовался спектрометр высокой разрешающей силы с цифровой фоторегистрацией на базе спектрографа ДФС-8 [2]. В отличие от [2] в качестве фотодетектора использована более совершенная камера CANON EOS 600D. Распределения интенсивности измерялись в диапазоне длин волн 594-627 нм (диапазон волновых чисел 15940-16840 1/см), а также в окрестностях линий серии Бальмера атомов водорода ( $H\alpha$ ,  $H\beta$  и  $H\gamma$ ) и дейтерия ( $D\alpha$ ,  $D\beta$  и  $D\gamma$ ).

Отношения интенсивностей Q-линий разных изотопологов ( $H_2/D_2$  и HD/ $D_2$ ) находились методом условной оптимизации [3]. Измеренное распределение интенсивности на участке спектра (шириной 0.5-1.5 нм) аппроксимировалось суммой конечного числа контуров спектральных линий. Анализ одиночных спектральных линий показал, что для описания спектра тлеющего разряда наиболее подходящей является аппроксимация контуров линий функцией Фойхта. В случае дугового разряда оказалось достаточно использовать функцию Гаусса. По всей видимости, это связано с увеличением температуры излучающих молекул и влияния доплеровского уширения на форму контуров спектральных линий. Оптимальные наборы параметров аппроксимации (значение фонового сигнала, положения, ширины, интенсивности линий в центре) находились путем минимизации функционала среднеквадратичной невязки в многомерном пространстве искомых параметров. Газовая температура плазмы, необходимая при использовании модели 2 измерялась по методике, предложенной в работе [4].

Результаты оценки относительных концентраций молекул  $H_2$ , HD,  $D_2$  в исследуемых плазмах показали согласие между оценками, основанными на моделях 1b и 2, в то время как оценка с помощью модели 1a находится с ними в значимом противоречии. Заметим также, что это позволяет вынести косвенное суждение о низкой степени диссоциации молекул, что является ожидаемым результатом, так как излучаю-

щая плазма расположена в основном внутри металлического капилляра, на поверхности которого должен активно идти процесс ассоциации атомов в молекулы.

Рассмотренные методики полностью независимы, ибо основаны на рассмотрении различных физических процессов, используют различные экспериментальные данные и не содержат подгоночных параметров. Совместное использование двух независимых методик позволяет оценивать их применимость в конкретных условиях. В принципе они могут быть обобщены и на случай плазмы в дейтерий-тритиевых смесях.

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант №13-03-00786а).

#### Список литературы

1. Lavrov B.P., Zhukov A.S., Spectroscopic Determination of the Relative Concentrations of H<sub>2</sub>, HD, and D<sub>2</sub> Molecules in Nonequilibrium Hydrogen–Deuterium Plasma: I. Kinetic Models, Russian J. of Physical Chemistry B, v. 8, n. 6, p. 807-815, 2014;
2. Lavrov B.P., Mikhailov A.S., Umrikhin I. S., High-resolving-power spectrometer with digital photorecording, based on the DFS-8 Spectrograph, Journal of Optical Technology, v. 78, n. 3, p. 180-186, 2011;
3. Lavrov B.P., Zhukov A.S., Umrikhin I. S., Observation of the fine structure for rovibronic spectral lines in the visible part of emission spectra of D<sub>2</sub>, PHYSICAL REVIEW A, v. 85, art. 052505 (6pp.), 2012;
4. Lavrov B.P., Determination of the gas temperature of a low-pressure plasma from the intensities of the H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> molecular bands. Relationship between the intensity distribution in a band and the gas temperature, Optics and Spectroscopy, v.48, n.4, p.375-380, 1980.

## Исследование взаимодействия сверхзвукового потока воздуха с поперечным импульсным разрядом

Монахов Н. А.<sup>1</sup>, Бобашев С. В.<sup>1</sup>, Белик В. П.<sup>1</sup>, Петренко М. В.<sup>1</sup>, Попов П. А.<sup>1</sup>, Сахаров В. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: nm1988@mail.ru

Исследование взаимодействия высокоскоростных потоков газа с низкотемпературной плазмой является одним из актуальных направлений магнитоплазменной аэродинамики [1-2]. Данная работа является продолжением цикла исследований, посвященного изучению особенностей взаимодействия сверхзвуковых течений с низкотемпературной плазмой [3-4] и посвящена изучению особенностей взаимодействия сверхзвуковых струйных течений с плазмой газового разряда.

Экспериментальные исследования были проведены на импульсной газодинамической установке на основе вакуумной камеры цилиндрической формы с внутренним диаметром 0.5 м и высотой 0.4 м оборудованной форвакуумным насосом и наблюдательными окнами для спектроскопической диагностики. Выходное сечение конического сопла, формирующего сверхзвуковой поток, расположено внутри вакуумной камеры. Дозвуковая часть сопла отделена от атмосферы пластиковой диафрагмой.

Система из двух алюминиевых электродов подключена к импульсному источнику питания и позволяет создавать разряд, поперечный по отношению к сверхзвуковому потоку. Импульсный источник питания позволяет получить импульс тока длительностью  $t \sim 1$  ns, близкий к прямоугольному, ток в цепи разряда достигал  $I = 1.7$  kA, суммарная энергия, вкладываемая в разряд, варьировалась в пределах  $250 \div 700$  J, в зависимости от начального напряжения на источнике. Последовательно в цепь разряда включен высоковольтный трансформатор малой индуктивности, формирующий импульс длительностью  $t \sim 10^{-6}$  s и амплитудой до  $U \sim 30$  kV для иницирования газового разряда.

Перед экспериментом камера откачивается до остаточного давления порядка 0.1 Торр. После разрушения диафрагмы начинается истечение атмосферного воздуха в камеру через сопло. Запуск источника питания осуществляется спустя  $t = 200$  ns после разрушения диафрагмы, когда течение в сверхзвуковом сопле можно считать установившимся. В этот момент на центральный и внешний электроды подается высоковольтный иницирующий импульс, формирующий начальную область разряда. Далее, через сформированный канал в течение времени  $t \approx 1$  ns происходит разрядка основной батареи. По результатам расчета невязкого течения в сопле число Маха в плоскости среза сопла составляет величину  $M \approx 5.5$ , давление  $P \approx 0.1$  Торр. За время горения разряда ( $t \approx 1$  ns) давление в вакуумной камере повышается не более чем в два раза. При таком соотношении давлений не происходит отрыва сверхзвукового потока в сопле, а его структура близка к расчетной.

В данной работе особенности взаимодействия сверхзвуковой струи с разрядом исследовались с помощью спектроскопической диагностики в видимом диапазоне длин волн. Регистрировались участки спектра излучения шириной 100 nm из областей на расстоянии 30, 50, 70 и 90 mm от среза сопла и лежащих на линии, расположенной посередине между электродами. Регистрация спектров осуществлялась с помощью монохроматора Сейя-Намиока, оснащенного ПЗС-линейкой TOSHIBA TCD1304DG. Минимальное время накопления заряда для данного типа линеек  $t \approx 20$  ns позволяло регистрировать только интегральные по времени спектры излучения. Калибровка спектрометра по длинам волн производилась по линиям Ne I из базы данных NIST Atomic Spectra Database [5], погрешность определения длины волны во всем регистрируемом диапазоне составила не более 0.01 nm.

Регистрация спектров излучения разряда при сверхзвуковом истечении газа из сопла и условиях неподвижного газа в вакуумной камере при давлениях 0.1 Торр и 10 Торр производилась в диапазоне длин волн 600–700 nm. Выбор диапазона обусловлен особенностями применяемого спектрального прибора, а также присутствием в нем небольшого количества линий излучения материала электродов (Al) и линий газов (N, O).

Полученная спектральная картина излучения позволяет сделать вывод о том, что область разряда сносится набегающим потоком и осуществляется заметный вынос материала электродов на расстояние, сравнимое с поперечным размером сверхзвуковой струи. Отсутствие в спектрах излучения из областей, удаленных от среза сопла на расстояние 50–90 mm, линий, соответствующих ионам азота и кислорода, а также свечение в непрерывном спектре с максимумом на длине волны  $\lambda \approx 640$  nm говорит о том, что происходит нагрев сверхзвукового потока без его заметной ионизации.

## Список литературы

1. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Nonequilibrium Plasma Aerodynamics. Aeronautics and Astronautics (Mulder M. (ed.)). InTech, 2011;
2. Adamovich I.V. Plasma Dynamics and Flow Control Applications. Encyclopedia of Aerospace Engineering. John Wiley & Sons Ltd, 2010;
3. Бобашев С.В., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А. Экспериментальное исследование магнитогидродинамического воздействия на тепловой поток к поверхности модели. Журнал технической физики. Т. 80, № 12. С. 51–56, 2010;
4. Бобашев С.В., Менде Н.П., Монахов Н.А., Сахаров В.А. Экспериментальное исследование динамики газового разряда в соленоидальном магнитном поле. Журнал технической физики. Т. 82, № 12. С. 29–32, 2012;
5. NIST Atomic Spectra Database // <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>;

## Сравнение поправок на кривизну линий тока и вращение потока для k- $\omega$ SST модели

Стабников А. С.<sup>1</sup>, Гарбарук А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: an.stabnikov@gmail.com

Несмотря на нарастающую в последние годы популярность гибридных методов расчета турбулентных течений, в инженерных расчетах по-прежнему наиболее широко применяется решение уравнений Рейнольдса. Этот подход, используя доступные вычислительные ресурсы, зачастую позволяет предсказать требуемые характеристики рассматриваемого течения с приемлемой для практики точностью. Чаще всего для замыкания уравнений Рейнольдса используются полуэмпирические модели турбулентной вязкости (EVM), основанные на гипотезе Буссинеска, постулирующей линейную связь между производными средних значений скорости и тензором рейнольдсовых напряжений. Такая популярность EVM обусловлена их простотой, устойчивостью, а также экономичностью в плане вычислительных ресурсов по сравнению с более сложными моделями рейнольдсовых напряжений. К сожалению, все полуэмпирические модели турбулентности не универсальны, однако некоторые их дефекты носят систематический характер и могут быть исправлены при помощи введения в модели соответствующих поправок.

В частности, именно так обстоит дело с течениями, в которых вращение потока или кривизна линий тока оказывают существенное влияние на характеристики турбулентности. Так, для модели турбулентной вязкости с одним уравнением SA [1] Спалартом и Шуром была разработана поправка на кривизну и вращение [2], опирающаяся на два кинематических критерия

$$r^* = \bar{S} / \bar{\Omega}, \tilde{r} = \left[ 2\Omega_{ik} S_{jk} (D\bar{S} / Dt)_{ij} \right] / D^4,$$

где  $\bar{S} = 2\sqrt{S_{ij}S_{ij}}$  и  $\bar{\Omega} = 2\sqrt{\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$  — инварианты тензоров скоростей деформаций  $S_{ij}$  и завихренности  $\Omega_{ij}$ , а  $D^2 = \max\{\bar{S}^2, 0.09\omega^2\}$ , где  $\omega$  — удельная скорость диссипации.

Ментер и Смирнов [3] адаптировали поправку Спаларта-Шура для применения совместно с  $k-\omega$  моделью Ментера SST [4]:

$$f_{r1,MS} = \max \{ \min \{ 1.25, f_{r1} \}, 0.0 \},$$

где  $f_{r1} = (1 + c_{r1}) \frac{2r^*}{1 + r^*} (1 - c_{r3} \tan^{-1}(c_{r2} \tilde{r})) - c_{r1}$ , а константы равны  $c_{r1} = 1, c_{r2} = 2, c_{r3} = 1$ .

Следует отметить, что в широком диапазоне критериев (1) значение функции (2) определяется ограничителями и принимает значения 0 или 1.25, следствием чего является отсутствие чувствительности модели к усилению или ослаблению эффектов кривизны и вращения.

В работе [5] на основе анализа результатов LES вращающегося сдвигового слоя была предложена модификация поправки Ментера-Смирнова (2)

$$f_{r1,mod} = \max \{ f_{r1}, 0.0 \},$$

где  $f_{r1} = (1 + c_{r1}) \frac{1 + c_{r4}}{1 + c_{r4} |r^* - 2|} (1 - c_{r3} \tan^{-1}(c_{r2} \tilde{r})) - c_{r1}$ ,

$c_{r1} = 0.4, c_{r2} = 4.0, c_{r3} = 0.6, c_{r4} = 0.1$ .

Результаты расчетов, представленные в [5], демонстрируют улучшение согласования с LES при использовании (3), в частности, эволюция кинетической энергии турбулентности воспроизводится достаточно точно в широком диапазоне чисел Рос-сби. Это, однако, является недостаточным доказательством преимущества модифицированной поправки (3) над (2) и для выяснения этого обстоятельства требуется тщательное тестирование на широком круге течений, чему и посвящена настоящая работа.

В работе рассмотрен широкий круг внутренних и внешних течений, в которых существенную роль играют эффекты кривизны и вращения и для которых имеются надежные результаты физического и численного эксперимента. В частности, рассмотрено течение в плоском вращающемся канале при различных режимах (скоростях вращения), соответствующих прямому численному моделированию [6]. В качестве примера задачи с существенным влиянием кривизны линий тока было рассмотрено течение в канале с поворотом на  $180^\circ$  и проведено сравнение результатов с экспериментальными данными [7]. Кроме того, были рассмотрены задачи о течении в канале с поворотом на  $30^\circ$  [8], о сходе концевой вихря с кромки крыла [9] и другие.

Результаты проведенного тестирования показали, что предложенная поправка (3) во многих случаях обеспечивает лучшее по сравнению с поправкой Ментера-Смирнова (2) согласие с экспериментальными данными (профили скорости в течении во вращающемся канале, напряжение на стенке в течении в канале с поворотом на  $180^\circ$ ), а в остальных случаях ей не уступает.

Расчеты проведены при поддержке Санкт-Петербургского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (СПбФ МСЦ РАН) (<http://scc.ioffe.ru/>)

#### Список литературы

1. Spalart P.R., Shur M. L., On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature. *Aerospace Science and Technology*, 1(5), 297–302, 1997;
2. Spalart P.R., Allmaras S.R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA Paper 92-0439*, 1992;

3. Smirnov P.E., Menter F.R., Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart–Shur Correction Term. *Journal of Turbomachinery*, 131, 041010, 2009;
4. Menter F.R., Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *AIAA Paper 93-2906*, 1993;
5. Стабников А.С., Гарбарук А.В., Модификация поправки на кривизну линий тока и вращение в модели SST на основе LES вращающегося сдвигового слоя, XX Школа-Семинар для молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», Тезисы докладов, сс. 71-72, 2015;
6. Kristoffersen R., Andersson H.I., Direct Simulation of Low-Reynolds-Number Turbulent Flow in a Rotating Channel, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 256, pp. 163–197, 1993;
7. Monson D.J., Seegmiller H.L., Mc Connaughey P. K., Chen Y. S., Comparison of Experiment with Calculations Using Curvature-Corrected Zero and Two Equation Turbulence Models for a Two-Dimensional U-Duct, *AIAA Paper 90-1484*, 1990;
8. Smits A.J., Young S.T. B., Bradshaw P., The effect of short regions of high surface curvature on turbulent boundary layers, *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 94, Issue 02, pp. 209- 242, 1979;
9. Chow J.S., Zilliac G.G., Bradshaw P., Mean and Turbulence Measurements in the Near Field of a Wingtip Vortex, *AIAA J.* 35, No. 10, pp. 1561-1567, 1997;

## **Моделирование лазерной плазмой процессов генерации Альфвеновских и бесстолкновительных ударных волн в космической плазме**

*Прокопов П. А.<sup>1</sup>, Бояринцев Э. Л.<sup>1</sup>, Захаров Ю. П.<sup>1</sup>, Мелехов А. В.<sup>1</sup>,  
Пономаренко А. Г.<sup>1</sup>, Посух В. Г.<sup>1</sup>, Тищенко В. Н.<sup>1</sup>, Шайхисламов И. Ф.<sup>1</sup>,  
Терехин В. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ИЛФ СО РАН

<sup>2</sup>ВНИИЭФ

Эл. почта: paprok312@gmail.com

Впервые в модельных экспериментах с лазерной (и фоновой) плазмой исследованы процессы генерации Альфвеновских Волн (АВ) вдоль внешнего магнитного поля  $B_0$  и Бесстолкновительных Ударных Волн (БУВ) поперек него. На основе сравнения данных лабораторного и численного моделирования (по гибридной модели и 2-жидкостной, ион-ионной МГД-модели), установлен единый физический, так называемый Магнитный Ламинарный Механизм (МЛМ) бесстолкновительного взаимодействия сгустков Взрывающейся Плазмы (ВП) с замагниченной фоновой плазмой. Такое универсального типа МЛМ-взаимодействие приводит к генерации АВ, распространяющихся вдоль внешнего поля и возбуждаемых сильными  $B_\phi$ -полями (в цилиндрических координатах, с осью  $Z$  вдоль  $B_0$ ) на границе магнитной каверны ВП (радиусом  $R_c$ ). Поперек  $B_0$  за счет МЛМ происходит торможение ионов ВП и ускорение (в начале) ионов фона индукционным электрическим полем  $E_\phi$ , переходящее

в его сильное возмущение на масштабах  $> R_*$ , в случае достаточно большого значения МЛМ-параметра  $\delta = R_*^2 / R_L R_L^* \gg 1$  (определяемого по ларморовским радиусам  $R_L$  и  $R_L^*$  ионов ВП и фона соответственно). В данной работе представлены результаты серии экспериментов, проведенной на стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН: высоковакуумная камера длиной 5 м и диаметром 1,2 м, с внешним магнитным полем  $B_0$  до 500 Гс вдоль оси камеры. Генерация фоновой плазмы источником типа  $\theta$ -пинча, ВП – фокусировкой  $\text{CO}_2$ -лазерного импульса на плоской полиэтиленовой мишени, расположенной перпендикулярно полю  $B_0$ . В результате первой серии экспериментов при  $\delta \sim 0.3$  (и кинетической энергии  $E_k \approx 30$  Дж квазисферических облаков лазерной плазмы), впервые была подтверждена возможность МЛМ-генерации сильных возмущений фона, движущихся с магнитозвуковой скоростью поперек  $B_0$ . Регистрация ионов фона и их отделение от ионов ВП проводилась с помощью Ленгмюровских зондов [1]. В данной работе приводятся данные о впервые полученных в лаборатории БУВ, генерируемых при  $\delta \sim 1-2$  сгустками лазерной плазмы с числами Альфвена-Маха  $M_A \sim 10$  и эффективной энергией  $E_0 \approx 4\pi E_k \sim 1000$  Дж (эффективная энергия — фиктивная величина, описывающая энергию сферически симметричного разлета ВП, тогда как в эксперименте ВП движется от мишени в конусе с раствором  $\sim 1$  ср), на масштабе  $\sim 1$  м диаметра высоковакуумной камеры, при концентрации водородной фоновой плазмы до  $\sim 3 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. В подобных условиях, но при малых  $M_A \sim 2$  была исследована генерация, структура и динамика Альфвеновских Волн (а также вистлеров) [2, 3], распространяющихся вдоль  $B_0 \sim 100-500$  Гс до масштабов  $\sim 2,5$  м с длиной волны  $\lambda \sim 0.5$  м.

#### Список литературы

1. Zakharov Y.P., Antonov V.M., Shaikhislamov I.F., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Vchivkov K.V., Prokopov P.A., Experimental Design and Probe Diagnostics for Simulation of AMS02-Magnet'effects in Ionospheric Plasma Flow Near International Space Station, Contributions to Plasma Physics, Vol. 51, Iss2-3, p. 182-186, 2011;
2. Dudnikova G.I., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., Vshivkov V.A., Zakharov Y.P., Laboratory and computer simulations of wave generation processes in non-stationary astrophysical phenomena, ESA Plasma Astrophysics, SP-311, p. 191-194;
3. Zakharov Y.P., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., Antonov V.M., Boyarintsev E.L., Melekhov A.V., Posukh V.G., Shaikhislamov I.F., Generation of Collisionless Shocks by Laser-plasma Piston in Magnetised Background: Experiment «BUW», Plasma Physics and Technology, 1, 1, p 1-3, 2014;



# Исследование особенностей перехода между LES и RANS областями при расчете пристенных турбулентных течений в рамках зонных RANS-LES подходов

Грицкевич М. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: gritskevich@yml.com

Одной из сложнейших проблем при построении зонных RANS-LES подходов является «сшивка» решения на границах между RANS и LES подобластями в случае ее пересечения потоком, при этом в зависимости от направления течения возможны два сценария: поток движется из RANS подобласти в LES (далее обозначается RANS-LES «интерфейс») или поток движется из LES подобласти в RANS (далее обозначается LES-RANS «интерфейс»).

Переход от RANS к LES наиболее сложен для моделирования, поскольку необходимая для LES моделирования информация о нестационарных турбулентных пульсациях отсутствует в RANS решении. Решению данной проблемы в последние годы посвящено большое количество работ [1], при этом самые современные методы позволяют с высокой степенью точности воспроизводить нестационарные турбулентные пульсации [2] и при этом могут использоваться в кодах общего назначения [3].

Практическая реализация перехода от LES к RANS, несмотря на кажущуюся простоту, сопряжена с целым рядом сложных технологических проблем. Так, нестационарные пульсации скорости должны иметь возможность покидать LES подобласть без отражения, при этом информация о среднем давлении в RANS подобласти должна иметь возможность распространяться вверх по потоку. Кроме того, необходимо каким-либо способом получить информацию о средней скорости и турбулентных масштабах для ее задания на входе в RANS подобласть. Следует отметить, что на основе анализа литературы [4] можно сделать вывод о недостаточной изученности существующих подходов к заданию граничных условий на LES-RANS интерфейсах, в частности, насколько известно автору, в настоящее время практически отсутствует всесторонняя и систематическая оценка их точности в случае их использования в кодах общего и специального назначения, что и обуславливает рассмотрение данного вопроса в настоящей работе.

Исследование способов перехода от LES к RANS осуществляется в рамках зонного RANS-LES подхода [5], в котором для создания турбулентных пульсаций на RANS-LES интерфейсах в уравнения движения добавляется объемный источник турбулентности (ОИТ) [5]. В рамках данного подхода уравнения переноса турбулентных масштабов решаются «насквозь», при этом в качестве базовой модели турбулентности используется либо модель переноса сдвиговых напряжений (Shear Stress Transport или SST-RANS) [6], либо основанный на SST модели метод моделирования адаптивных масштабов (Scale Adaptive Simulation или SST-SAS) [7]. Следует отметить, что выражения для турбулентной вязкости, входящей в уравнения баланса импульса, вычисляется на основе различных алгебраических соотношений в зависимости от используемого в подобласти метода. Так, в LES подобласти используется алгебраический аналог IDDES подхода [8], в то время как в RANS подобласти используются стандартные выражения для SST-RANS и SST-SAS моделей.

В качестве конкретных течений для тестирования зонного RANS-LES подхода [5] рассматриваются задачи о развитии течения в плоском канале и течение в погра-

ничном слое на плоской пластине, при этом для решения определяющих уравнений используется код общего назначения ANSYS-FLUENT [9].

Как следует из полученных результатов, рассматриваемые подходы позволяют сравнительно быстро переводить разрешенные турбулентные пульсации из LES области в RANS решение, однако для SST-RANS подхода наблюдается заметное завышение трения на стенке вблизи LES-RANS интерфейса с последующим искажением профилей осредненных характеристик вниз по потоку, в то время как для SST-SAS подхода данный дефект отсутствует, что позволяет рекомендовать его использование для расчета пристенных турбулентных течений в рамках зонных RANS-LES подходов.

Расчеты проведены при поддержке Санкт-Петербургского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (СПбФ МСЦ РАН) (<http://scc.ioffe.ru/>)

#### Список литературы

1. Fröhlich J., Von Terzi D. Hybrid RANS/LES Methods for the Simulation of Turbulent Flows // *Progress in Aerospace Sciences*. 2008. Vol. 44, № 5. P. 349–377;
2. Adamian D.Y., Travin A.K. Improved version of the synthetic eddy method for setting nonstationary inflow boundary conditions in calculating turbulent flows // *High Temperature*. 2011. Vol. 49, № 5. P. 704–711;
3. Mathey F. Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing-edge using a hybrid zonal RANS-LES // *Computers & Fluids*. 2008. Vol. 37. P. 836–843;
4. Sagaut P., Deck S., Terracol M. Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence. 2006;
5. Gritskevich M.S., Garbaruk A.V. Embedded large eddy simulation with the use of a volume source of turbulent fluctuations // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics (in Russian)*. 2012. Vol. 1(141). P. 27–36;
6. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model // *Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. 2003. P. 625–632;
7. Menter F.R., Egorov Y. The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description // *Flow Turbulence and Combustion*. 2010. Vol. 85, № 1. P. 113–138;
8. Shur M.L. et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2008. Vol. 29, № 6. P. 1638–1649;
9. Mathur S.R., Murthy J.Y. A pressure-based method for unstructured meshes // *Numerical Heat Transfer*. 1997. Vol. 32. P. 195–215;

## Релятивистский плазменный резонанс в неоднородной лазерной плазме

Метельский И. И.<sup>1</sup>, Ковалев В. Ф.<sup>2</sup>, Быченков В. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФИАН

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Эл. почта: metelski@lebedev.ru

Известно, что при взаимодействии лазерного излучения с неоднородной плазмой происходит линейная трансформация электромагнитной волны, приводящая к резонансному возрастанию потенциального электрического поля в окрестности критической плотности плазмы [1], стационарная структура которого, в линейном приближении, впервые была изучена в работах [1, 2]. Рост интенсивности лазерного излучения приводит к необходимости учета нелинейных эффектов при лазер-плазменном взаимодействии даже при нерелятивистских скоростях электронов плазмы. Нелинейные эффекты в окрестности плазменного резонанса играют существенную роль в процессах нелинейного поглощения и генерации гармоник в лазерной плазме [3]. С достигнутыми на сегодняшний день плотностями потока лазерного излучения, становится актуальной задача учета релятивистских эффектов при изучении явления плазменного резонанса.

В данной работе представлены результаты аналитического рассмотрения на основе метода ренормгрупповых симметрий [4] решения уравнений, описывающих релятивистские плазменные колебания в окрестности критической плотности плазмы. Найдена допускаемая группа симметрий для приближенной системы уравнений, полученной из системы уравнений Максвелла и холодной гидродинамики. В условиях линейного профиля плотности плазмы построено ренормгрупповое преобразование, позволяющее точно учесть релятивизм плазменных волн и определяющее два типа решений для возбуждаемых плазменных колебаний. Первый тип решений отвечает хорошо изученным ранее [5] нестационарным плазменным колебаниям, в случае которых опрокидывание профиля плазменной волны происходит за конечный период времени. Второй класс решений описывает стационарный режим плазменных колебаний с модулированной фазой. Для данного режима найдены пространственно-временное распределение и спектральные характеристики резонансно усиленного электрического поля. Показано, что спектры релятивистских электронных колебаний плазмы имеют степенной характер убывания в зависимости от номера гармоник. Также определена поглощаемая мощность поля в окрестности плазменного резонанса и проведено сравнение с нерелятивистской нелинейной теорией.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-02-31407-мол\_а, № 15-02-03042-а).

### Список литературы

1. Гершман Б.Н., Денисов Н.Г., Гинзбург В.Л., Распространение электромагнитных волн в плазме (ионосфере), Успехи физических наук, 61, стр. 561-612, 1957;
2. Давыдова Т.А., Динамика возбуждения, трансформации и распада поверхностных волн, Физика плазмы, 4, стр. 921, 1981;
3. Erokhin N.S., Moiseev S.S., Mukhin V.V., Theory of second-harmonic generation in an inhomogeneous hot plasma, Nuclear Fusion 14, p. 333-339, 1974;

4. Ковалев В.Ф., Ширков В.Д., Ренормгрупповые симметрии для решений нелинейных краевых задач, УФН, 178, стр. 849-865, 2008;
5. Буланов С.В., Есиркепов Т.Ж., Кандо М., Пирожков А.С., Розанов Н.Н., УФН, 183 № 5, 2013;

## **Влияние сопряженного теплообмена на тепловой поток в ударной трубе**

*Кузнецов Е. А.<sup>1,2</sup>, Поняев С. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: kn0egor@gmail.com

Ударные трубы находят широкое применение при изучении различных газодинамических процессов. Одним из них является изучение теплового потока от нагретого до высоких температур газа, что применяется, например, при градуировке датчиков теплового потока или испытании материалов аэрокосмических аппаратов на температурную прочность. Но, как показано в [1-3], при проведении такого экспериментального моделирования, когда нагрев газа проводится в зоне за отраженной ударной волной необходимо рассматривать процесс как неадиабатический, с учетом распространения тепла не только в рабочем газе, но и в материале трубы. При этом возникает задача сопряженного нестационарного теплообмена. Происходит формирование температурных пограничных слоев как в газе в окрестности торца ударной трубы, так непосредственно и в самом материале торца. Возникает сложное обратное течение газа в области торможения за отраженной волной, связанного как раз с потерями энергии через границы.

В данной работе проводится численное моделирование задачи распространения ударной волны в ударной трубе, ее отражения от торца, образования зоны торможения газа с высокой температурой. При этом в задаче учитывается сопряженный теплообмен и распространение тепла в стенках ударной трубы. Для описания течения газа используется система уравнений Эйлера, а нагрев стенки описывается уравнением теплопроводности. На поверхности газа и стенки трубы задаются условия сопряжения: равенство температур и тепловых потоков (так называемые граничные условия четвертого рода). Для скорости газа задается условие непроницаемости. В начальный момент времени температура в твердом теле совпадает с температурой газа до прихода ударной волны. Для решения ранее описанной системы уравнений использовался свободно распространяемый пакет численного моделирования OpenFOAM, который в рамках метода соделирования конечными объемами позволяет проводить операции со скалярными, векторными и тензорными полями.

Проведенное моделирование показывает возникновение обратного течения и сложной зависимости теплового потока на стенку трубы при учете сопряженного теплообмена. В работе приводятся данные о изменении теплового потока при учете сопряженного теплообмена и без него для различных скоростей ударной волны в ударной трубе. Показана важность учета теплопроводности материала стенки при использовании ударной трубы для испытаний материалов на тепловой поток при высоких температурах газа за отраженной ударной волной.

## Список литературы

1. Фишдон В., Влияние взаимодействия газа и твердой стенки на отражение ударной волны, докл. на III Всес. съезде по теоретич. и прикл. механ., М., 1968;
2. Sturtevant B., Slachmuylders E., End wall heat-transfer effects on the trajectory of a reflected shock-wave, Phys. Fluids, 7, №8, 1201-1207, 1964;
3. Кудиш И.И., Рыков В.А., Отражение ударной волны от твердой стенки, Журнал вычислительной математики и математической физики, 13, №5, 1973;

## Волны на релятивистском электронном пучке в плазме в режиме ионной фокусировки

Черненко Ю. С.<sup>1</sup>, Шейнман И. Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: julia-chernenco@yandex.ru

На основе полного электродинамического рассмотрения проанализированы волны на электронном пучке в разреженной плазме. Рассмотрен релятивистский цилиндрический электронный пучок радиуса  $R_b$ , движущийся со скоростью  $v = \beta c$  в неподвижной однородной плазменной среде, причем концентрация частиц в пучке превышает концентрацию электронов в плазме. При этом пучок полностью вытесняет электроны плазмы как из своего объема, так и из коаксиальной ему цилиндрической области нейтрализации радиуса  $R_n = \gamma R_b$ . По отношению к высокочастотным электронным колебаниям эта область выступает как вакуум. В отличие от работ [1-5], где исследовалась устойчивость пучка по отношению к его перемещению (изгибу) как единого целого относительно оси цилиндрического ионного канала, проанализировано его поведение при малых возмущениях концентрации электронов внутри пучка. Из условия непрерывности тангенциальных компонент напряженностей полей на границах пучка и области нейтрализации было получено дисперсионное уравнение для электромагнитных волн в системе. Исследован характер дисперсии волн в зависимости от параметров системы. Показано, что при прохождении ультрарелятивистского пучка электронов через разреженную плазму могут существовать поверхностные волны двух типов: высокочастотные на границе релятивистского пучка с областью нейтрализации и низкочастотные на границе области нейтрализации и неподвижной плазмы.

Анализ устойчивости волн, возбуждающихся на релятивистском пучке электронов, движущемся через разреженную плазму, проведен в случае ультрарелятивистских скоростей пучка. При этом дисперсионное уравнение распадается на два независимых уравнения, описывающих высокочастотные поверхностные волны на границе релятивистского пучка с областью нейтрализации и низкочастотные на границе области нейтрализации и неподвижной плазмы. Неустойчивость высокочастотных поверхностных волн может быть двух типов: аперiodической с близкой к нулю вещественной частью решения дисперсионного уравнения и нерезонансной неустойчивостью волн с нарастающей амплитудой. Для последней характерно существование критических параметров – радиуса пучка и номера низшей разрешенной моды.

При ультрарелятивистских скоростях радиус нейтрализации увеличивается, и для нулевой моды имеет место критическое значение радиуса пучка, выше которой нарастание волны отсутствует. При этом на передний план выходят высокомодовые неустойчивости. Наряду с нерезонансной и аperiодической неустойчивостями, может возникать резонансная неустойчивость высокочастотных поверхностных волн на ультрарелятивистском электронном пучке, связанная с возбуждением аксиально-несимметричных волн, инкременты которой возрастают с ростом номера моды.

#### Список литературы

1. E.P. Lee, Resistive hose instability of a beam with a Bennett profile, *Phys. Fluids*, 21(8), pp. 1327-1343, 1978;
2. M. Lampe, G. Joyce, S. P. Slinker, D. H. Wittum, Electron-hose instability of a relativistic electron beam in an ion-focusing channel, *Phys. Fluids B*, 5(6), pp. 1888-1901, 1993;
3. H. Lee Buchanan, Electron beam propagation in the ion-focused regime, *Phys. Fluids*, 30(1), pp. 221-231, 1987;
4. D.H. Wittum, Electromagnetic instability of the ion-focused regime, *Phys. Fluids B*, 4(3), pp. 730-739, 1992;
5. Колесников Е.К., Мануйлов А.С., Уравнение поперечной динамики релятивистского электронного пучка, распространяющегося в омическом плазменном канале и режиме ионной фокусировки, *ЖТФ*, 2015, т. 85, вып. 2, с. 8-11, 2015;

## Принцип максимальной хаотичности в теории развитой турбулентности: модель с предельно нарушенной чётностью

Куликов А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: orlangyr@gmail.com

Классический формализм Колмогорова [1] трёхмерной турбулентности при больших числах Рейнольдса ведёт к определённым выражениям для величин инерционного интервала. Одним из важнейших является «закон 5/3» для одномерного спектра турбулентных пульсаций:

$$E_1(k) = C_k W^{2/3} k^{-5/3}, \quad (1)$$

где  $W$  обозначает средний спектральный поток энергии, а константа, названная в честь Колмогорова, как предполагается, является универсальной. Изучению справедливости этого соотношения и различных следствий из него было уделено немало внимания с экспериментальной точки зрения; можно отметить классическую монографию [2] и обзор [3], охватывающий несколько десятков работ.

Хотя в целом экспериментальные данные хорошо согласуются с предсказаниями закона 5/3, некоторые свидетельствуют о слабой зависимости от волнового числа  $k$ . Такая зависимость может быть объяснена наличием малого отклонения от индекса 5/3 - так называемым аномальным скейлингом. Впервые идеи о возможном наличии такого отклонения были высказаны самим Колмогоровым [4]. Некоторые теоретические методы, связанные с применением современной ренормализационной группы

(РГ), также свидетельствуют в пользу существования аномального скейлинга. Стоит отметить, что классическая теория Колмогорова основывается на простых размерных соображениях и не позволяет ни проверить гипотезы о наличии аномального скейлинга (и тем более рассчитать показатель такого отклонения), ни предсказать точное значение. В связи с этим актуальной задачей является обоснование теории Колмогорова, определение области ее применимости и нахождение возможных поправок к этой теории, исходя из последовательной статистической теории, базирующейся на уравнении Навье–Стокса.

Естественным объектом описания с теоретической точки зрения в теории турбулентности является поле скорости. В то же время, методы теории поля активно развивались применительно к задачам теории элементарных частиц и квантовой теории поля, что привело к созданию мощного и хорошо разработанного аппарата в этой области. В связи с этим логичной и часто используемой является идея применить развитые методы КТП для описания турбулентности. Однако попытки построить модель турбулентности на основании КТП сопряжены с рядом трудностей, среди которых можно отметить крайне сильную инфракрасную сингулярность линии (пропагатора), следующую непосредственно из эксперимента, что приводит к очень сильным инфракрасным расходимостям диаграмм. В рамках применения КТП к турбулентности исследование нелинейных задач производится либо с использованием метода ренормализационной группы, либо с помощью уравнений согласования. Настоящая работа посвящена развитию второго из указанных подходов и продолжению анализа модели максимальной хаотичности, предложенной в работах [5] и [6]. Среди преимуществ предложенной в [5] модели стоит отметить отсутствие ИК-расходимостей, доказанное в работе [7].

В настоящей работе сформулирована модель предельно нарушенной чётности, аналогичная рассматриваемым в теории слабых взаимодействий. На основании уравнений согласования построена диаграммная техника и замкнутая система уравнений согласования на параметры модели, позволяющая определить константу Колмогорова. С помощью компьютерного счёта получены аналитические выражения для однопетлевых 1-неприводимых диаграмм модели. Решение уравнений согласования привело к колмогоровскому индексу степенной зависимости коррелятора полей скорости от волнового числа.

Проведён анализ ультрафиолетовых расходимостей двухпетлевых диаграмм модели. Продемонстрировано наличие аномального скейлинга (малого отклонения от колмогоровского индекса). С помощью компьютерного счёта получены аналитические выражения для главного порядка разложения двухпетлевых 1-неприводимых диаграмм модели по малому параметру. С помощью решения уравнений согласования в двухпетлевом приближении получены значения величины аномального скейлинга и константы Колмогорова.

#### Список литературы

1. Kolmogorov, A.N., 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluids for very large Reynolds numbers, Dokl. Akad. Nauk SSSR, vol. 30;
2. A.S. Monin, A.M. Yaglom, Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence, Dover, Mineola, NY, 2007;
3. K.R. Sreenivasan, Phys. Fluids, 7, 2778 (1995);
4. Kolmogorov, A.N., 1962, J. Fluid Mech. vol. 13;
5. Л.Ц. Аджемян, М.Ю. Налимов, ТМФ том 91 №2 (1992), 294-308;
6. L. Ts. Adzhemyan, M. Hnatic, M. Stehlic, J. Phys II France, 5:7 (1995), 1077-1092;

7. Л. Ц. Аджемян, М. Гнатич, М.В. Компаниец, ТМФ том 176 №1, 2013;

## **Исследование влияния акустических течений в газоразрядной камере на параметры тлеющего разряда**

*Фадеев С. А.<sup>1</sup>, Сайфутдинов А. И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>КФУ

<sup>2</sup>СПбГУ

Эл. почта: fadееv.sergei@mail.ru

В настоящее время тлеющий разряд нашел широкое применение в науке и технике. Особый интерес представляет возможность управления его параметрами с целью подведения их к условиям, необходимым для оптимального режима работы различных приборов и устройств (газоразрядные осветительные приборы, плазменные антенны, плазмохимические реакторы, газовые лазеры, установки для плазменной модификации материалов и изделий). Такое управление можно осуществлять с помощью акустических течений, возбуждаемых в поле акустической волны. Данная работа посвящена теоретическому исследованию влияния акустических течений на параметры тлеющего разряда в аргоне. Экспериментальные исследования [1] показали, что при высоких давлениях газа в разрядной камере при организации акустических течений происходит расконтрагирование положительного столба тлеющего разряда. Важным моментом в работе является построение теоретической модели взаимодействия разряда с акустическими течениями. Для этого сформулирована гибридная модель тлеющего разряда, основанная на уравнения неразрывности для концентраций заряженных частиц, уравнения баланса энергии электронов, уравнения баланса энергии тяжелых частиц (ионов и нейтральных частиц) и уравнении Пуассона для электрического потенциала [2]. Уравнения неразрывности и баланса энергий учитывают потоки, связанные с организованными в разрядной камере акустическими течениями. В результате численного решения получены пространственные распределения всех основных параметров тлеющего разряда в аргоне. Показано, что учет влияния акустических течений согласуется с экспериментальными данными и приводит к расконтрагированию положительного столба. Полученные результаты интересны как с фундаментальной точки зрения для исследования влияния гидродинамических потоков на параметры газоразрядной плазмы, так и с практической точки зрения для применения в газоразрядных лазерах.

### Список литературы

1. Арамян А.Р., Галечян Г.А., Вихри в газоразрядной плазме, УФН, Т. 177, № 11, С. 1207-1230, 2007;
2. Khashapov N.F., Saifutdinov A.I., Fadeev S.A., The model of the positive column of a glow discharge with the influence of the acoustic oscillations, Journal of Physics: Conference Series, V. 567, 012004, 2014;



## Применение рельсового ускорителя плазмы для нанесения проводящих покрытий

*Твердохлебов К. В.<sup>1</sup>, Поняев С. А.<sup>2</sup>, Жуков Б. Г.<sup>2</sup>, Бобашев С. В.<sup>2</sup>, Куракин Р. О.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбГТИ(ТУ)

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: k\_venom@mail.ru

В настоящее время существует множество областей науки и техники, в которых требуются прочные проводящие покрытия, и, поскольку для многих требующихся сочетаний «покрытие-подложка» получение недостаточно освоено, разработка новых способов получения проводящих покрытий является актуальной задачей [1, 2].

В данной работе исследовалась возможность применения рельсового ускорителя плазмы (рельсотрона) для нанесения проводящих покрытий. Обычно он применяется для ускорения макроскопических тел и получения сверхзвуковых струй плотной плазмы [3]. Рельсотрон с электродами из напыляемого материала или с медными электродами и накладками из напыляемого материала располагается в вакуумной камере, заполняемой аргоном или гелием при давлениях порядка 1-70 кПа. На некотором расстоянии от дульного среза рельсотрона под регулируемым углом располагается подложка. После инициации разряда в казенной части рельсотрона дуга между рельсами ускоряется, собирая материал рельс и формируя на выходе плазменную струю из напыляемого материала с температурой  $(5\div 20)\cdot 10^3$  К и скоростью до  $3\div 10$  км/с. Плазменная струя взаимодействует с подложкой, формируя покрытие. Напыление проводилось для комбинаций стекло — медь и стекло — углерод, при токах до 60 кА. Получены образцы медных и углеродных покрытий на стекле разной степени однородности и сплошности. Они были исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Исследования показали, что плазменная струя сильно взаимодействует с материалом подложки, качество и адгезия покрытий зависят не только от природы материалов, но и от параметров процесса напыления. Для сочетания медь-стекло сплошных равномерных покрытий не получено, получены равномерные углеродные покрытия, но они не обладают достаточной адгезией. Для усовершенствования технологии будут проводиться дальнейшие исследования.

### Список литературы

1. А.В. Рогов, К.Ю. Вуколов, Магнетронное напыление молибденовых зеркал и зеркальной микронной фольги со столбчатой упорядоченной нанокристаллитной структурой, 2006, ЖТФ, т.76, вып.4 стр. 109-113;
2. Н.В. Лянгузов, В.Е. Кайдашев, В.Б. Широков, Е.М. Кайдашев, Магнетронное и импульсное лазерное напыление наночастиц и несплошных плёнок Ag и Au и исследование их оптических свойств, 2012, ЖТФ, т.82, вып.10 стр. 90-95;
3. Бобашев,СВ; Жуков,БГ; Куракин,РО; Поняев,СА; Резников,БИ; Твердохлебов,КВ, Сильные ударные волны и особенности течений ударно-сжатых газов в каналах рельсовых ускорителей, 2015, ЖТФ, т.85, 1 стр. 39-46;

## Магнитоэлектрический эффект в слоистых структурах в области электромеханического резонанса

Галичян Т. А.<sup>1</sup>, Филиппов Д. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НовГУ

Эл. почта: tigran.galichyan@novsu.ru

Большой интерес к изучению магнитоэлектрического (МЭ) эффекта вызван как научной новизной данного направления исследований, так и перспективами его практического применения в создании принципиально новых устройств твердотельной электроники.

Магнитоэлектрический эффект заключается в возникновении поляризации вещества под действием магнитного поля (прямой МЭ эффект) и возникновении намагниченности вещества под действием электрического поля (обратный МЭ эффект). Его особенность заключается в том, что он связывает полярный вектор (поляризация) с аксиальным вектором (намагниченность). Возникновение МЭ эффекта в композиционных материалах обусловлено механическим взаимодействием магнито-стрикционной и пьезоэлектрической подсистем. Оно напрямую связано с распространением упругих колебаний, возникающих в материале.

При теоретическом описании МЭ эффекта в настоящее время наибольшее распространение получили два метода:

- метод эффективных параметров
- метод, основанный на совместном решении уравнений отдельно для магнито-стрикционной и пьезоэлектрической подсистем, где учитываются условия на границе раздела между фазами.

Учитывая недостатки первого метода, представляется целесообразным исследование МЭ эффекта методом, основанным на совместном решении уравнений отдельно для каждой из подсистем с учетом граничных условий. Поскольку взаимодействие между слоями передается через границу раздела, то в связи с этим возникает необходимость более детального исследования влияния неоднородного пространственного распределения деформаций и напряжений, обусловленного наличием границы раздела, на величину МЭ эффекта.

Слоистые МЭ структуры, как правило, изготавливаются либо методом напыления, либо методом осаждения, либо методом склеивания магнито-стрикционного и пьезоэлектрического слоев. Если в первых двух случаях наличием промежуточного слоя между магнито-стрикционной и пьезоэлектрической фазами можно пренебречь, то во втором случае свойства промежуточной фазы оказывают сильное влияние на величину эффекта. Вместе с тем, число работ, где учитывается межслоевое соединение на границе раздела магнито-стрикционно-пьезоэлектрического композита, незна-

чительно и его детальным исследованиям не проводилось. Вместо этого, межслоевое соединение между фазами учитывалось формально вводом коэффициента связи между фазами [1-3], или делалось предположение, что связь между магнитоотрицательной и пьезоэлектрической подсистемами идеальная, а амплитуда смещений одинакова и не изменяется по толщине образца [4-6].

Таким образом, установление более детальной взаимосвязи между упругими, магнитными и электрическими свойствами материала в исследовании МЭ эффекта является актуальной задачей.

В данной работе представлено детальное теоретическое описание прямого МЭ эффекта в слоистых магнитоотрицательной-пьезоэлектрических структурах с учетом наличия границы раздела между слоями. Получены выражения и проанализирована частотная зависимость МЭ коэффициента по напряжению и его зависимость от параметров и геометрических размеров слоев для образцов в форме пластинки. Приведено исследование МЭ эффекта с учетом наличия клеящей прослойки между слоями. Показано, что учет клеящей прослойки приводит к незначительному изменению резонансной частоты эффекта и значительному изменению МЭ коэффициента по напряжению.

#### Список литературы

1. Филиппов Д.А. Теория магнитоэлектрического эффекта в гетерогенных структурах на основе ферромагнетик-пьезоэлектрик // ФТТ. – 2005. – Т.47. – №6. – С. 1082–1084;
2. Chang C.M., Carman G.P. Analytically evaluating the properties and performance of layered magnetoelectric composites // J. Intell. Mater. Syst. Struct. – 2008. – Vol.19. – P. 1271–1280;
3. Filippov D.A., Srinivasan G., Gupta A. Magnetoelectric effects in ferromagnetic films on ferroelectric substrates // J. Phys.: Condens. Matter. – 2008. – Vol. 20. – P. 425206;
4. Бичурин М.И., Петров В.М., Аверкин С.В., Филиппов А.В. Электромеханический резонанс в магнитоэлектрических слоистых структурах // ФТТ. – 2010. – Т.52. – №10. – С. 1975–1980;
5. Wang Y., Hasanyan D., Li M., et al. Theoretical model for geometry-dependent magnetoelectric effect in magnetostrictive/piezoelectric composites // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111. – P. 124513;
6. Hasanyan D., Wang Y., Gao J., et al. Modeling of resonant magneto-electric effect in a magnetostrictive and piezoelectric laminate composite structure coupled by a bonding material // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 112. – P. 064109;

## Инверсный магнитоэлектрический эффект в поляризованных и намагниченных пьезоферритных структурах с пустотностью

Радченко Г. С.<sup>1</sup>, Филиппов Д. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЮФУ

<sup>2</sup>НовГУ

Эл. почта: grig1980@mail.ru

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект заключается в том, что в некоторых кристаллах приложение магнитного поля вызывает изменение поляризации (прямой МЭ эффект) и, наоборот, приложение электрического поля вызывает изменение намагниченности. Впервые возможность существования таких эффектов предсказали Ландау и Лифшиц [1], Дзялошинский [2], показал, что кристалл  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  обладает структурой, в которой этот эффект может наблюдаться, а Астров и Радо этот эффект впервые обнаружили экспериментально [3, 4]. В пьезомагнотриксционных композитах величина эффекта на несколько порядков больше, чем, например, в кристалле  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Это открывает возможности создания на его основе электронных устройств [5]. Особенностью частотной зависимости МЭ эффекта в пьезомагнотриксционных структурах является наличие электромеханического резонанса [6], при котором величина эффекта на порядки превосходит его значение в области, далекой от резонансной частоты.

Рассмотрим кольцо из объемного пьезомагнотриксционного композита толщиной  $d$ , внешним радиусом  $R$  и внутренним радиусом  $R_1$ . На верхней и нижней поверхности кольца нанесены металлические контакты, толщину которых будем считать пренебрежимо малой. Кольцо предварительно поляризовано в направлении, перпендикулярном контактам. Будем считать кольцо тонким, т.е.  $d \ll R, R_1$ . Это значит, что механическими напряжениями в продольном направлении можно пренебречь. Введем в рассмотрение параметр пустотности  $\eta = R_1/R$ . В случае объемного композита, когда размеры зерен много меньше длин распространяющихся в нем акустических волн, композиционный материал можно рассматривать как однородный и описывать объект так называемыми эффективными параметрами, методика определения которых представлена в работах [7, 8].

При подаче на электроды переменного электрического поля в пьезоэлектрической фазе композита возникают механические напряжения. Далее они посредством механического взаимодействия передаются в магнотриксционную фазу. Это приводит к изменению магнитного потока, пронизывающего катушку. Возникает ЭДС, которая и измеряется.

В процессе колебаний происходит перераспределение энергии между модами. Это проявляется в выраженном отклике высших мод за счет некоторых низших и запрещенных. Перераспределение энергии колебаний происходит за счет ее перехода от первой и запрещенной третьей мод ко второй и пятой. Амплитуда пятой моды кольца в пять раз больше, чем амплитуда аналогичной моды у диска.

Физическая причина перераспределения энергии между модами состоит в более выраженном росте амплитуды низкочастотной части радиальных смещений некоторых мод. Поэтому при различных параметрах геометрии кольца колебания его различных участков перераспределяются между модами. Частотное расположение резонансов различных мод обусловлено тем, что расстояние между нулями радиальных смещений неодинаково.

Как показывают расчеты, у диска с ростом моды коэффициент инверсного преобразования убывает быстрее, чем возрастает частота моды, поэтому с ростом номера моды коэффициент передачи напряжения уменьшается. У кольца, наоборот, значение инверсного преобразования для некоторых мод (в зависимости от параметра  $\eta$ ) возрастает, в результате чего с ростом номера моды происходит увеличение значения коэффициента передачи напряжения. Например, при значении параметра  $\eta = 1/3$  происходит увеличение преобразования для второй и пятой мод, по сравнению с первой, в результате чего коэффициент передачи для пятой моды значительно больше, чем для диска.

#### Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М. ГИФМЛ. (1959). 532 с.;
2. Дзялошинский И.Е. ЖЭТФ 37, 881 (1959);
3. Астров Д.Н. ЖЭТФ 40, 1035 (1961);
4. Folen V.J., Rado G.T., Stalder E.W. Phys. Rev. Lett. 6, 607 (1961).;
5. Пятаков А.П., Звездин А.К. УФН 182, 593 (2012);
6. Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M., Laletsin V.M., Paddubnaya N.N., Srinivasan G. Phys. Rev. B. 68, 132408 (2003);
7. Aleshin V., J. of Appl. Phys. V. 88, 3587 (2000);
8. Алешин В.И., Цихоцкий Е.С., Яценко В.К., ЖТФ. Т. 74, 62 (2004);

## Особенности критического рассеяния в одноосном релаксоре $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$

Ванина П. Ю.<sup>1</sup>, Борисов С. А.<sup>2</sup>, Набережнов А. А.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: p.yu.vanina@gmail.com

Сегнетоэлектрики релаксоры представляют собой широкий класс материалов, обладающих специфическими свойствами благодаря определенной структурной разупорядоченности и характеризуются высокими значениями диэлектрических, пьезоэлектрических, пироэлектрических, электрических и нелинейных оптических характеристик со слабыми температурными зависимостями. Кристаллы твердых растворов  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{(1-x)}\text{Nb}_2\text{O}_6$  ( $\text{SBN}_x$ ,  $0,2 < x < 0,8$ ) относятся к одноосным релаксорам [1]. При температурах, зависящих от соотношения Sr/Ba, эти кристаллы претерпевают размытый переход из тетрагональной сегнетоэлектрической фазы (пространственная группа  $P4bm$ ) в центросимметричную фазу (пространственная группа  $P4b2$ ). При увеличении концентрации Sr температура фазового перехода уменьшается [2] и одновременно усиливаются релаксорные характеристики кристалла, т.е. размытость максимума диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  становится более выраженной и частотная дисперсия  $\epsilon(T)$  увеличивается.

Согласно современным представлениям [3], фундаментальное свойство сегнетоэлектриков релаксоров это формирование полярных нанокластеров (или нанодоменов) в неполярной матрице при температурах  $T_d \gg T_C$  ( $T_C$  – температура Кюри,  $T_d$  – температура Бернса). Модель полярных нанокластеров в неполярной матрице при

температурах в диапазоне  $T_C < T < T_d$  была предложена в [4] для объяснения нелинейной температурной зависимости показателя преломления  $n(T)$  при температурах  $T \gg T_{max}$  ( $T_{max}$  – температура, при которой наблюдается максимум  $\varepsilon(T)$ ).  $T_d$  соответствует исчезновению полярных кластеров.

Наличие ненулевой поляризации при температурах  $T \gg T_C$  для различных составов SBN неоднократно подтверждалось различными методами. Несмотря на интенсивные исследования SBN в последние годы, до сих пор нет четкого понимания микроскопического механизма явлений, ответственных за релаксорные свойства этого материала. В последние годы критическое поведение в кристаллах SBN60-SBN61 находится в стадии обсуждения. Мы провели исследование диффузного рассеяния вблизи узлов (002) и (220) в отсутствие электрического поля [5]. В непосредственной близости от Брэгговского пика (002) мы наблюдается интенсивное рассеяние, которое сильно зависит от температуры. Анализ температурной зависимости этого рассеяния для SBN60 показал, что при охлаждении в нулевом электрическом поле пространственно однородное полярное состояние не образуется, и ниже 320K кристалл разделен на нанодомены. Было показано, что ниже температуры Кюри корреляционная длина остается постоянной и приблизительно равна 27 нм. Также были определены критические индексы  $\nu = 0,67$  (2) и  $\gamma = 1,33$  (17) и температуры Кюри  $T_C = 340,5$  (1,2) K.

Также были проведены исследования температурной эволюции диффузного рассеяния в монокристалле SBN60 в двух режимах: в нулевом поле и в приложенном электрическом поле  $\sim 3$ кВ/см. Это дает возможность получить информацию о пространственной организации флуктуаций параметра порядка в этом кристалле вблизи температуры перехода. Основная идея этих измерений состояла в определении влияния внешнего электрического поля на критические параметры и в получении информации о пространственной организации флуктуаций параметра порядка, поскольку до настоящего времени эта информация отсутствовала.

#### Список литературы

1. Cross L.E., Relaxor Ferroelectrics, *Ferroelectrics*, 76, 241-267, 1987;
2. Kuz'minov Yu.S., *Ferroelectric Crystals for Laser Radiation Control*, Nauka, 1982;
3. Bokov A.A., Ye Z.-G., Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure, *J. Mater. Sci.* 41, 31-52, 2006;
4. Burns G., Dacol F.H., Glassy polarization behavior in ferroelectric compounds  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$  and  $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ , *Solid State Commun.* 48, 853-856, 1983;
5. Borisov S.A., Okuneva N.M., Vakhrushev S.B., Naberezhnov A.A., Volk T.R., Filimonov A.V., *Physics of the Solid State*, 55(2), 334, 2013;

## Влияние примеси $\text{BaTiO}_3$ на существование несоразмерной фазы в композите $0,9\text{NaNO}_2+0,1\text{BaTiO}_3$ и сегнетоэлектрической фазы $\text{KNO}_3$ в композитах $(1-x)\text{KNO}_3+(x)\text{BaTiO}_3$

*Алексеева О. А.<sup>1</sup>, Набережнов А. А.<sup>2</sup>, Стукова Е. В.<sup>3</sup>, Борисов С. А.<sup>2</sup>,  
Симкин В. Г.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

<sup>3</sup>АмГУ

<sup>4</sup>ОИЯИ

Эл. почта: blackhole2010@yandex.ru

Приведены результаты структурных исследований сегнетоэлектрических композитов на основе порошковых смесей  $\text{NaNO}_2$  и  $\text{BaTiO}_3$  состава  $0,9\text{NaNO}_2+0,1\text{BaTiO}_3$  и  $\text{KNO}_3$  и  $\text{BaTiO}_3$  с 25% и 50% содержанием  $\text{BaTiO}_3$ .

В результате ранее проведенных диэлектрических исследований композитов  $(1-x)\text{NaNO}_2+(x)\text{BaTiO}_3$  (при  $x = 0,05$  и  $x = 0,1$  и с различным размером частиц  $\text{BaTiO}_3$ ) [1] было обнаружено, что, помимо максимума диэлектрической проницаемости при температуре Кюри для  $\text{NaNO}_2$  437 К, существует дополнительный максимум при температуре  $\approx 420$  К, величина которого различна при нагреве и охлаждении. Авторы предположили, что он появляется вследствие перехода сегнетоэлектрическая — несоизмерная фаза в  $\text{NaNO}_2$  и, таким образом, температурная область существования несоизмерной фазы  $\text{NaNO}_2$  в композитах ( $\Delta T \approx 18$  К) существенно расширяется по сравнению с чистым  $\text{NaNO}_2$  ( $\Delta T \approx 1$  К). Для проверки этого предположения мы провели исследования температурной эволюции структуры композита  $0,9\text{NaNO}_2+0,1\text{BaTiO}_3$  методом дифракции нейтронов на нейтронном фурье-дифрактометре высокого разрешения HRFD (ЛНФ ОИЯИ, г. Дубна.)

В результате проведенных исследований было показано, что появление аномалии диэлектрического отклика при  $T \approx 420$  К не связано с фазовым переходом в частицах  $\text{BaTiO}_3$ . Была получена температурная зависимость параметра порядка  $\text{NaNO}_2$  в композитах и в чистом веществе. Обнаружено, что примесь  $\text{BaTiO}_3$  приводит к уменьшению величины параметра порядка  $\text{NaNO}_2$  в композитах по сравнению с чистым  $\text{NaNO}_2$  в температурном диапазоне  $\approx 360\div 433$  К. На основании этого можно утверждать, что в диапазоне температур  $T \approx 360\div 433$  К наблюдается сосуществование несоизмерной и сегнетоэлектрической фаз  $\text{NaNO}_2$ . Из температурной зависимости параметра порядка получены оценки содержания несоизмерной фазы  $\text{NaNO}_2$  при различных температурах. Показано, что максимум диэлектрической проницаемости при  $T \approx 420$  К соответствует максимальному содержанию несоизмерной фазы в композитном материале  $0,9\text{NaNO}_2+0,1\text{BaTiO}_3$ .

Также нами были проведены структурные исследования композитов  $(1-x)\text{KNO}_3+(x)\text{BaTiO}_3$  двух составов  $x = 25$  и 50 об. % методом дифракции рентгеновского излучения. Было показано, что температурный диапазон существования сегнетоэлектрической фазы  $\text{KNO}_3$  в присутствии примеси  $\text{BaTiO}_3$  существенно расширяется в сторону более низких температур по сравнению с чистым веществом (нижняя температурная точка измерений составляла 363 К для состава  $x = 0,25$ , 348 К для состава  $x = 0,5$ , и при этих температурах  $\text{KNO}_3$  находился в сегнетоэлектрической фазе;

для сравнения в чистом веществе температура перехода из сегнетоэлектрической в низкотемпературную параэлектрическую модификацию составляет 378 К). Полученные результаты согласуются с результатами проведенных ранее диэлектрических измерений композитов  $(1-x)\text{KNO}_3+(x)\text{BaTiO}_3$  в диапазоне концентраций  $x = 0 \div 0,5$  [2].

#### Список литературы

1. Стукова Е.В., Королева Е.Ю., Трюхан Т.А., Барышников С.В. Изменение области существования несоизмерной фазы в сегнетоэлектрическом композите  $(\text{NaNO}_2)_{1-x}(\text{BaTiO}_3)_x$ . Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. Т. 146(№2). С. 22-27.2012;
2. Стукова Е.В., Маслова В.В., Барышников С.В. Диэлектрические свойства сегнетоэлектрических композитов на основе  $\text{KNO}_3\text{-BaTiO}_3$  и  $\text{KNO}_3\text{-LiNbO}_3$ . Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. № 138, С. 58-65. 2011;

## Исследование гексагональных ортоферритов $h\text{-RFeO}_3$ ( $R=\text{Ho, Er}$ и $\text{Lu}$ ) методом генерации второй оптической гармоники

Нефёдов С. Г.<sup>1</sup>, Павлов В. В.<sup>1</sup>, Писарев Р. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: nefed.sg@ya.ru

Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход по отношению к традиционной микроэлектронике, заключающийся в реализации определенной функции без использования стандартных базовых элементов, основываясь на физических явлениях в твердых телах. Перспективными материалами в этом направлении могут быть магнитоупорядоченные сегнетоэлектрики — мультиферроики. Новой группой в этой категории материалов являются гексагональные ортоферриты редкоземельных металлов  $h\text{-RFeO}_3$  ( $R = \text{Ho, Er}$  и  $\text{Lu}$ ). По литературным данным в гексагональных ортоферритах обнаружены два сегнетоэлектрических фазовых переходов, кроме того ожидается сосуществование сегнетоэлектрического порядка и антиферромагнитного упорядочения [1]. В нашей работе проведено исследование тонких эпитаксиальных плёнок  $h\text{-RFeO}_3$  ( $R = \text{Ho, Er}$  и  $\text{Lu}$ ) толщиной 50-70 нм, выращенных металл-органическим химическим осаждением из пара на прозрачной подложке из кубического иттрий-стабилизированного диоксида циркония  $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$  с ориентацией типа (111). Структуры исследовались методом генерации второй оптической гармоники [2]. Проведены измерения спектральных, температурных и поляризационных зависимостей интенсивности второй оптической гармоники. Данные зависимости измерялись в двух основных поляризационных конфигурациях  $E^w \perp E^{2w}$  и  $E^w \parallel E^{2w}$  при различных углах падения возбуждающего излучения на образец. Эти измерения позволили разделить вклады от интерфейса подложка-пленка и сегнетоэлектрического вклада от пленок  $h\text{-RFeO}_3$ . Были обнаружены особенности в температурных зависимостях, связанные с сегнетоэлектрическими фазовыми переходами. Сделано сопоставление линейных и нелинейных оптических спектров. Выявлен вклад в нелинейную поляризацию, связанный с d-d переходами и переходами с переносом заряда [3].



Работа проводилась при финансовой поддержки программы П220 Правительства РФ, проект № 14.В25.31.0025, проектов РФФИ № 13-02-00754 и № 15-52-12015. Авторы благодарят А. Р. Акбашева за предоставленные образцы.

#### Список литературы

1. X. Xu and W. Wang, *Modern Physics Letters B* 28, 1430008 (2014);
2. И. Р. Шен, *Принципы нелинейной оптики*, М., Наука, 1989;
3. V. V. Pavlov, A. R. Akbashev, A. M. Kalashnikova, et.al. *J Appl. Phys.* 111, 056105 (2012);

## **Линейный и нелинейный магнитоэлектрический эффект в двухслойных структурах на основе цирконат-титанат свинца-никель**

*Фирсова Т. О.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НовГУ

Эл. почта: firsovatati@mail.ru

Пьезомагнотриксционные структуры являются композиционными материалами, состоящими из механически связанных между собой феррита или ферромагнетика с одной стороны и пьезоэлектрика с другой. Можно сказать, что они являются композиционными мультиферроиками, поскольку вследствие механического взаимодействия происходит взаимосвязь магнитных и электрических свойств структуры. Это приводит к тому, что в таких структурах возможны перекрестные эффекты, отсутствующие по отдельности и в магнотриксционной, и в пьезоэлектрической фазах. При приложении к такой структуре внешнего электрического поля происходит изменение намагниченности, и, наоборот, при приложении внешнего магнитного поля происходит изменение поляризации. Этот эффект, называемый магнитоэлектрическим (МЭ), интересен тем, что на его основе можно создавать чувствительные датчики магнитного поля, фазовращатели, трансформаторы, имеющие, в отличие от классических, всего одну обмотку, и другие приборы твердотельной электроники [1]. Механизмом возникновения МЭ эффекта в таких структурах является механическое взаимодействие магнотриксционной и пьезоэлектрической подсистем. В переменном магнитном поле вследствие магнотриксции в магнотриксционной компоненте возникают механические напряжения, которые посредством механического взаимодействия передаются в пьезоэлектрическую фазу, где вследствие пьезоэффекта, происходит изменение поляризации, что приводит к возникновению электрического напряжения.

С точки зрения технологии изготовления магнитоэлектрические композиты условно можно разделить на две категории – объемные (bulk) и многослойные (multilayer) композиты. Объемные композиционные материалы, полученные спеканием смесей порошков феррита и пьезоэлектрика, хотя, в зависимости от технологии изготовления, имеют меньшие значения МЭ параметров, но они просты в изготовлении и обладают хорошими механическими свойствами [2]. Однако, поскольку сопротивление магнотриксционной фазы значительно меньше, чем пьезоэлектрической, то вследствие этого происходит частичное шунтирование пьезоэлектрика, в результате чего сопротивление объемных композитов намного меньше, чем слоистых, где

магнитострикционные слои разделены слоем пьезоэлектрика с большим удельным сопротивлением. Слоистые структуры лучше поляризуются, обладают меньшими потерями, связанными с токами утечки, в результате чего величина МЭ эффекта в таких структурах больше, чем в объемных композитах. При этом в качестве магнитострикционной фазы можно использовать материалы с высокой проводимостью. Однако большим недостатком слоистых структур является плохая механическая прочность, поэтому актуальной является задача получения структур с хорошими характеристиками. Поскольку взаимодействие между магнитострикционной и пьезоэлектрической фазами в слоистых структурах происходит через границу раздела посредством сдвиговых напряжений, то величина эффекта непосредственно зависит от качества межслоевого соединения. Одной из разновидностью многослойных структур являются двухслойные структуры, представляющие механически связанные между собой слои из пьезоэлектрика и магнетика (феррита или ферромагнетика) [3].

В данной работе представлены магнитоэлектрические свойства структур, полученных методом склеивания и электролитического осаждения. Клеевое соединение обладает тем преимуществом, что позволяет создавать структуры с любым сочетанием материалов и соотношением толщин магнетика и пьезоэлектрика, соответствующим максимуму эффекта. В отличие от них, структуры, изготовленные методами напыления или электролитического осаждения, имеют хорошую адгезию между слоями, малые потери, о чем свидетельствует большая, по сравнению с клеевыми структурами, величина добротности.

#### Список литературы

1. Пятаков А.П., Звездин А.К., Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики, УФН, Т. 182, 593 с., 2012;
2. Филиппов Д.А., Теория магнитоэлектрического эффекта в ферромагнитно-пьезоэлектрических гетероструктурах, ФТТ, т. 47. № 6, С. 1082 – 1084, 2005;
3. Лалетин В.М., Филиппов Д.А., Фирсова Т.О., ПЖТФ, т. 40, № 6, с. 11-18, 2014;

## **Роль поглощения в лазерно-индуцированном возбуждении прецессии намагниченности в пленках железо-иттриевого граната**

*Шамрай П. Ю.<sup>1</sup>, Шелухин Л. А.<sup>2</sup>, Павлов В. В.<sup>2</sup>, Калашникова А. М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

Эл. почта: pavel.shamray@mail.ru

В последнее десятилетие в физике конденсированного состояния большое внимание уделяется экспериментальному и теоретическому изучению сверхбыстрой динамики спинов в магнитоупорядоченных средах, возникающей под действие лазерных импульсов с длительностью 100 фс, и имеющей характерные времена менее 100 пс [1]. Изучение сверхбыстрых процессов в магнитных системах имеет, кроме фундаментального, значение для дальнейшего развития современной спинтроники. Одной из основных проблем при разработке приборов спинтроники является очень малое расстояние, на которое можно передать спиновое возбуждение. В связи с этим,

в последнее время ведутся активные исследования в относительно новом направлении спинтроники — магноники, основанной на передаче спиновых возбуждений в системе взаимодействующих спинов, прежде всего в магнитоупорядоченных диэлектриках [2]. Многие такие среды отличаются слабым затуханием спиновых волн при комнатной температуре. К настоящему моменту наиболее интересные результаты в этом направлении получены в структурах на основе пленок железо-иттриевого граната [3].

В ряде работ по лазерно-индуцированной динамике намагниченности было показано, что фемтосекундные лазерные импульсы позволяют возбуждать прецессию намагниченности в тонких пленках железо-иттриевого граната за счет нескольких принципиально разных механизмов [4-6]. Целью данной работы являлось выявление роли оптического поглощения в возбуждении динамики намагниченности в пленке сложно-замещенного железо-иттриевого граната фемтосекундными лазерными импульсами, недавно обнаруженной в работе [6], для прояснения вопроса о природе такого возбуждения.

Объектом исследования являлся сложно-замещенный железо-иттриевый гранат  $(\text{YPrLuBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  с легкоосной магнитной анизотропией. Образец представлял собой пленку толщиной 10 мкм, выращенную на подложке гадолиний-галлиевого граната  $\text{Gd}_3\text{Ga}_2(\text{GaO}_4)_3$  с ориентацией (210) методом жидкофазной эпитаксии.

Для характеристики образца нами были получены спектр поглощения и магнитооптического эффекта Фарадея в спектральном диапазоне 1.3 до 2.2 эВ при комнатной температуре. Внешнее магнитное поле было направлено по нормали к плоскости образца для создания однодоменного состояния.

Исследование возбуждения магнитной динамики фемтосекундными лазерными импульсами производилось методом магнитооптической накачки-зондирования. Источником излучения служила лазерная система LightConversion PHAROS+ORPHEUS. Возбуждающий импульс накачки имел длительность 170 фс и плотность энергии 2 мДж/см<sup>2</sup>. Для детектирования изменения величины и направления намагниченности использовался менее мощный линейно поляризованный импульс зондирования. Время задержки между импульсами накачки и зондирования менялось в пределах 0-4 нс. Измерения проводились для диапазона 1.65 – 2 эВ.

Полученные зависимости поворота плоскости поляризации от времени задержки между импульсом накачки и зондирования показали осцилляции на малых временах (до 500 пс) и затухание на больших (до 4 нс). В наблюдаемой прецессии мы выделили вклад, не зависящий от поляризации возбуждающего импульса. Наши исследования показали, что при разных энергиях фотона импульсов накачки характер возбуждения не меняется, меняется только амплитуда прецессии. Амплитуда прецессии растет по мере увеличения энергии фотона импульса накачки, т.е. по мере увеличения поглощения. Данный результат подтверждает предложенный в работе [6] механизм возбуждения прецессии, основанный на изменении анизотропии вследствие поглощения.

#### Список литературы

1. Solid State Physics. Vol. 64. Recent advances in magnetic insulators – from spintronics to microwave applications (edited by M. Wu, A. Hoffmann), Academic Press, 2013;
2. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing Th., Ultrafast optical manipulation of magnetic order, Rev. Mod. Phys., 82, 2731-2783, 2010;

3. Serga A.A., Chumak A.V., Hillebrands B., YIG magnonics, J. Phys. D: Appl. Phys., 43, 264002, 2010;
4. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing Th., Femtosecond Photomagnetic Switching of Spins in Ferrimagnetic Garnet Films, Phys. Rev. Lett., 95, 047402, 2005;
5. Atoneche F., Kalashnikova A. M., Kimel A.V. et al., Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet, Phys. Rev. B, 81, 214440, 2010;
6. Shelukhin L.A., Kalashnikova A.M., Pavlov V.V. et al., Laser-induced magnetic anisotropy dynamics in low symmetry garnet films, International Symposium Spin Waves 2015. Book of abstracts, 85, 2015;

## **Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание в магнитных туннельных переходах CoFeB/MgO/CoFeB**

*Максимов К. А.<sup>1</sup>, Шелухин Л. А.<sup>2</sup>, Калашникова А. М.<sup>2</sup>, Gareev R.R.<sup>3</sup>, Zbarsky V.<sup>4</sup>, Münzenberg M.<sup>4</sup>, Перцев Н. А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ФТИ

<sup>3</sup>Universität Regensburg

<sup>4</sup>Universität Greifswald

Эл. почта: maximov020793@gmail.com

Одной из важнейших проблем в фундаментальной физике конденсированного состояния, в технологии и других сопутствующих областях является на сегодняшний день проблема увеличения плотности и скорости записи информации, а также увеличение эффективности этого процесса. В настоящее время перспективными элементами для создания энергонезависимых ячеек памяти являются гетероструктуры на основе слоев ферромагнитных металлов, разделенных слоем немагнитного диэлектрика с эффектом туннельного магнетосопротивления [1], в частности, структуры на основе ферромагнитного сплава CoFeB. На данный момент среди таких элементов наибольший интерес представляют структуры с намагниченностью, ориентированной перпендикулярно плоскости образца, так как они позволяют достичь большей плотности ячеек памяти и требуют меньших энергозатрат для переключения состояния [2].

Принципиально новым подходом к управлению магнитным состоянием структур является использование фемтосекундных лазерных импульсов для возбуждения спиновой динамики на пико- и даже субпикосекундных временах [3]. В связи с этим представляет интерес изучение магнитной динамики, возникающей в гетероструктурах при воздействии 100 фс лазерных импульсов. В данной работе мы представляем результаты исследования магнитной динамики в магнитном туннельном переходе CoFeB/MgO/CoFeB, находящемся вблизи ориентационного перехода. Исследуемый образец представляет собой гетероструктуру Si/SiO<sub>2</sub>/Ta(5 нм)/CoFeB(1,2 нм)/MgO(1,2 нм)/CoFeB(1,4 нм)/Ta(5 нм)/Ru(3 нм), выращенную методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Толщины слоев были близки к критическому значению, при котором наблюдается изменение анизотропии структуры от типа «легкая плоскость» к типу «легкая ось» [4], при этом образец имел анизо-

тропию типа «легкая ось». Кроме того, ферромагнитные слои CoFeB имели антиферромагнитное связывание.

Исследование лазерно-индуцированной динамики намагниченности в образце производилось методом фемтосекундной магнитооптической накачки-зондирования. Луч от источника фемтосекундных лазерных импульсов делился на две части. Более мощные импульсы ( $0,24 - 2,7 \text{ мДж/см}^2$ ) использовались в качестве импульсов накачки, которые возбуждали динамику в образце. Менее мощные импульсы ( $50 \text{ мкДж/см}^2$ ) попадали на образец после прохождения через оптическую линию задержки. Для этих импульсов измерялся поворот плоскости поляризации или эллиптичность, возникшие после отражения от образца вследствие магнитооптического эффекта Керра [5]. Измерения производились при разных временах задержки между импульсами накачки и зондирования. Таким образом, мы могли проследить временные зависимости намагниченности после действия импульсов накачки.

Исследования лазерно-индуцированной магнитной динамики в гетероструктуре CoFeB/MgO/CoFeB показали, что действие фемтосекундных лазерных импульсов на образец приводит к резкому падению величины намагниченности в течение 1,2 пс после накачки, т.е. к процессу сверхбыстрого размагничивания [6]. Кроме того, было обнаружено, что величины размагничивания для параллельного и антипараллельного состояний, соответствующих внешним магнитным полям 20 и 5 мТ, соответственно, существенно отличаются: для поля 20 мТ она составляет 30%, а для поля 5 мТ – 50%. Этот результат согласуется с данными, представленными ранее [7], при этом, нами были получены существенно более высокие значения размагничивания.

#### Список литературы

1. Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A., et al., Spintronics: A Spin-Based Electronics Vision for the Future, *Science*, 294, 1488-1495, 2001;
2. Ikeda S., Miura K., Yamamoto H., et al., A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction, *Nat. Mat.*, 9, 721-724, 2010;
3. Kirilyuk A., Kimel A.V., Rasing T., Ultrafast optical manipulation of magnetic order, *Rev. Mod. Phys.*, 82, 2731-2784, 2010;
4. Gareev R.R., Zbarsky V., Landers J., et al., The role of weak interlayer coupling in the spin-reorientation of perpendicular ultrathin Co-Fe-B/MgO-based heterostructures, *Appl. Phys. Lett.*, 106, 132408, 2015;
5. Звездин А.К., Котов В.А., Магнитооптика тонких пленок, *Наука*, 20-23, 1988;
6. Beaurepaire E., Merle J.-C., Daunois A., et al., «Ultrafast Spin Dynamics in Ferromagnetic Nickel,» *Phys. Rev. Lett.*, 76, 4250-4253, 1996;
7. He W., Zhu T., Zhang X., et al., Ultrafast demagnetization enhancement in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunneling junction driven by spin tunneling current, *Sci. Rep.*, 3, 2883, 2013;

## Магнитодиэлектрический эффект в антиферромагнетиках со структурой перовскита $\text{KCoF}_3$ и $\text{KNiF}_3$

Дубровин Р. М.<sup>1</sup>, Кижяев С. А.<sup>1</sup>, Писарев Р. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

Эл. почта: dubrovin@mail.ioffe.ru

$\text{KCoF}_3$  и  $\text{KNiF}_3$  являются кубическими антиферромагнетиками со структурой перовскита. Постоянная решетки при комнатной температуре в  $\text{KCoF}_3$   $a = 4.069 \text{ \AA}$ , в  $\text{KNiF}_3$   $a = 4.014 \text{ \AA}$  [1]. При понижении температуры происходит переход в антиферромагнитную фазу при температуре Нееля  $T_N$ , при котором  $\text{KCoF}_3$  ( $T_N = 115.3 \text{ K}$  [2]) становится тетрагональным с постоянными решетки  $a = 4.057 \text{ \AA}$ ,  $c = 4.049 \text{ \AA}$  (при  $T = 78 \text{ K}$  [1]), а  $\text{KNiF}_3$  ( $T_N = 244.8 \text{ K}$  [2]) не меняет своей структуры и остается кубическим с постоянной решетки  $a = 4.001 \text{ \AA}$  (при  $T = 78 \text{ K}$  [1]).

Задачей данной работы являлось изучение магнитодиэлектрического эффекта, который заключается во вкладе антиферромагнитного параметра порядка в диэлектрические свойства этих двух материалов выше и ниже температуры  $T_N$ . Для этого были проведены исследования температурных зависимостей диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  в диапазоне от 77 К до 300 К. Диэлектрическая проницаемость и ее изменения по температуре определялись посредством измерения электрической емкости образца на частоте 10 кГц. Основными элементами экспериментальной установки являлись анализатор компонентов АКТАКОМ 3028 и гелиевый криостат Janis 159. Образцы кристаллов  $\text{KCoF}_3$  и  $\text{KNiF}_3$  были вырезаны в форме плоскопараллельных пластинок с ориентацией плоскости (100), с типичной толщиной  $\sim 0.5 \text{ мм}$  и площадью поверхности  $\sim 10 \text{ мм}^2$ . Контакты наносились на образец серебряной пастой. Типичная величина электрической емкости образцов была около 1 пФ.

В  $\text{KNiF}_3$  на температурной зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  при магнитном фазовом переходе аномалии не наблюдались, что, по крайней мере частично, можно объяснить отсутствием заметных структурных изменений [1]. Диэлектрическая проницаемость монотонно спадает при охлаждении во всем диапазоне температур измерений. Абсолютное значение диэлектрической проницаемости при комнатной температуре  $\epsilon = 6.49 \pm 0.01$ . Существенно другое поведение диэлектрической проницаемости наблюдается в  $\text{KCoF}_3$ . В отличие от  $\text{KNiF}_3$  при охлаждении диэлектрическая проницаемость монотонно возрастает на всем температурном диапазоне. При температуре магнитного фазового перехода наблюдается аномалия в поведении  $\epsilon$ . Абсолютные значения диэлектрической проницаемости в  $\text{KCoF}_3$  при комнатной температуре  $\epsilon = 7.60 \pm 0.01$ , что близко к величине, приведенной в литературе [3]. Поскольку ниже  $T_N$   $\text{KCoF}_3$  имеет тетрагональную структуру, следует ожидать анизотропию в поведении  $\epsilon$  вдоль осей  $a$  и  $c$  в антиферромагнитном состоянии.

### Список литературы

1. Atsushi Okazaki, Yasutaka Suemune, The Crystal Structure of  $\text{KMnF}_3$ ,  $\text{KFeF}_3$ ,  $\text{KCoF}_3$ ,  $\text{KNiF}_3$  and  $\text{KCuF}_3$  above and below their Neel Temperatures, Journal of Physical Society of Japan, Vol. 16, No. 4, pp. 671-675, 1961;
2. A. Oleaga, A. Salazar, D. Skrzypek, Critical behaviour of magnetic transitions in  $\text{KCoF}_3$  and  $\text{KNiF}_3$  perovskites, Journal of Alloys and Compounds, 629, pp. 178-183, 2015;

3. J.D. Axe, G.D. Pettit, Infrared Dielectric Dispersion of Several Fluoride Perovskites, Physical Review, Vol. 157, N. 2, pp. 435-437, 1967;

## Спиновые возбуждения и спин-фононное взаимодействие в аниферромагнетике $\text{PbFeVO}_4$

Просников М. А.<sup>1</sup>, Писарев Р. В.<sup>1</sup>, Давыдов В. Ю.<sup>1</sup>, Смирнов А. Н.<sup>1</sup>,  
Саблина К. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Эл. почта: yotungh@gmail.com

Десятилетие назад впервые были синтезированы магнетики со структурой муллита известной более 90 лет [1]. На настоящий момент известны лишь единичные работы по изучению статических магнитных свойств этих кристаллов с общей формулой  $\text{PbMVO}_4$  ( $M = \text{Cr, Mn, Fe}$ ), в то время как исследования их магнитной динамики полностью отсутствуют. Указанные магнетики обладают как антиферромагнитным, в случае  $\text{PbCrVO}_4$  и  $\text{PbFeVO}_4$ , так и ферромагнитным, для  $\text{PbMnVO}_4$ , упорядочением и, кроме того, могут являться одномерными магнетиками [2], актуальными в качестве объекта исследования как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Ряд экзотических магнитных свойств, в том числе, обусловлен своеобразием их кристаллической структуры.

В представленной работе изучалась спиновая динамика и спин-фононное взаимодействие в кристалле  $\text{PbFeVO}_4$  методом комбинационного рассеяния света.  $\text{PbFeVO}_4$  принадлежит к пространственной группе  $Pnma$  (#62,  $Z = 4$ ), параметры ячейки  $a = 7.00$ ,  $b = 5.94$ ,  $c = 8.33 \text{ \AA}$  [3]. Ионы железа  $\text{Fe}^{3+}$  ( $S = 5/2$ ) расположены в позициях  $4a$  внутри кислородных октаэдров, образующих цепь с общими ребрами в направлении кристаллографической оси  $b$ . Между собой эти цепи связаны группами  $\text{VO}_3$  и  $\text{PbO}_4$ . При температурах ниже температуры Нееля  $T_N = 114 \text{ K}$ , магнитные моменты ионов железа упорядочиваются антиферромагнитно в цепях, но ферромагнитно между цепями [2].

Спектры рассеяния были исследованы при температурах от 10 до 300 К в геометрии обратного рассеяния, в качестве источника возбуждения использовалась линия 532 нм Nd:YAG лазера. Был проведен теоретико-групповой анализ, зарегистрировано рассеяние на фононах, в том числе ранее не описанных в литературе.

При температуре 11 К наблюдается широкая полоса  $190 \text{ см}^{-1}$ , проявляющая ярко выраженную температурную зависимость. По мере приближения к температуре перехода, полоса уширяется, смягчается вплоть до линии возбуждения и уменьшается в интенсивности. Согласно температурным и поляризационным зависимостям, наблюдаемую полосу следует отнести к рассеянию на магнитных возбуждениях ионов железа в цепях октаэдров  $\text{FeO}_6$ .

При  $T < T_N$  наблюдается аномальное смягчение отдельных фононов. Помимо этого, обнаружено искажение формы фононных пиков, спектрально перекрывающихся с полосой магнитного возбуждения. Оба этих явления указывают на интенсивное спин-фононное взаимодействие. Магнитная и обменная структуры дополнительно исследовались методами симметричного анализа и спин-поляризованных DFT+U *ab initio* расчетов.

Список литературы

1. Bowen N.L., Greig J. W., et al., Mullite, a silicate of alumina, Jour. Wash. Acad. Sci., 14, 183, 1924;
2. Park H., Lam R. et al., Synthesis, Crystal Structure, Crystal Chemistry, and Magnetic Properties of PbMBO<sub>4</sub> (M =Cr, Mn, Fe): A New Structure Type Exhibiting One- Dimensional Magnetism, Chemistry of materials, 4, 1703, 2003;
3. Pankrats A., Sablina K. et al., Magnetic and dielectric properties of the PbFe-BO<sub>4</sub> single crystal, J. of Magnetism and Mag. Mat. 353, 23, 2014;

## Особенности динамики решетки в монокристалле цирконата-титаната свинца с концентрацией титана 0.7%

Андроникова Д. А.<sup>1,2</sup>, Varon A.<sup>3</sup>, Босак А. А.<sup>4</sup>, Бронвальд Ю. А.<sup>1,2</sup>,  
Бурковский Р. Г.<sup>1,2</sup>, Вахрушев С. Б.<sup>1,2</sup>, Леонтьев Н. Г.<sup>5</sup>, Леонтьев И. Н.<sup>6</sup>,  
Филимонов А. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПбПУ

<sup>3</sup>RIKEN SPring-8 Center

<sup>4</sup>European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France

<sup>5</sup>Азово-черноморская государственная агроинженерная академия, Зерноград,  
Россия

<sup>6</sup>ЮФУ

Эл. почта: andronikova.daria@gmail.com

Цирконат-титанат свинца (ЦТС) является классическим перовскитоподобным сегнетоэлектриком, занимающим лидирующие позиции на рынке пьезоэлектрических материалов благодаря своим уникальным пьезоэлектрическим параметрам. В зависимости от концентрации титана ЦТС может проявлять различные свойства. ЦТС в области концентраций титана от 0 до 6 % испытывает два фазовых перехода [1]: переход из параэлектрической кубической фазы в сегнетоэлектрическую ромбоэдрическую фазу и переход из сегнетоэлектрической ромбоэдрической фазы в анти-сегнетоэлектрическую орторомбическую фазу. Как было показано с помощью дифракции электронов, в промежуточной сегнетоэлектрической фазе цирконата-титаната свинца (ЦТС) наблюдается модуляция структуры, приводящая к возникновению дополнительных сателлитов в окрестности M-точки [2, 3]. Таким образом, в ЦТС с малыми концентрациями титана наблюдается последовательность фазовых переходов параэлектрик – сегнетоэлектрик – антисегнетоэлектрик. В связи со сложностью наблюдаемой картины фазовых переходов, а также в связи с отсутствием кристаллов хорошего качества микроскопические причины процессов, сопровождающих фазовые переходы, остаются не до конца выяснены.

С целью исследования динамики кристаллической решетки в ЦТС нами был проведен эксперимент по неупругому рассеянию синхротронного излучения на монокристалле PbZr<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>3</sub> с концентрацией титана  $x = 0,007$ . Эксперимент проводился с использованием двух различных спектрометров обратного рассеяния синхротронного излучения: спектрометра неупругого рассеяния, установленного на линии ID28 синхротронного источника ESRF, а также спектрометра неупругого рассеяния



BL43LXU синхротронного источника Spring-8. Особое внимание было уделено исследованию динамики поперечных фононов, распространяющихся в направлениях  $\langle 110 \rangle$ . Было прослежено изменение энергии этих фононов при приближении к переходу в промежуточную фазу, а также исследовано температурное поведение центрального пика.

Список литературы

1. R W Whatmore, J. Phys. C: Solid State Phys. Vol. 11, (1978);
2. D. Viehland, Phys. Rev. B 52, 778 (1995);
3. S. Watanabe, Phys. Rev. B, 63, 134103 (2001);

## **Исследование влияние конечной ширины тонкопленочных ферромагнитных волноводов на спектр и поперечное распределение дипольно-обменных спиновых волн**

*Попов Д. А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: scipopov@mail.ru

В последнее время наблюдается повышенный интерес к распространению спиновых волн в ферромагнитных пленочных структурах с конечной шириной, то есть имеющих прямоугольное сечение. Экспериментально наблюдаемые явления в таких структурах, в частности, в узких ферромагнитных волноводах, требуют разработки новых теоретических методов описания распространения спиновых волн с учетом сложного характера распределения внутреннего статического магнитного поля. При касательном намагничивании в волноводах прямоугольного сечения сильная неоднородность внутреннего магнитного поля вдоль боковых граней создает условия для возникновения и распространения так называемых *локализованных волноводных мод*, имеющих частоты ниже частоты отсечки объемных спиновых волн.

В данной работе проведено теоретическое исследование условий возникновения и распространения локализованных спиновых волн в зависимости от различных параметров волноводящей структуры: материала волновода, отношения его геометрических размеров, величины внешнего магнитного поля, а также рассмотрено влияние граничных условий. Под локализованными состояниями в данной работе понимаются собственные возбуждения касательно намагниченного ферритового волновода, максимумы распределений переменной намагниченности которых лежат в пределах ширины магнитных ям вдоль боковых граней волновода. Для исследования выбраны два характерных материала волновода: ЖИГ и пермаллой. Получены зависимости глубины и ширины магнитных ям от величины внешнего магнитного поля и относительных размеров волновода, а также построены графики зависимости глубины залегания локализованных состояний по частоте от тех же параметров. На основе полученных данных определены условия существования локализованных мод в ограниченных ферритовых волноводах и возможность магнитного управления их дисперсионными характеристиками.

Проведенный анализ показывает, что дисперсионными характеристиками локализованных состояний в ферритовых волноводах прямоугольного сечения можно

эффективно управлять с помощью внешнего магнитного поля, а диапазон управления определяется материалом волновода и соотношением его геометрических параметров. В связи с этим можно рекомендовать использовать узкие ферритовые волноводы в качестве планарных волноведущих элементов в микро- и наноэлектронике СВЧ, что позволит значительно расширить ее функциональные возможности.

Список литературы

1. Gubbiotti G., Tacchi S., Madami M., Carlotti G., Adeyeye A.O., Kostylev M., Brillouin light scattering studies of planar metallic magnonic crystals, *J Phys D Appl Phys*, 43, 264003, 2010;
2. Brächer T., Pirro P., Westermann J., Sebastian T., Lägel B., Van de Wiele B., Vansteenkiste A., Hillebrands B., Generation of propagating backward volume spin waves by phase-sensitive mode conversion in two-dimensional microstructures, *Appl. Phys. Lett.* 102, 132411 (2013);

### Затухание продольных ультразвуковых колебаний в кристаллах $\text{NaClO}_3$

Игшьева А. Л.<sup>1</sup>, Соболева Э. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Юргинский технологический институт ТГУ

Эл. почта: sobolevaeno@mail.ru

Упругие волны в твердых телах характеризуются затуханием и скоростью распространения. Измерения этих параметров позволяют изучать влияние на упругие волны любых свойств твердого тела, связанных с их кристаллической решеткой. В настоящее время установлены более десятка различных типов взаимодействий, которые влияют на распространение упругих волн [1, 2]. Если в процессе динамических испытаний упругого тела, как, например, при использовании ультразвука, механические напряжения и деформации изменяются не синфазно, то в неупругом теле некоторая доля подведенной энергии всегда расходуется не на саму деформацию, а на различные другие процессы в решетке и в конце концов превращается в теплоту (внутреннее трение, вызывающее затухание упругих колебаний).

В настоящее время установлено, что в ионных монокристаллах для области частот  $\sim 10^5$  Гц основной вклад во внутреннее трение вносят дислокационные механизмы (например, затухание, обусловленное термоупругим эффектом, в металлах составляет около 50 % общего затухания, а для полупроводников и диэлектриков его вклад в общее затухание не превышает нескольких процентов [1]).

Систематическое изучение внутреннего трения в килгерцевом диапазоне частот в кристаллах типа  $\text{A}_1\text{B}_7$  выполнено С.П. Никаноровым и Б.К. Кардашевым [3]. Названными авторами в ходе теоретического анализа экспериментальных данных исследовалась роль барьера Пайерлса и силовых полей точечных дефектов различного происхождения при термически активируемом колебательном движении дислокаций вблизи положения равновесия. По результатам измерений амплитудно-зависимого поглощения ультразвуковых колебаний удалось практически однозначно показать, что в поле напряжений ультразвуковых волн дислокации рассеивают энергию колебаний на тех же препятствиях, которые играют значительную роль в формировании уровня напряжений течения. Представляет интерес получить данные по внутреннему трению в кристаллах с существенной ковалентной составляющей межатомной связи. Одним из таких объектов является кристалл хлората натрия ( $\text{NaClO}_3$ ).

Исследование неупругих свойств монокристалла  $\text{NaClO}_3$  проводили в двух вариантах. Амплитудно-независимое внутреннее трение в температурном интервале 77 – 525 К на частотах  $\approx 100$  кГц изучали по «полуширине» резонансной кривой. Описание установки и детали экспериментальной методики для этого случая приведены в монографии [4].

Амплитудно-зависимое внутреннее трение изучали на тех же частотах и дискретных температурах 300, 400 и 500 К с помощью электроакустической установки с нагрузочным сопротивлением  $R = 1,2$  кОм, аналогичной приведенной в [3].

Монокристаллы  $\text{NaClO}_3$  выращивались из водных растворов препарата марки хч методом медленного испарения при комнатных температурах. Лучшие экземпляры имели совершенную кубическую форму и достигали размеров  $25 \times 15 \times 10$  мм<sup>3</sup>. Образцы в форме стержней вырезались способом мокрой нити, и их длина вдоль кристаллографического направления  $\langle 100 \rangle$  соответствовала условию резонансного возбуждения двойного составного вибратора на основной частоте 100 кГц для продольной стоячей ультразвуковой волны. Свежие дислокации перед началом измерений в образцы не вводились. Максимальная амплитуда относительной колебательной деформации в пучности стоячей волны изменялась в пределах двух порядков (от  $10^{-7}$  до  $10^{-5}$ ).

Результаты эксперимента:

1. Установлено, что механический спектр образца  $\text{NaClO}_3$  содержит максимумы внутреннего трения (пять полностью разрешенных при температурах 110, 225, 260, 400 и 450 К), а также восходящую ветвь максимума  $Q^{-1}$  при  $T > 500$  К.

2. Обнаружен выраженный пик внутреннего трения при  $T = 400$  К, при которой стартуют многие нелинейные свойства хлората натрия.

3. Выявлено, что контрольный эксперимент с кристаллом  $\text{NaCl}$  демонстрирует типичный вид функции  $\delta(\varepsilon)$  с амплитудной зависимостью внутреннего трения при  $\varepsilon \geq 10^{-5}$ , связанной с движением дислокаций. В кристалле  $\text{NaClO}_3$  при  $T = 500$  К практически отсутствует амплитудно-независимая составляющая часть внутреннего трения.

Список литературы

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Ч. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Пер. с англ. Под ред. И.Г.Михайлова и В.В. Леманова. М.: Изд. «Мир», 307 с., 1972;
2. Klimentov, V., Borozna, V., Zaitsev, K. Influence of ultrasonic superficial processing on properties of titanic alloys // METAL 2009 — 18th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, p. 273-278, 2009;
3. Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, Гл.ред.физ.-мат.лит., 250 с., 1985;
4. Беломестных В.Н., Соболева Э.Г. Акустические, упругие и неупругие свойства кристаллов галогенатов натрия. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 276 с., 2009;

## Математическое моделирование лазерной абляции металлов фемтосекундными импульсами

Давыдов Р. В.<sup>1</sup>, Антонов В. И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: davydovroman@outlook.com

Одним из наиболее распространённых лазерных методов получения наночастиц и наноструктур является импульсная лазерная абляция твердых мишеней, находя-

щихся в вакууме или в окружающем их газе или жидкости [1]. Лазерная абляция – это довольно простой, прямой и быстрый способ синтеза наночастиц, который позволяет получать частицы различного типа. В этом методе не требуются большие времена для проведения химических реакций, а также высокие температуры и давления, характерные для химического синтеза. Кроме того, нет необходимости использовать токсичные или взрывоопасные химические исходные вещества. Метод лазерной абляции применим практически с неограниченной комбинацией материалов мишеней и жидкостей, что позволяет осуществлять синтез наночастиц в подобранной среде. Свойства генерируемых наночастиц – распределение по размерам, форма, состав и структура для каждого материала мишени зависят от параметров лазера, используемого для абляции (длины волны излучения, длительности и частоты импульса, энергии в импульсе). В связи с этим большой интерес представляет математическое моделирование этого метода для расчета оптимальных параметров лазерного излучения для генерации наночастиц определенного размера с учетом свойств материала из которого они будут получены [2].

В настоящее время для математического моделирования лазерной абляции пытаются применять молекулярно-динамические модели, в которых численно интегрируются уравнения движения для систем атомов с выбранным потенциалом взаимодействия, что требует значительных вычислительных ресурсов. Это существенно ограничивает размеры исследуемой области абляции металла, так, например, при расширении области абляции (в зависимости от площади воздействия лазерного излучения) в 3 — 4 раза, число процессоров выполняющих вычисления, которые необходимо задействовать для решения поставленной задачи, требуется увеличить от нескольких раз до порядка. Многие не обладают такими возможностями. Поэтому в большинстве случаев для моделирования используют различные двухтемпературные модели, в том числе гидродинамические. При этом расчет термодинамических свойств металла в широком диапазоне плотностей и температур при воздействии на него лазерного излучения представляет собой сложную задачу, которая не всегда хорошо решена в различных уравнениях состояния, нужных для решения уравнений гидродинамики, что значительно снижает точность решений, а в некоторых случаях делает её неприемлемой.

Поэтому для проведения моделирования фемтосекундной лазерной абляции в нашей работе предложена одномерная двухтемпературная гидродинамическая модель с использованием широкодиапазонной модели теплопроводности и нового разработанного нами полуэмпирического уравнения состояния [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{\partial v}{\partial m} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial m} &= 0, v = \frac{\partial x}{\partial t} \\ \frac{\partial \varepsilon_e}{\partial t} + P_e \frac{\partial v}{\partial m} &= \frac{\partial}{\partial m} \left( \kappa \rho \frac{\partial T_e}{\partial m} \right) - \frac{\alpha_{ei}}{\rho} (T_e - T_i) + J_L \\ \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} + P_i \frac{\partial v}{\partial m} &= \frac{\alpha_{ei}}{\rho} (T_e - T_i) \end{aligned}$$

где  $\rho$  – массовая плотность облучаемого металла,  $\rho_0$  – плотность при нормальных условиях,  $v$  – скорость,  $t$  – время,  $x(m, t)$  – траектория частицы с координатой  $m$ ,  $m_0$  – координата поверхности металла,  $P = P_e + P_i$  – полное, электронное и ионное

давление,  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_i$  – полная, электронная и ионная внутренняя энергия единицы массы;  $T_e, T_i$  – электронная и ионная температуры,  $\kappa$  — коэффициент электронной теплопроводности,  $\alpha_{ei}$  – коэффициент электронно-ионной релаксации,

$$J_L = \frac{F}{\tau_L \delta \sqrt{\pi \rho}} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_L^2}\right) \exp\left(-\frac{x(m, t) - x(m_0, t)}{\delta}\right)$$

– энергия лазерного излучения, которое поглощается единицей координаты за единицу времени [4], где  $\tau_L$  – длительность лазерного импульса,  $F$  – энергия лазерного излучения, поглощаемого поверхностью,  $\delta$  – толщина скин-слоя металла.

Вязкостью и теплопроводностью ионов металла пренебрегаем. Коэффициент электронной теплопроводности алюминия рассчитывается по модели [5].

Предложенная модель была апробирована для моделирования лазерной абляции алюминия и меди в вакууме. Использование нового разработанного уравнения состояния позволило существенно повысить точность расчета глубины абляции в широком диапазоне плотностей энергий излучения и различных длительностях импульса для обоих металлов. В дальнейшем планируется модифицировать модель для исследований лазерной абляции металлов в различных средах.

#### Список литературы

1. Макаров Г.Н., Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии, УФН, Т. 183, № 7, 673-718, 2013;
2. Zhang J., Chen Y., Hu M., Chen X., An improved three-dimensional two-temperature model for multi-pulse femtosecond laser ablation of aluminum, J. Appl. Phys., 117, 063104, 2015;
3. Антонов В.И., Давыдов Р.В., Калинин Н.В., Широкодиапазонные уравнения состояния алюминия и меди для моделирования воздействия лазерного излучения на вещество, журнал “Научно-технические ведомости СПбГПУ”, 1(190), 198-203, 2014;
4. Petrov Yu. V., Energy exchange between the lattice and electrons in a metal under femtosecond laser irradiation, Laser and Particle Beams, 23, 283-289, 2005;
5. Inogamov N.A., Zhakhovskii V.V., Ashitkov S.I., Two-temperature relaxation and melting after absorption of femtosecond laser pulse, Appl. Surf. Sci., 255, 9712-9716, 2009;

## Симметричные аспекты продольного пьезоэлектрического эффекта в кристаллах

Замковская А. И.<sup>1</sup>, Максимова Е. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КФУ им. В.И.Вернадского

Эл. почта: trabem.z@gmail.com

В работе исследована анизотропия физических величин, описывающих продольный пьезоэлектрический эффект в кристаллах разных классов симметрии. Построены указательные поверхности пьезоэлектрических модулей ( $d_{ijk}$ ), диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_{ij}$ ) и упругой податливости ( $s_{ijkl}$ ). Исследована зависимость от

кристаллографического направления коэффициента электромеханической связи ( $k$ ), описывающего способность пьезоэлектрика преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот.

$$k^2 = d^2 / \epsilon s \epsilon_0$$

Ориентация и положение указательных поверхностей исследованных свойств относительно кристаллофизической системы координат определяется принципом Неймана: симметрия свойства включает в себя элементы симметрии кристалла.

Симметрия ориентационной зависимости коэффициента электромеханической связи определяется суперпозицией указательных поверхностей величин, его описывающих. Определяющую роль при этом играют указательные поверхности, симметрия которых ниже.

#### Список литературы

1. А.А. Панич, М.А. Мараховский, Д.В. Мотин. Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона» – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета, 2011;
2. D. Mainprice, F. Bachmann, R. Hielscher, H. Schaeben, G. E Lloyd. Calculating anisotropic piezoelectric properties from texture data using the MTEX open source package // Special Publications – London: Geological Society, 2014. 409 с.;
3. Ю.И. Сиротин М.П. Шаскольская. Основы кристаллофизики. – М.: Наука, 1979. 640 с.;
4. С. Н. Популях. Пакеты прикладных программ в физике – Симферополь: «Пирамида-Крым», 1998. 104 с.;
5. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – Санкт-Петербург: СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.;

## Моделирование процесса коалесценции бабстонов в дисперсных системах с учетом фрактальности среды

*Кумыков Т. С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной математики и автоматизации

Эл. почта: macist20@mail.ru

Наличие большого количества микронных пузырьков — «бабстонов» [1] в жидкости оказывает существенное влияние на электрические свойства дисперсных систем, находящихся как в постоянных, так и в высокочастотных электрических полях; они оказывают также влияние на величину напряжения зажигания разряда в воде; реологические и релаксационные свойства газожидкостных систем во многом определяются наличием в них мельчайших газовых пузырьков. Оценки радиуса пузырьков неоднозначны, так как они термодинамически метастабильны вследствие адсорбции ионов на их поверхности. Исходя из этого, о степени влияния бабстонов на дисперсные системы можно судить по величине и механизму роста бабстонов. Поэтапно исследование механизмов роста бабстонов в дисперсных системах является актуальной проблемой.

В настоящей работе рассматривается дисперсная система – «капля-пузырек» и предложена нелокальная математическая модель процесса коалесценции бабстонов в дисперсной системе, учитывающая фрактальность среды. В рамках теории Лифшица-Слезова-Вагнера, главную роль в этом процессе играет механизм роста бабстонов, определяющий вид конечного распределения микропузырьков по размерам. Рассмотрена такая схема коалесценции, когда микропузырьки растут, как за счет диффузии из окружающей среды, так и за счет реакции на поверхности пузырьков.

Предложено обобщенное уравнение процесса коалесценции в виде

$$\partial_{0,t}^{\alpha} R(t) = \frac{R_c^3(0)}{R(t)} \left( \frac{1}{R_c(t)} - \frac{1}{R(t)} \right), \quad 0 < \alpha < 1,$$

где  $\partial_{0,t}^{\alpha}$  — регуляризованная дробная производная порядка  $\alpha$  от функции радиуса бабстонов  $R(t)$  с началом и концом в точках 0 и  $t$  (производная по Капуто),  $R_c^3(0)$  — критический радиус бабстонов, отвечающий началу стадии коалесценции,  $R_c(t)$  — критический радиус бабстонов.

Решение модели было получено с помощью численных методов дробного исчисления [2, 3]. С помощью программного пакета построены новые профили расчетных кривых, представляющих собой бифуркационные диаграммы процесса коалесценции бабстонов. Показано, что в результате существования «степенных хвостов» в динамике относительного радиуса бабстонов, процесс его роста замедляется и, что параметр  $\alpha$  является параметром интенсивности коалесценции.

#### Список литературы

1. Bunkin N.R., Ninham B.W., Babenko V.A., Suyazov N.V., Sychev A.A. Role of Dissolved Gas in Optical Breakdown of Water: Differences between Effects Due to Helium and Other Gases. // J. Phys. Chem. B. — 2010, V. 114. - P. 7743-7752;
2. Sweilam N.H., Khader M.M., Mahdy A.M.S. // Numerical studies for solving fractional-order logistic equation // International Journal of Pure and Applied Mathematics V. 78 №. 8 2012, p. 1199-1210;
3. Michael D. H. // Origin of Anorthosite by Textural Coarsening: Quantitative Measurements of a Natural Sequence of Textural Development journal of petrology, 1998, V. 39, № 7, p. 1307–1323;

## Ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии

Остреинов Ю. М.<sup>2</sup>, Шудло И. М.<sup>1</sup>, Зайди Л.<sup>3</sup>, Касатов Д. А.<sup>1</sup>, Кошкарев А. М.<sup>1</sup>, Кузнецов А. С.<sup>1</sup>, Макаров А. Н.<sup>1</sup>, Сорокин И. Н.<sup>1</sup>, Сычева Т. В.<sup>1</sup>, Таскаев С. Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

<sup>2</sup>НГТУ

<sup>3</sup>University of Sciences and Technology HOUARI BOUMEDIENE, Algeria.

Эл. почта: wtfsnoo@gmail.com

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и функционирует ускорительный источник эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) – перспективной методики лечения злокачественных опухолей.



В 2014 году при поддержке Российского научного фонда создана лаборатория БНЗТ с целью к концу 2016 года сформировать поток нейтронов, пригодный для проведения БНЗТ. В докладе описывается ускорительный источник нейтронов, приводятся и обсуждаются результаты проведенных исследований и декларируются планы.

Для получения 3 мА 2,5 МэВ протонного пучка создан ускоритель нового типа – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией. К настоящему времени получен стационарный протонный пучок энергией 2 МэВ током 1,6 мА в течение времени более 1 ч. Монохроматичность энергии пучка составляет 0,1%, стабильность тока – 0,5%. Для увеличения высоковольтной прочности ускорителя с целью достижения требуемой величины тока протонного пучка предполагается модернизировать газовую обдирочную мишень.

Генерация нейтронов осуществляется при сбросе протонного пучка на литиевую мишень в результате пороговой реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ . Терапевтический пучок нейтронов получают с помощью системы формирования пучка, включающего в себя замедлитель, отражатель и поглотитель. В докладе представлены результаты оптимизации системы формирования пучка методом численного счета транспорта нейтронов и гамма-излучения и приведена конструкция этой системы, содержащей ряд новых идей.

Созданная установка является уникальной научной установкой. Она обеспечивает генерацию нейтронов, в том числе моноэнергетических, гамма излучения, альфа-частиц и позитронов и может быть использована сторонними организациями для проведения научных исследований.

В докладе представлены результаты измерений параметров нейтронного потока, результаты проведенных *in vitro* исследований БНЗТ и приведены примеры сотрудничества.

## Применение острогофокусированного импульсного электронного пучка для балансировки гироскопа

*Бордулева А. О.<sup>1</sup>, Соловьев В. В.<sup>2</sup>, Блейхер Г. А.<sup>1</sup>, Кривобоков В. П.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИ ТПУ

<sup>2</sup>АО «НПП «Полус»

Эл. почта: tcybenkoao@gmail.com

В настоящее время космическая отрасль развивается быстрыми темпами. Все больше стран запускают новые спутники, которые не только обеспечивают связь и навигацию, но и позволяют получать информацию о Земле и Солнечной системе. Одной из главных систем космического аппарата (КА) является система ориентации, которая позволяет стабилизировать положение его осей относительно заданных направлений. Для точной стабилизации и программных разворотов в КА устанавливают двигатели-маховики, которые позволяют управлять движением аппарата вокруг центра масс.

В процессе изготовления двигателя-маховика возникает ряд проблем, одной из которых является его дисбаланс, что впоследствии может привести к отклонению от заданной орбиты КА. В настоящее время существуют несколько способов устранения дисбаланса маховика: механический метод и использование концентрированных потоков энергии. Механический способ удаления металла является грубым и трудо-

емким, поэтому ведутся работы по применению концентрированных потоков энергии в целях балансировки маховиков. В качестве таких источников используются лазер и электронный пучок. Существует несколько работ, посвященных балансировке маховиков лазером, но данный метод обладает существенными недостатками, такими как высокое значение коэффициента отражения энергии ( $\sim 80\%$ ) и образование капельной фракции на поверхности обрабатываемого изделия. Упомянутые недостатки не присущи электронному пучку. Поэтому в работе была исследована возможность использования остросфокусированного электронного пучка для локального удаления вещества с поверхности, а также были определены оптимальные параметры обработки маховиков.

Работа выполнялась посредством электронно-лучевой установки (ЭЛУ-0,5-6) на основе пушки с плазменным катодом. Данная установка оснащена двухлинзовой фокусирующей системой, что позволяет получать пучки малого диаметра, вплоть до 200 мкм [1]. В качестве обрабатываемого материала была выбрана сталь 12Х18Н10Т. Толщина обрабатываемых образцов составляла 5 мм и диаметр — 20 мм.

В представленной работе была исследована технологическая задача, т.е. показана возможность испарения металлов при обработке электронными пучками. Также были построены зависимости массы испаряемого металла от параметров пучка (ток и плотность мощности пучка, длительность импульса). Благодаря проведенным исследованиям был выделен интервал значений плотности мощности электронного пучка ( $1,4 \dots 2 \text{ Вт/см}^2$ ), при котором процесс испарения осуществляется стабильно, без появления нежелательных эффектов, таких как перегрев изделия и взрывообразный выброс вещества на поверхность. Было показано, что обработка остросфокусированным импульсным электронным пучком не вносит существенный вклад в изменение физико-механических свойств материала.

Для оценки энергоэффективности применяемого метода в работе были проведены расчеты энерговклада электронного пучка в процесс испарения в сравнении с другими методами обработки (лазер, мощные импульсные пучки). Результаты показали, что применение электронного пучка является одним из эффективных методов.

В результате проделанной работы было показано, что остросфокусированный импульсный электронный пучок может быть использован для балансировки маховиков гироскопов. Были выделены оптимальные параметры для удаления вещества с поверхности стали: плотность мощности пучка  $P = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ , длительность импульса  $t = 650 \text{ мс}$ , скорость испарения  $V_{ev} = 11 \text{ г/с} \cdot \text{см}^2$ . При данных параметрах количество удаляемого металла можно варьировать от 1 до 100 мг, что достаточно для балансировки маховиков.

#### Список литературы

1. Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремпе Н.Г., Получение остросфокусированных пучков в электронных пушках с плазменным катодом, Приборы и техника эксперимента, №3, С. 104–109, 2009;

## Исследование диэлектрических свойств лантанидомезогена на основе тербия

Сахацкий А. С.<sup>1</sup>, Добрун Л. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ

Эл. почта: ale.x-man@mail.ru

В последние годы значительное внимание уделяется исследованию фундаментальных свойств и практическому применению новых жидкокристаллических (ЖК) соединений, синтезированных на основе редкоземельных элементов (лантаноидов). Жидкокристаллические комплексные соединения лантаноидов (лантанидомезогены) являются парамагнетиками и по сравнению с классическими жидкими кристаллами обладают аномально большой анизотропией магнитной восприимчивости, которая может быть как положительной, так и отрицательной [1]. В результате чего лантанидомезогены легко ориентируются под воздействием электрического и магнитного полей. Кроме того, эти соединения обладают высокой люминесценцией и могут использоваться в качестве компонентов электронных устройств излучающих свет, таких, как органические светодиоды, дисплеи, лазеры [2].

В данной работе исследованы диэлектрические свойства ЖК комплекса на основе тербия Tb(CPDk<sub>3-5</sub>)<sub>3</sub>Vru<sub>17-17</sub>: трис[1-(4-(4-пропилциклогексил) фенил) октан-1,3-дионо]-[5,5'-ди(гептадецил)-2,2'-бипиридин]тербия. Комплекс обладает нематической фазой в интервале температур 95–160 С°. Определены условия измерения главных компонент диэлектрической проницаемости, найдены величина и знак диэлектрической анизотропии жидкокристаллического комплекса. Измерения диэлектрической проницаемости комплекса тербия проводились с использованием измерителя полного импеданса НЮКИ-3532 в интервале частот электрического поля  $f$  от 100Гц до 5МГц. Изучены релаксационные процессы ответственные за дисперсию главных значений диэлектрической проницаемости образца. Получены времена диэлектрической релаксации, энергии активации и дипольный момент комплекса. Определена величина и знак оптической анизотропии комплекса.

### Список литературы

1. 1. K. Binnemans, Yu. Galyametdinov, R. Van Deun, D. Bruce, S. Collinson, A. Polishchuk, I. Bikhantaev, W. Haase, A. Prosvirin, L. Tinchurina, I. Litvinov, A. Ubajdullin, A. Rakhmatullin, K. Uytterhoeven, and L. Meervelt, J. Am. Chem. Soc. 122, 4335 (2000);
2. 2. Yu. Galyametdinov, A. Knyazev, V. Dzhabarov, T. Cardinaels, K. Driesen, C. Gorller-Warland, and K. Biennemans, Advanced Materials 20, 252 (2008);

## Изучение ассоциации молекул в атмосферном воздухе масс-спектрометрическим методом

Титов Ю. А.<sup>1</sup>, Кузьмин А. Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИАП РАН

Эл. почта: top1m@mail.ru

Как известно, уравнение Ван-дер-Ваальса является приближенным, что объясняется явлением ассоциации молекул газа, которое данным уравнением не учитывается. При достаточно сильном сжатии газа его молекулы сближаются настолько, что силы взаимного притяжения заставляют наименее подвижные молекулы объединяться в комплексы, называемые ассоциациями. Сначала появляются двойные, затем тройные и еще более сложные ассоциации. По мере сжатия газа количество одиночных молекул в нем уменьшается, а количество молекулярных ассоциаций увеличивается, и структура последних становится все более сложной. Взаимное расположение молекул в ассоциациях соответствует минимальному значению их общей потенциальной энергии, поэтому ассоциация представляет собой устойчивое образование, распад которого возможен только при условии подвода энергии извне.

Поэтому уравнение Ван-дер-Ваальса имеет приемлемую точность лишь в той области состояния газа, в которой роль процессов ассоциации незначительна и газ состоит практически только из одиночных молекул, т.е. в области низких давлений и высоких температур.

Атмосферный воздух является удобным объектом для исследования ассоциации молекул, поскольку он представляет собой смесь простых газов с достаточной концентрацией: азот – 78%, кислород – 21%, аргон 1%. Поэтому, если предположение об ассоциации молекул справедливо, в масс-спектрах атмосферного воздуха должны наблюдаться различные комбинации его составных компонентов.

Пробы атмосферного воздуха и модельных газовых смесей изучались на квадрупольном масс-спектрометре МС7-100 с прямым капиллярным вводом пробы при атмосферном давлении. Данный прибор позволяет в режиме реального времени анализировать примесный состав атмосферного воздуха.

В результате масс-спектрометрического анализа, были получены масс-спектры атмосферного воздуха. В масс-спектрах, помимо основных компонентов наблюдаются дополнительные линии, часть которых может быть интерпретирована, как ассоциации. Таковыми являются  $\text{ArN}$  (54 а.е.м.),  $\text{ArO}$  (56 а.е.м.),  $\text{ArN}_2$  (68 а.е.м.),  $\text{ArNO}$  (70 а.е.м.) и  $\text{ArO}_2$  (72 а.е.м.),  $\text{N}_2\text{O}_2$  (60 а.е.м.). Концентрации указанных компонент можно оценить, как 0.15, 0.05, 0.05, 0.02 и 0.05 ppm соответственно. Помимо этих линий в спектрах воздуха наблюдались так же линии 50, 51, 52 а.е.м. на уровне 0.1 ppm, которые, по-видимому, соответствуют каким-либо органическим загрязнениям в воздухе, поскольку забор проб воздуха осуществлялся в условиях города и, поэтому, логично ожидать наличия летучих промышленных загрязнений.

Для проверки достоверности полученных результатов была так же проанализирована специально приготовленная тестовая смесь аргона с воздухом (28% аргон, 56% азот, 16% кислород). Полученные масс-спектры показали наличие аналогичных ассоциаций. Исключение составило только полное отсутствие ассоциаций 70( $\text{ArNO}$ ) и 72( $\text{ArO}_2$ ).

Таким образом, в работе показано, что в атмосферном воздухе наблюдаются ассоциации молекул газов его составляющих. Это факт необходимо учитывать при

расшифровке масс-спектров атмосферных загрязнений при экологическом мониторинге.

Список литературы

1. Кузьмин А.Г.// Квадрупольный масс-спектрометр. Патент на полезную модель № 94763 РФ, 27.05.2010 г.;

## **Быстрозакаленные металлические стекла на основе Fe-Co-V-P: структура, кристаллизация, магнитные свойства**

Прахова Д. А.<sup>1</sup>, Гришин А. М.<sup>1,2</sup>, Игнахин В. С.<sup>1</sup>, Луговская Л. А.<sup>1</sup>,  
Осауленко Р. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПетрГУ

<sup>2</sup>КТН

Эл. почта: darja\_pro@mail.ru

На сегодняшний день существует множество магнитомягких аморфных материалов, но наилучшее сочетание магнитных свойств достигнуто в материалах на основе Fe-Co-Ni. В промышленности широко применяются магнитомягкие металлические материалы номинального состава  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ . В работах [1, 2] проводилось исследование быстрозакаленных материалов номинальных составов  $Fe_{40}Co_{\xi}P_{14}B_6$ , где  $\xi = Co, Ni$ . Было показано, что замещение Ni на Co в получаемых материалах, приводит к улучшению магнитных свойств. При этом исследование влияния вариаций состава лент на магнитные свойства не проводилось.

В настоящей работе проводилось исследование кинетики кристаллизации и структуры  $Fe_{40-\xi}Co_{\xi}P_{14}B_6$  с  $\xi = 25, 32, 35$ . Заготовка была получена индукционной плавкой смеси химически чистых Fe, Co, B и  $Co_2P$  в атмосфере аргона, после нагревалась индуктором до температуры, превышающей на 100-120 К температуру плавления ( $T_m = 1313 K$ ), после чего сплав выдавливался через сопло в кварцевой ампуле на наружную поверхность быстро вращающегося массивного медного диска. Полученные таким методом материалы являются рентгено-аморфными.

Калориметрические исследования полученных материалов проводились с целью определения температурного интервала их практического использования. Исследования образцов осуществлялось в двух режимах: 1) *изохронном* – с различными постоянными скоростями нагрева  $\alpha = 2.5, 5, 10, 20$  и  $40 K/min$ ; 2) *изотермическом* – быстрый нагрев с  $\alpha = 40 K/min$  до заданной температуры  $T$  и далее выдержка образца при неизменном ее значении.

Для всех исследуемых образцов характерно образование экзотермических пиков на термограммах, причем, при изохронном режиме максимальную температуру кристаллизации имеет образец  $Fe_{55}Co_{25}P_{14}B_6$ , минимальную –  $Fe_{48}Co_{32}P_{14}B_6$ . Из зависимостей температур кристаллизации  $T_x$  от скорости нагрева  $\alpha$  на основе теории Колмогорова-Джонсона-Мела-Аврами были определены активационные энергии атомных переходов из аморфного в кристаллическое состояние, которые составляют:  $Q(Fe_{45}Co_{35}P_{14}B_6) = 50640 K$ ,  $Q(Fe_{48}Co_{32}P_{14}B_6) = 46620 K$ ,  $Q(Fe_{55}Co_{25}P_{14}B_6) = 51500 K$ .

На термограммах в изотермическом режиме наблюдался так называемый *инкубационный эффект* – время задержки кристаллизации  $t_{\text{inc}}$  зависит от близости температуры  $T$  к температуре кристаллизации  $T_x$ . Обнаружено, что активационные энергии для зависимостей  $T_x(\alpha)$  и  $t_{\text{inc}}(T)$  совпадают.

Рентгеновский дифракционный анализ показал, что при отжиге образцов происходит образование двух основных кристаллических фаз: ОЦК  $\alpha\text{-FeCo}$  (ICSD-56273) и тетрагональной FeCoPB, аналогичной фазе  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$  (ICSD-614132). Обнаружено, что в отожженном образце номинального состава  $\text{Fe}_{55}\text{Co}_{25}\text{P}_{14}\text{B}_6$  наблюдается уменьшение концентрации фазы  $\alpha\text{-FeCo}$  и увеличение концентрации фазы FeCoPB. Методом полнопрофильного анализа были определены процентное содержание фаз и их структурные параметры.

Определение структуры ближнего порядка металлических стекол осуществлялось методом рентгеновской дифракции в  $\text{CuK}_\alpha$  и  $\text{MoK}_\alpha$  излучении. Рентгеновские дифракционные картины исходных аморфных исследуемых материалов обрабатывались с использованием метода Финбака-Уоррена [3]. Для кристаллических фаз,  $\alpha\text{-FeCo}$  и FeCoPB из координат атомов были рассчитаны радиусы координационных сфер и координационные числа пар атомов, из которых, в свою очередь, были построены теоретические кривые распределения парных функций  $D(r)$ . Результаты показывают, что положение максимумов на экспериментальных кривых  $D(r)$  лучше согласуется с таковыми для кристаллической фазы FeCoPB, то есть ближний порядок в аморфных материалах формируется по типу данной фазы.

Магнитомягкие быстрозакаленные материалы на основе FeCoPB обладают следующими магнитными свойствами: коэрцитивная сила порядка 4 А/м, дифференциальная магнитная проницаемость выше 110 000 на частоте 60 Hz. Термические отжиг позволяет улучшить магнитомягкие характеристики получаемых материалов благодаря образованию нанокристаллов в аморфной матрице материала.

#### Список литературы

1. Hollmark M., Tkatch V.I., Grishin A.M., Khartse S.I., Processing and Properties of Soft Magnetic Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>P<sub>14</sub>B<sub>6</sub> Amorphous Alloy, IEE Transactions on Magnetics № 4, 2278 – 2280 p., 2001;
2. Tkatch V.I., Grishin A.M., Khartsev S.I., Delayed nucleation in Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>P<sub>14</sub>B<sub>6</sub> metallic glass, Materials Science and Engineering A337, 187 – 193 p., 2002;
3. Алешина Л.А., Фофанов А.Д., Рентгеноструктурный анализ аморфных материалов, Петрозаводск, 88 с., 1987;

## Структура целлюлозы, полученной методом механической деструкции

Латуга А. А.<sup>1</sup>, Логинова С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПетрГУ

Эл. почта: latuga.nastya@mail.ru

Широко известно использование целлюлозы в качестве матрицы для создания композиционных материалов, что обусловлено ее дешевизной, широкой распространенностью и биоразлагаемостью. В результате механического измельчения повыша-

ется реакционная способность целлюлозы, вызванная разрывом или изменением длин связей в макромолекулах, искажением или разрывом водородных связей между макромолекулами. Увеличение реакционной способности приводит к установлению лучшего взаимодействия между компонентами композита, особенно в тех случаях, когда одним из составляющих является компонент в наноразмерном состоянии.

В работе представлены результаты рентгенографических исследований и модели структуры образцов целлюлозы, подвергнутой механической деструкции.

Исходным сырьем была микрокристаллическая целлюлоза с размером частиц менее 50 мкм. Размол целлюлозы производился в планетарной размольнице Pulverisette 7 premium line. Была использована агатовая размольная чаша размером 20 мл и мелющие шары из агата 5 мм. Максимальное время размола составило 6 часов.

Рентгенографирование образцов выполнялось на автоматизированном дифрактометре ДРОН-6.0 на  $\text{CuK}\alpha$ -,  $\text{MoK}\alpha$ - и  $\text{FeK}\alpha$ -излучениях в симметричной геометрии на отражение и на прохождение.

Были определены размеры областей когерентного рассеяния и степень кристалличности аморфно-кристаллических образцов. Уточнение значений параметров элементарной ячейки исходной микрокристаллической целлюлозы выполнено методом Ритвельда.

Степень кристалличности исходной микрокристаллической целлюлозы порядка  $70\pm 5\%$ . Области когерентного рассеяния анизотропны.

После одного часа размола степень кристалличности образца уменьшается на 35%, длина элементарных фибрилл уменьшается на 30 Å.

После трех часов размола дифракционная картина исследуемого образца становится подобной дифракционной картине аморфного материала. Последующий размол (до 6 ч.) не приводит к каким-либо изменениям на кривой распределения интенсивности рассеяния.

Методом Финбака–Уоррена определены характеристики ближнего порядка аморфной целлюлозы. Анализ значений радиусов координационных сфер, их размытий и координационных чисел позволяет сказать, что в результате размола целлюлозные цепочки деформируются, изменяются длины связей в молекулах, а также происходит разрыв и изменение длин водородных связей, в том числе между макромолекулами целлюлозы.

Поиск моделей строения измельченной целлюлозы выполнялся путем создания пространственных конфигураций атомов с последующим поиском минимума энергии системы. Показано, что структура областей ближнего упорядочения целлюлозы, измельченной в шаровой мельнице в течение 6 часов, может быть описана на основе кластеров малого размера, содержащих искаженные целлюлозные цепочки, длина которых не превышает 25 Å, при сохранении конформации «кресло» элементарного звена и tg-конформации гидроксиметильных групп.

## Тепловые колебания в одномерном кристалле

Симонов М. В.<sup>1</sup>, Кривцов А. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: Simonov.maskim.v@gmail.com

В настоящее время множество научных трудов посвящено исследованию процессов, протекающих в идеальных кристаллах [1-3]. Такие кристаллы обладают свойствами отличными от материалов, в которых наблюдаются различные структурные дефекты. В простейших дискретных системах, таких как одномерный кристалл, распространение тепла не подчиняется закону Фурье [4-6]. Если в начальный момент времени частицы одномерного кристалла с линейным взаимодействием упорядочены, а их скорости заданы случайно, то начинается колебательный процесс перехода кинетической энергии в потенциальную энергию. Этот переход заканчивается распределением внутренней энергии между кинетическими и деформационными степенями свободы, определяемым теоремой о вириале [7]. Получено аналитическое решение, позволяющее определить, что колебания кинетической и потенциальной энергии в линейном одномерном кристалле выражаются через функцию Бесселя первого рода. Однако в случае нелинейного взаимодействия между частицами — аналитического решения нет.

В данной работе рассмотрен одномерный кристалл с нелинейным взаимодействием частиц. Представлены две постановки задачи: определение колебаний кинетической энергии при начальном равномерном задании температуры по кристаллу и исследование колебаний кинетической температуры при задании синусоидального профиля температуры кристалла.

Для проведения исследования введен безразмерный параметр  $\alpha$ , характеризующий отношение влияния линейного и нелинейного взаимодействия между частицами одномерного кристалла.

Для первой постановки задачи была исследована кинетическая энергия кристалла и ее зависимость от параметра нелинейности. Получено, что с увеличением нелинейности скорость затухания колебаний увеличивается. Предложена аппроксимация закона затухания колебаний кинетической энергии кристалла для различного значения нелинейности. Предложенная аппроксимация дает хорошее соответствие для малой нелинейности.

Хорошее соответствие предложенной аппроксимации при малой нелинейности для случая равномерного задания температуры может свидетельствовать, что аналитическое решение не нарушается при введении малой нелинейности. Таким образом, можно сделать вывод об устойчивости аналитического решения, полученного в [7].

Для второй постановки задачи была исследована зависимость кинетической температуры кристалла от параметра нелинейности  $\alpha$ . Получено, что с увеличением нелинейности скорость затухания колебаний амплитуды также увеличивается. Предложена аппроксимация закона затухания амплитуды температурного профиля кристалла для различного значения параметра нелинейности  $\alpha$ . Предложенная аппроксимация также дает хорошее соответствие для малой нелинейности.

Сопоставлены графики зависимостей параметров закона затухания от параметра нелинейности для двух начальных условий (равномерная температура и синусоидальный профиль температуры). Показано различие в законах затухания для двух рассмотренных задач.



## Список литературы

1. Кривцов А.М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой. М.: Физматлит, 304 с., 2007;
2. Nakazawa H. // Prog. Theor. Phys. Suppl., V. 45., P. 231–262., 1970;
3. Кривцов А.М., Ле-Захаров А.А. Исследование процесса теплопроводности кристаллах с дефектами методами молекулярной динамики// ДАН. Т. 420. № 1. С. 45 – 49, 2008;
4. Giardina C., Livi R., Politi A., Vassalli M. // Phys. Rev. Lett., V. 84., № 10. P. 2144–2147, 2000;
5. Lepri S., Livi R., Politi A. // Phys. Rev. Lett. V. 78. № 10. P. 1896–1899, 1997;
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. Т. 1. Теоретическая физика. М.: Физматлит. 224 с, 2004;
7. Кривцов А.М. Колебания энергий в одномерном кристалле ДАН, том 458, № 3, с. 279–281, 2014;

## Коэффициент Нернста-Эттингсгаузена в высокотемпературных сверхпроводниках системы Y-Ba-Cu-O в нормальной фазе

Мартынова О. А.<sup>1</sup>, Гасумянц В. Э.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбПУ

Эл. почта: olya218@yandex.ru

Хорошо известно, что высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) характеризуются, помимо аномально высоких значений критической температуры, наличием необычных свойств в нормальном (не сверхпроводящем) состоянии. Одним из примеров являются кинетические коэффициенты, температурные и концентрационные зависимости которых демонстрируют целый ряд нетривиальных особенностей. При этом в противоположность огромному объему экспериментальных результатов, посвященных анализу температурных зависимостей удельного сопротивления, коэффициентов термоэдс и Холла, накопленных еще в первые годы изучения ВТСП-материалов (см., например, обзоры [1–3] и ссылки в них), данные о поведении коэффициента поперечного эффекта Нернста-Эттингсгаузена (НЭ),  $Q$ , достаточно малы и подтверждаются, преимущественно, только качественному анализу. Основной причиной этого является то, что количественный анализ температурных зависимостей коэффициента НЭ невозможен при использовании модельно-независимого подхода.

По указанным причинам данная работа посвящена сравнительному экспериментальному исследованию коэффициента НЭ в образцах ВТСП иттриевой системы с различными типом легирования:  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $x=0.09-0.39$ ),  $YBa_2Cu_{3-x}Zn_xO_y$  ( $x=0.05-0.125$ ),  $Y_{1-x}Ca_xBa_2Cu_3O_y$  ( $x=0.025-0.2$ ),  $Y_{1-x}Ca_xBa_{1.5}La_{0.5}Cu_3O_y$  ( $x=0.1-0.4$ ) и  $Y_{1-x}Ca_xBa_{2-x}La_xCu_3O_y$  ( $x=0.05-0.3$ ). При этом количественный анализ полученных результатов проводится совместно с данными для температурных зависимостей коэффициента термоэдс, полученных на тех же образцах, в рамках единых модельных представлений о структуре энергетического спектра ВТСП-соединений. Данный подход основан на использовании модели узкой зоны [4], предполагающей наличие

узкого пика плотности состояний в окрестности уровня Ферми, и подробно описан в [5].

Обнаружено, что для всех исследованных типов отклонений от стехиометрии вид зависимости  $Q(T)$  остается качественно неизменным. Коэффициент НЭ при  $T = 300\text{K}$  положителен, при понижении температуры он слабо возрастает, затем зависимость  $Q(T)$  демонстрирует широкий максимум, после чего происходит быстрое падение значения  $Q$ . Абсолютные значения  $Q$  крайне малы (в единицах подвижности они не превышают  $0.8 \text{ см}^2/(\text{Вс})$  во всем исследованном диапазоне легирования), при этом характер их изменения в исследованных системах является различным. В  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  значение  $Q$  ( $T = 300\text{K}$ ) существенно возрастает с ростом дефицита кислорода, в  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  и  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$  оно изменяется очень незначительно, а в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Zn}_x\text{O}_y$  и  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_y$  – уменьшается.

Анализ полученных результатов проводился следующим образом. Сначала на основе обработки по модели узкой зоны [4] данных для коэффициента термоэдс для всех образцов были определены значения четырех основных параметров энергетического спектра и системы носителей заряда – степень заполнения зоны электронами, полная эффективная ширина зоны, доля делокализованных состояний и степень асимметрии зоны. Эти значения использовались затем при количественном анализе зависимостей  $Q(T)$ , что позволило дополнительно однозначно определить значения подвижности носителей заряда,  $u$ , и степени асимметрии закона дисперсии. Обнаружено, что значения  $u$  для всех образцов не превышают  $3 \text{ см}^2/(\text{Вс})$ , что связано, по нашему мнению, с узостью проводящей зоны. На изменение подвижности под действием легирования оказывают влияние два фактора – расширение проводящей зоны, приводящее к росту  $u$ , и рост степени разупорядочения системы, приводящий к падению  $u$ . Соотношение их степени влияния и определяет динамику подвижности при конкретном типе легирования. В исследованных системах значения  $u$  изменяются поразному, но во всех случаях обнаруженная зависимость  $u(x)$  может быть объяснена на основе данных об изменении значений основных параметров энергетического спектра, полученных из анализа температурных зависимостей коэффициента термоэдс. Что касается асимметрии закона дисперсии, то полученные данные позволяют сделать вывод, что ее наличие является фундаментальным свойством энергетического спектра иттриевых ВТСП, а ее степень очень слабо изменяется при варьировании состава образцов.

#### Список литературы

1. Ong N.P., The Hall effect and its relations to other transport phenomena in the normal state of the high temperature superconductors, in: Physical properties of high temperature superconductors II, ed. by D.M.Ginsberg. World Scientific, Singapore, 459-507, 1990;
2. Iye Y., Transport properties in high  $T_c$  cuprates, in: Physical Properties of High Temperature Superconductors III, ed. by D.M.Ginsberg. World Scientific, Singapore, 285-361, 1992;
3. Kaiser A.B., Ucher C., Thermoelectricity of high-temperature superconductors, in: Studies of High Temperature Superconductors, vol. 7, ed. by A.V.Narlikar. Nova Science Publishers, New York, 353-392, 1991;
4. Gasumyants V.E., Kaidanov V.I., Vladimirskaia E.V., The electron transport phenomena in Y-based HTSC`s and their analysis on the basis of phenomenological narrow-band theory. The band structure transformation with oxygen content and substitution for Cu, Physica C, 248, 255-275, 1995;

5. Гасумянц В.Э., Агеев Н.В., Елизарова М.В., Коэффициент Нернста-Эттингсгаузена в легированных ВТСП системы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  нормальной фазе, ФТТ, 47, 196-207, 2005;

## Динамический феррит-сегнетоэлектрический магنونный кристалл

Устинова И. А.<sup>1</sup>, Никитин А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Эл. почта: [ustinovairin@yahoo.com](mailto:ustinovairin@yahoo.com)

В последние годы возрос интерес к исследованию спиновых волн (СВ) в магнитных пространственно-периодических волноведущих структурах – так называемых магنونных кристаллах [1]. Спектр спиновых волн таких структур характеризуется наличием запрещенных зон. Отдельный интерес вызывают динамические магنونные кристаллы (ДМК), в которых реализуется возможность «включения» и «выключения» периодичности свойств структуры [2, 3]. Другим актуальным направлением стало исследование искусственных материалов, обладающими мультиферроидными свойствами [4]. К ним относятся феррит-сегнетоэлектрические (ФС) слоистые структуры, в которых могут распространяться гибридные электромагнитно-спиновые волны (ЭСВ) [5]. До сих пор основное внимание уделялось исследованию пространственно-однородных ФС волноведущих структур, а пространственно-периодические структуры изучались мало. Целью данной работы является теоретическое исследование динамического магنونного кристалла на основе феррит-сегнетоэлектрической структуры. Особенности спектра ЭСВ, полученные в данной работе, могут быть использованы для создания новых сверхвысокочастотных (СВЧ) мультиферроидных устройств. В работе рассмотрена структура, состоящая из ферромагнитной пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) и сегнетоэлектрической пластины титаната бария-стронция, на которую были нанесены тонкие прозрачные для СВЧ электроды. Первый электрод, находившийся на поверхности структуры, представлял собой решетку металлических полосок. Второй электрод, расположенный между пленкой и пластиной был сплошным. При приложении электрического поля к электродам пластина сегнетоэлектрика оказывалась периодически поляризованной. Для расчета спектральных характеристик ЭСВ в периодической структуре было использовано дисперсионное уравнение, полученное в работе [6]. При расчетах толщина пленки ЖИГ была взята равной 5 мкм, намагниченность насыщения составляла 1750 Гс, магнитное поле  $H=1000$  Э, а диэлектрическая проницаемость 14. Толщина сегнетоэлектрической пластины была выбрана равной 500 мкм, диэлектрическая проницаемость неполяризуемого участка составляла 2500, а для поляризуемого участка варьировалась от 2400 до 1500. Магنونный кристалл был намагничен однородным полем  $H$ , направленным в плоскости структуры перпендикулярно направлению распространения ЭСВ. Было установлено, что чем больше период структуры, тем больше ширина первой запрещенной зоны. Это объясняется тем, что при увеличении периода уменьшается блоховский волновой вектор, частота первой запрещенной зоны тоже уменьшается и она входит в область сильной дисперсии. Расчеты для пленки толщиной 5 мкм показывают, что первая запрещенная зона с увеличением периода структуры увеличивает свою ширину до 21 МГц и уменьшает свою частоту примерно на 70 МГц. Для

пленки толщиной 10 мкм ширина запрещенной зоны увеличивается на 37 МГц, а частота уменьшается на 130 МГц. Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что для увеличения электрической управляемости феррит-сегнетоэлектрического динамического магنونного кристалла более предпочтительно использовать толстые ферритовые пленки. Подробное описание полученных результатов будет представлено на конференции. Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, Российским научным фондом и госзаданиями Минобрнауки РФ.

#### Список литературы

1. Krawczyk M., Grundler D., Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure, *J.Phys.: Condens. Matter*, 123202, 1-32, 2014;
2. Chumac A.V., Nuemann T., Serga A.A., Hillebrands B., Kostylev M.P., A current-controlled, dynamic magnonic crystal, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 205005, 1-8, 2009;
3. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Chumac A.V., Serga A.A., Vasyuchka V.I., Lähderanta E., Kalinikos B.A., Hillebrands H., A spin-wave logic gate based on a width-modulated dynamic magnonic crystal, *APL*, 102405, 2015;
4. Vaz C.A.F., Electric field control of magnetism in multiferroic heterostructures, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 333201, 1-29, 2012;
5. Demidov V.E., Kalinikos B.A., Edenhofer E., Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures, *J. Appl. Phys.*, 10007, 2002;
6. Yariv A., Yeh P, *Optical waves in crystals*, N Y: Wiley, 616 с., 1984;

## **Золь-гель переход в водных коллоидных растворах свободных частиц детонационного наноалмаза**

*Швидченко А. В.<sup>1</sup>, Алексенский А. Е.<sup>1</sup>, Дидейкин А. Т.<sup>1</sup>, Эйдельман Е. Д.<sup>1,2</sup>, Кириленко Д. А.<sup>1</sup>, Вуль А. Я.<sup>1</sup>, Жуков А. Н.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ФТИ

<sup>2</sup>СПХФА

<sup>3</sup>СПбГУ

Эл. почта: alexshvidchenko@mail.ru

Наноалмазы, получаемые методом детонационного синтеза из углерода взрывчатых веществ, в последнее время привлекают к себе все больше внимания в качестве коммерчески доступной углеродной наноструктуры, представляющей интерес для разнообразных, в том числе биомедицинских применений. Однако долгое время широкому использованию данного объекта препятствовала проблема, связанная с агрегацией частиц детонационного наноалмаза. Лишь недавно были предложены способы дезагрегации данных частиц, позволяющие получать практически монодисперсные гидрозолы ДНА, содержащие алмазные частицы размером около 4 нм [1-3].

В ходе исследования гидрозолей дезагрегированного ДНА авторами работы были впервые получены гидрогели на основе дезагрегированного ДНА, обладающие ярко выраженной тиксотропностью. В работе показано, что при увеличении концен-

трации до 5 вес. % гидрозоли монодисперсных алмазных наночастиц размером около 4 нм, как с положительным, так и с отрицательным электрокинетическим потенциалом, образуют гель. В работе также приведены экспериментальные доказательства такого перехода. Предложен механизм образования гелей, основанный на модели образования цепочек алмазных наночастиц, связанных электростатическим взаимодействием, а также объяснены причины невозможности получения гидрогелей из агрегатов наноалмазных частиц. Приведены теоретические доводы и экспериментальные данные, подтверждающие этот механизм, а также исследованы электрокинетические свойства частиц ДНА в гелях.

Исследование было поддержано Российским Фондом Фундаментальных Исследований (проект 14-12-00795).

#### Список литературы

1. A. Kruger, F. Kataoka, M. Ozawa, T. Fujino, Y. Suzuki, A.E. Aleksenskii, A.Ya. Vul', E. Osawa, Carbon 43, 1722 (2005);
2. O.A. Williams, J. Hees, C. Dieker, W. Jager, L. Kirste, C.E. Nebel, ACS Nano 4(8), 4824 (2010);
3. A.E. Aleksenskiy, E.D. Eydelman, A.Ya. Vul', Nanotech. Lett. 3(1), 68 (2011);

## **Получение и исследование свойств композиционных материалов на основе хитозана и наночастиц хитина для клеточных технологий**

*Юденко А. Н.<sup>1</sup>, Дресвянина Е. Н.<sup>2</sup>, Смирнова Н. В.<sup>1</sup>, Иванькова Е. М.<sup>2</sup>, Юдин В. Е.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>СПбПУ

<sup>2</sup>ИВС РАН

Эл. почта: ansa2@mail.ru

Актуальной задачей современного материаловедения является разработка материалов для медицины и биологии, в частности, получения полимерных одно-, двух- и трехмерных матриц для клеточных технологий. В последнее время для этой цели все чаще используется хитозан. Материалы на основе хитозана характеризуются биосовместимостью, биорезорбцией, отсутствием цитотоксичности как самих полимеров, так и продуктов их разложения. Недостатком таких матриц является невысокая прочность во влажном состоянии, а также слабая адгезия клеток к данным матрицам. Поэтому было предположено, что введение биосовместимых водостойких наночастиц хитина в хитозановую матрицу, позволит получить композиционные материалы с необходимыми механическими и биохимическими свойствами.

Пленки получали из 4%-х растворов хитозана в 2% уксусной кислоте, содержащих различное количество наночастиц хитина (0, 0,5, 1, 5 мас.%) путем сушки при комнатной температуре. Для перевода пленок в основную форму их осаждали в 10% растворе NaOH в течение 10 мин, после чего многократно промывали. Пленки хранили в дистиллированной воде.

Показано, что введение наночастиц хитина в количестве до 1 мас.% приводит к повышению прочности и модуля упругости композиционных пленок, что обусловлено хорошим взаимодействием наночастиц хитина с хитозановой матрицей.

Отсутствие цитотоксичности волокнистых материалов на основе хитозана и материалов, содержащих нановолокна хитина в количестве 0.5 и 5 мас. %, подтверждено результатами исследований, проводимых методом иммунофлуоресцентного окрашивания белка H2AX- $\gamma$  с использованием дермальных фибробластов ПФЧ-М. Отсутствие генотоксичности композиционных образцов на основе хитозана с наночастицами хитина делают возможными использовать их в качестве матриц для клеточных технологий.

С помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были исследованы поверхностная структура пленок, а также морфология, степень адгезии и распластывания фибробластов человека на поверхности композиционных пленок, содержащих нановолокна хитина. Показано, что введение нановолокна хитина в хитозановую матрицу в количестве 5 мас.% способствует более интенсивной адгезии и типичной морфологии фибробластов человека на пленочных материалах.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-03-00003).*

## **Исследование наномеханических осцилляторов на основе углеродных вискозеров в вакууме и при атмосферном давлении**

*Лукашенко С. Ю.<sup>1,3</sup>, В. В. Лысак<sup>1</sup>, И.С. Мухин<sup>1,2</sup>, И.Д. Сапожников<sup>3</sup>,  
А.О.Голубок<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>ИТМО

<sup>2</sup>СПб АУ НОЦНТ РАН

<sup>3</sup>ИАП РАН

Эл. почта: lukashenko13@mail.ru

### *1. Введение.*

Развитие нанотехнологий стимулировало исследования в области наномеханики. Одним из актуальных направлений наномеханики является создание и исследование различных типов наномеханических осцилляторов (НМО), изготовленных из различных материалов и имеющих разнообразную геометрию. С фундаментальной точки зрения интерес к НМО обусловлен тем, что, благодаря высоким резонансным частотам, такие механические системы, имеющие, вообще говоря, большую массу, тем не менее, при низких температурах могут перейти в квантово-механическое состояние [1]. С прикладной точки зрения НМО – это перспективный сенсор, который, например, может использоваться в нановесах для взвешивания одиночных клеток и других биологических объектов или детектирования отдельных актов биохимических реакций [2].

В данной работе исследовались НМО в виде аморфных одиночных углеродных нановискозеров (УНВ), выращенных на вершинах вольфрамовых игл.

### *2. Экспериментальная установка.*

Аморфные УНВ создавались с помощью технологии фокусированного электронного пучка в камере сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) по методике, описанной в [3]. В зависимости от параметров роста создавались УНВ с диаметром (50-200) нм и длиной (0,5-3)мкм. За счет подбора параметров электрохимического травления создавались W иглы различной формы: конусовидные с большими (10-20 градусами) и малыми (2-7 градусами) углами при вершине и радиусом закругления

вершины конуса  $\sim 100$  нм. Колебания НМО возбуждались с помощью пьезоэлектрического вибратора, к которому прикладывалось напряжение от ВЧ генератора с частотой от 0 до 100 МГц. Резонансные частоты НМО в вакууме определялись путем визуализации максимальных амплитуд колебаний УНВ с помощью СЭМ, а также с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа (КЛСМ) при возбуждении колебаний в воздушной среде.

### 3. Результаты и обсуждение.

В наших экспериментах были визуализированы резонансные колебания УНВ с диаметрами 50, 100, 150 нм и длиной (2-4) мкм в вакууме (при давлении остаточного газа XX торр) и в воздушной среде (при атмосферном давлении) при их локализации на W иглах с малым углом при вершине. В то же время, при локализации УНВ на иглах с большим углом при вершине не всегда удавалось возбудить их резонансные колебания при атмосферном давлении. Мы связываем этот факт с особенностями проникновения ультразвуковой волны в УНВ закрепленный на вершине W иглы. По-видимому, при данном способе возбуждения резонансных колебаний УНВ следует принимать во внимание отражение ультразвука от границы W иглы с внешней средой, обусловленное как формой поверхности иглы, так и свойствами окружающей среды. Значения резонансных частот УНВ в вакууме лежали в диапазоне (3-20) МГц в зависимости от геометрических размеров. Добротность резонансных колебаний в вакууме составляла величину  $\sim 80$ . При возбуждении резонансных колебаний в воздушной среде соответствующие значения резонансных частот УНВ сдвигались на (1.5-2) МГц в область меньших частот и приближались к резонансным частотам колебаний вершин острых W игл. При этом нам не удалось возбудить резонансные колебания в воздушной среде тех УНВ, резонансные частоты которых в вакууме превышали 15 МГц. Добротность резонансных колебаний в воздушной среде несколько превышала добротность колебаний в вакууме и составляла величину  $\sim 100$ . Вообще говоря, можно было ожидать уменьшения добротности колебаний УНВ в воздушной среде из-за потерь, вызванных вязкостью среды. Однако в наших экспериментах наблюдалось даже некоторое увеличение добротности колебаний УНВ при атмосферном давлении. Мы связываем это с изменением режима трения при приближении размеров тела к длине свободного пробега молекул газа [4]. Наблюдаемое в наших экспериментах некоторое увеличение добротности при колебаниях УНВ в воздушной среде, по-видимому, может быть обусловлено перекачкой энергии при колебаниях двух связанных осцилляторов. В нашем случае одним из осцилляторов является W игла, а вторым – УНВ, при этом механическая связь между ними осуществляется за счет распространения ультразвука по воздушной среде. Мы также оценили экспериментально чувствительность нановесов на основе УНВ, которая составила величину  $\sim 10^{-19}$  г/Гц.

#### Список литературы

1. O'Connell A Hofheinz M 2010 *Nature* vol 464 pp. 697-703;
2. Jensen K Kwanpyo K 2008 *Nature Nanotech.* vol 3 pp.533-537;
3. Mukhin I Fadeev I Zhukov M Dubrovskii V Golubok A 2015 *Ultramicroscopy* vol. 148 pp. 151-157;
4. Rustom B Bhiladvala Z Jane Wang 2004 *PHYSICAL REVIEW E* 69 036307;

## Измерение точного модуля упругости InP нанопроводов

Гейдт П. В.<sup>1</sup>, Дунаевский М.<sup>2</sup>, Хаггрен Т.<sup>3</sup>, Какко Й.-П.<sup>3</sup>, Алексеев П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LUT

<sup>2</sup>ФТИ

<sup>3</sup>Aalto

Эл. почта: pavel.geydt@gmail.com

Одномерные наноструктуры являются перспективным объектом исследований в области материаловедения (прочностные характеристики, свойства поверхностного слоя) и находят широкое применение в полупроводниковой технике. В то же время, технологии их управляемого роста и моделирование параметров устройств на их основе всё ещё лежат в поле интенсивных фундаментальных исследований. Трудность с электрическими характеристиками возникает часто в связи с неравномерностью распределения областей поверхностного заряда. В предыдущих работах по применению методов атомно-силовой микроскопии мы уделили внимание изучению свойств барьера Шоттки между золотой шапочкой НП и легированным полупроводником.

В нынешней работе были исследованы прочностные механические свойства единичных НП диаметром 25-100 нм. Трудность с подобным модельным объектом для АСМ заключается в решении нетривиальной задачи создания надёжного физического контакта зонд-наноструктура и изгибанием индивидуальных НП. В отличие от других авторов, решение данной задачи и измерение модуля Юнга InP нанопроводов было успешно осуществлено методами лишь АСМ и оптического микроскопа. Развита нами методика позволяет со значительной точностью моделировать жёсткость, прогибы, деформации и модуль Юнга образцов инструментами метода PeakForce. Новизна заключается в том, что прочие методы: исследование резонансной частоты колебания и координат прогиба, требовали применения Сканирующего Электронного микроскопа.

Измеренные нами значения модуля Юнга растут от 60 ГПа до 400 ГПа для тонких НП, что соответствует теории Холла-Петча и core-shell модели (сердцевина-оболочка) тонких нанотрубок, значительно увеличивая точность, предсказанную теоретически методами DFT.



International conference  
**PhysicA.SPb**

**BOOK OF ABSTRACTS**

**October 26-29, 2015**

Saint Petersburg  
2015

### **Observation and investigation of supernovae IIP: SN2012aw and SN2013ej employing AZT-8 and LX200 telescopes**

*Mokrushina Anna*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

Supernovae stars are important subject for exploration since they not only play a crucial role in evolution of matter in the Universe, but are also possible distance indicators. Supernovae provide the interstellar medium with a great variety of chemical elements synthesized by star during its evolution and explosion. Supernovae belonging to type II with plateau can be indicators for distance measurement in the Universe (together with already known SNe Ia) owing to the presence of a nearly constant luminosity region, i.e. plateau, in their light curve. Photometric and polarimetric observations with telescopes AZT-8 and LX200 were performed for the two SNe IIP: SN2012aw and SN2013ej. As a result of observation treatment, a number of parameters were calculated: the explosion energy, the mass of nickel ejected in the explosion, the mass of the ejected shell, the radius of the star-progenitor, the distance to the supernova, the temperature and a photosphere radius distribution depending on the time, as well as bolometric correction, bolometric luminosity. Polarimetric data have provided the information on explosion asymmetry. The parameters obtained were analyzed and compared with the data published in literature on these SNe and other SNe of the same type.

### **The Earth lithosphere tectonics in spherical harmonics**

*Mokhnatkin Artem*<sup>1</sup>, Petrov S.<sup>2</sup>, Gorshkov V.<sup>1,2</sup>, Shcherbakova N.<sup>2,1</sup>, Trofimov D.<sup>2</sup>, Smirnov S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

According to the classical tectonics theory lithosphere is divided into a bit more than twenty plates that were considered as absolutely rigid. However, modern astronomy observations reveal deviations from the standard theory. First of all, there are already more than two hundreds plates and newer ones are still discovering. Then, it was found out that lithosphere plates could not be regarded as absolutely rigid, as evidently they are subject to be deformed. This work is aimed at expansion of velocities of the global geodetic network stations into vector spherical harmonics series on the assumption of using in geomagnetism agreement, which postulates division of field into radial, spheroidal and toroidal components. Spherical harmonics coefficients till twelfth degree are obtained for spheroidal and

toroidal components and there is submitted a preliminary attempt of its geophysical interpretation. Moreover, spherical harmonics are interpreted from the position of lithospheric plates rotations on a sphere surface and deformations.

## Conditions for the naked singularity formation in generalised Vaidya spacetime

*Vertogradov Vitalii Dmitrievich*<sup>1</sup>, Grib A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Herzen State Pedagogical University of Russia

In this work we study the question of the endstate of gravitational collapse of generalised Vaidya spacetime as to whether the local naked singularity or a black hole is formed. If there is a family of non-spacelike future directed geodesics which originate at the singularity in the past and the apparent horizon hasn't been formed then the local naked singularity is formed. If there isn't such family of geodesics or the time of the apparent horizon formation is less than the time of singularity formation then a black hole is the result of gravitational collapse. In papers (1-2) it has been shown that the result of gravitational collapse as to whether a black hole or the local naked singularity is formed depends on the given initial data. In this work we present conditions for the mass function in accordance with energy conditions for well-known models and for well-known matter. According to these conditions we can get either a black hole or a local naked singularity. Also we have calculated the type of such singularities.

## Analysis of the pulsar wind nebula DA 495 and its central object using XMM-Newton and Chandra observations

*Karpova Anna*<sup>1,2</sup>, Zyuzin D.A.<sup>2</sup>, Danilenko A.A.<sup>2</sup>, Shibanov Yu.A.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

We report the results of a simultaneous analysis of the Chandra and XMM-Newton data on the pulsar wind nebula DA 495 and its central object, J1952.2+2925, which is presumably a pulsar. The J1952.2+2925 pure thermal spectrum can be equally well described either by the blackbody model with a temperature of 215 eV and an emitting area radius of 0.6 km or magnetized neutron star atmosphere models with temperatures of 80-90 eV. We also used the high temporal resolution XMM-Newton/EPIC-pn data to search for pulsations from J1952.2+2925. No pulsations were found so we set an upper limit for the pulsed fraction which is 40%. Using of the interstellar absorption-distance relation allowed us to estimate the distance to DA 495, which lies between 1 and 5 kpc.

## Topological analysis of recurrent structures of helio-related time series

*Kniazeva Irina Serggeevna*<sup>1</sup>, Makarenko N.G.<sup>1</sup>, Urtiev F.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

We suggest that topological approach to periodicity detection could be useful for the helio-related time series and solar activity indexes analysis. These time series produced by many different processes and contains very high level of noise. Standard approaches such as Lomb-Scargle periodogram [1] is not enough justified for such type of data. Topological approach for periodicity detection described in [2]. It begins with the construction of a point cloud from a time series with the help of a sliding window, approximately equal to the expected period. The resulting multi-dimensional cloud of points, after normalization fills the surface of the unit sphere. The existence of periodicity equivalent to the appearance of a circle in a multidimensional space, or in terms of topology existence 1 dimensional cycle. It can be detected in terms of persistent homology [3]. Estimates of persistent homology can be linked with a quantitative characteristic (score) for the cycle with an expected period. We have been tested this technique for several helio-related time series and solar activity

## Diffusion in dense non-isothermal Coulomb plasma

*Beznogov Mikhail Victorovich*<sup>1,2</sup>, Yakovlev D.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>2</sup>Ioffe Institute

This work extends our previous work [1, 2] devoted to diffusion in isothermal multi-component Coulomb plasmas. We have generalized our previously employed method to handle non-isothermal systems. This generalized approach combined with the effective potential method [3] allows one to calculate diffusive fluxes in Coulomb systems with arbitrary coupling strength. Using the obtained expressions for the diffusive flux we study the relationship between internal and surface temperatures of cooling neutron stars with different amounts of hydrogen, helium, carbon and heavier elements in heat blanketing envelopes. We consider envelopes in diffusion equilibrium and out of equilibrium. In the latter case we study relaxation towards diffusive equilibrium. Thus, we improve previous consideration of accreted (containing light elements) heat blanketing envelopes [5]. These improvements are important for accurate modeling of neutron star thermal evolution; they significantly reduce uncertainties in such studies [6, 7].

## **Estimation and analysis of basic parameters of galactic globular clusters obtained by Q – coefficient method**

*Skakun Alexandra<sup>1</sup>, Sharina M.E.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Special Astrophysical Observatory RAS

The globular clusters are the oldest galactic objects. That allows us to develop models of formation and evolution for galaxies. In this study we focus on the method of Q – coefficients (Johnson & Morgan 1953) that uses wide band photometry to obtain colour excess, age, absolute magnitude and mass of galactic globular clusters. This method was tested on the globular cluster system of Milky Way and was applied to M31, M104, NGC5128, NGC 3379. As a result we obtain and analyse the parameters of globular clusters in these galaxies and distributions of these parameters. Masses and ages of globular clusters in NGC 3379 are estimated for the first time.

## **Model of magnetic field amplification in massive star clusters**

*Romansky Vadim Igorevich<sup>1</sup>, Gladilin P.E.<sup>1</sup>, Osipov S.M.<sup>1</sup>, Bykov A.M.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

The problem of the acceleration and propagation of high-energy particles in massive star clusters is widely discussed in the scientific community. Recent observations by space and ground telescopes provide the unique information about cosmic radiation and processes, occurring in massive star clusters. A great progress in understanding the observed phenomena was achieved in last ten years. Interpretation of the recent observations requires complicated theoretical basis, including understanding the nature of strong magnetic fields (100-1000  $\mu$ Gs), which exist inside the sources of X-ray and Gamma-ray radiation. Consistent description of the charged particles acceleration and, consequently, generation of electro-magnetic radiation is impossible without the theory of magnetic field amplification in SNR shock waves. We discuss the model of diffusive shock acceleration of the charged particles with taking into account fluctuating magnetic field amplification due to short-scale Bell instability and acoustic Drury instability, as well as nonlinear effects, related to the influence of non-thermal components on plasma dynamics.

## **Quasisynchronous basis observations of hazardous asteroid 2004 BL86**

*Bashakova Ekaterina Alexandrovna<sup>1</sup>, Lyashenko A.Yu.<sup>1</sup>, Slesarenko V.Yu.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

Asteroid 2004BL86, exceeding 300 meters in diameter, made a close flyby of Earth at the beginning of the 2015 year. A special international campaign, uniting eight observatories around the world from Chile to the Far East of Russia, was devoted to the observations of this asteroid. During this campaign, headed by Pulkovo Observatory of RAS, more than

7500 CCD images of 2004BL86 were obtained for the period from 26 January to 12 February 2015. Moreover, quasisynchronous observations from the five locations at the same time, spaced apart on more than 5500 km, were possible due to favorable asteroid orbit. Results of this international campaign allow to decrease the uncertainties of orbit parameters and increase the accuracy of predictions for future close approaches of 2006BL86.

## **The origin of isolated X-ray pulsar 1E161348-5055, with period 6.7 hr**

*Kim Vitaliy Yur'evich*<sup>1</sup>, Ikhsanov N.R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

A scenario of formation of isolated X-ray pulsar 1E161348-5055, with extra-long period 6.7 hr. is considered. We suggest that the pulsar can be a descendant of High-ma X-ray binary system (HXMB), which decomposed about 2000 years ago, after supernova explosion due to core collapse of the main component. X-ray radiation of this object, in current epoch, generates by means of accretion of matter on the old (about 10 million years) neutron star from residual ML-disc. The nebula RCW 103 containing 1E1613 is a supernova remnant, which was formed by explosion of its main companion on the final stage of evolution of the main binary system.

## **Patterns in planetesimal disks**

*Demidova Tatiana*<sup>1</sup>, Shevchenko I.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

The young stars, both single and multiple, at the initial phases of evolution pass a stage of the accretion of matter from the remnants of the circumstellar envelope, forming a protoplanetary disk. Eventually, the gas-dust disk loses most of the gas component, and the dust particles stick together and grow in size settling down to the disk plane. By the time when most of the gas leaves the disk, kilometer-sized planetesimals emerge; later on, they accumulate into protoplanets. Therefore, a structural inhomogeneity, indicating a presence of main bodies in the disk, can be observed. Using a modified version of the Gadget-2 code, we explore the formation of patterns in planetesimal disks of binary and single stars, either with or without planets. Our numerical experiments show that the emerging patterns essentially depend on the configuration and parameters of the system. In case of a binary star without planets, a single-arm spiral is generated in the circumbinary disk. It can disappear if a planet is brought into the disk. A circumbinary planet of a binary star, as well as a planet of a single star, gives rise to a ring-shaped pattern along its orbit; however, the long-term dynamics of planetesimals in such rings are different for the binary and single stars. Therefore, an observational evidence for definite structural features in a planetesimal disk may indicate the presence of main bodies in the disk, or the binary nature of the star. The type of the inhomogeneity identifies indirectly the parent system configuration.

# Spectropolarimetric Observations of Active Galactic Nuclei with the 6-m BTA Telescope

*Buliga Stanislava Dmitrievna*<sup>1</sup>, Gnedin Yu.N.<sup>1</sup>, Afanasiev V.L.<sup>2</sup>, Borisov N.V.<sup>2</sup>,  
Natsvlshvili T.M.<sup>1</sup>, Piotrovich M.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

<sup>2</sup>Special Astrophysical Observatory RAS

We present the results of our spectropolarimetric observations for a number of active galactic nuclei (AGNs) carried out at the 6-m telescope with the SCORPIO focal reducer. The derived wavelength dependences of the polarization have been analyzed by taking into account the Faraday rotation of the polarization plane on the photon mean free path in a magnetized accretion disk. As a result, based on traditional accretion disk models, we have determined the magnetic field strength and distribution and a number of physical parameters of the accreting plasma in the region where the optical radiation is generated.

## Radiation preure influence on the movement of hazardous asteroids

*Martyusheva Alexandra*<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

Radiation preure is one of non-gravitational forces that could significantly change orbits of hazardous asteroids. By changing albedo of the asteroid's reflecting surface, in the future one can change its orbit. The deviations in orbital motion of hazardous asteroids 308635 (2005 YU55), 367943 Duende (2012 DA14) and 357439 (2004 BL86) under radiation preure influence were calculated. Estimation of radiation preure effect was produced by means of specially developed program based on numerical integration of motion equations [1]. As a result of calculations it was found that in the next 20 years the maximum deviations of asteroids 2005 YU55 (albedo  $p = 0.02$ ), 2012 DA14 ( $p = 0.28$ ) and 2004 BL86 ( $p = 0.32$ ), caused by radiation preure, are respectively: along the heliocentric radius-vector  $|\Delta r| = 16.6$  km, 21.8 km and 32.2 km; along the orbit  $|\Delta l| = 47.2$  km, 270.4 km, 109.4 km; total displacement  $\Delta d = 49.3$  km, 270.6 km, 109.8 km. In case of increasing the asteroids' reflectivity using the bright coating of surfaces (for  $p = 0.80$ ), deviations of asteroids 2005 YU55, 2012 DA14 and 2004 BL86 under radiation preure influence are respectively: along the heliocentric radius-vector  $|\Delta r| = 22.4$  km, 26.5 km and 38.4 km; along the orbit  $|\Delta l| = 63.6$  km, 328.4 km, 130.5 km; total displacement  $\Delta d = 66.4$  km, 328.6 km, 130.9 km. As a comparison, assuming the albedo  $p = 1.0$  (absolutely white body), deviations of asteroids 2005 YU55, 2012 DA14 and 2004 BL86 are respectively: along the heliocentric radius-vector  $|\Delta r| = 23.7$  km, 28 km, 40.6 km; along the orbit  $|\Delta l| = 67.3$  km, 347.7 km, 138.2 km; total displacement  $\Delta d = 70.3$  km, 348 km, 138.6 km. These results allowed one to estimate the poible effect on asteroids by changing their albedo. Until the next encounter of asteroids 308635 (2005 YU55), 367943 Duende (2012 DA14) and 357439 (2004 BL86) with the Earth (using the bright coating of surface) poible total deviation under radiation preure influence will be approximately 199.2 km (2075 year), 509 km (2046 year), 79 km (2027 year), respectively. Thus, changes in the asteroids' orbital motions under the influence of such non-gravitational effect as radiation preure can be significant enough to affect the risk aement of objects' collision during close encounters with the Earth.

## **The Lidov–Kozai effect in planetary systems of multiple stars HD 196885 and 16 Cygni**

*Borukha Maria Alexandrovna*<sup>1,2</sup>, Eskin B.B.<sup>2</sup>, Melnikov A.V.<sup>1</sup>, Sokolov L.L.<sup>2</sup>,  
Shevchenko I.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

By means of numerical experiments within the framework of the spatial elliptic restricted three-body problem we study the long-term dynamics of a planet of the binary star HD 196885 and a planet of the hierarchical triple star 16 Cyg. These objects are chosen because: (1) they belong to multiple star systems, (2) their orbits are eccentric (the eccentricities are equal to 0.48 and 0.67, respectively). Varying the values of the orbital parameters that are non-determined from observations (in particular, the inclination of a planetary orbit with respect to the orbit of a perturber), we have established a possibility of the so-called “flips” (the transitions from the prograde orbital motion to the retrograde one, and vice versa). We analyse these trajectories, as well as a possibility of dynamical chaos in the orbital motion of the planets under study. The both possibilities are conditioned by the Lidov–Kozai effect. In the first case, the planet may subsequently evolve to the “retrograde hot jupiter” stage, whereas in the second case the system may decay.

## **Poibility of the BF Ori rotation slowdown due to the orbital synchronization**

*Shulman Sergei*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

Young variable stars of the UX Ori type have high projected rotation velocities. BF Ori is the only known exception. Its rotation velocity is significantly lower than all other UX Ori stars velocities are. There are might be several different explanations of this slow rotation. Main part of them is suitable for binaries. It was already hypothesized that BF Ori might be a binary star [1]. In this work we examined a possibility that the rotational velocity was reduced due to orbital synchronization which is very important in close binaries. Synchronization mechanisms which were suggested by various authors are studied. We discuss if they are suitable for young early-types stars. It is also analyzed if they are strong enough to explain slow rotation velocity of BF Ori. It is shown that under some conditions synchronization could be used as an explanation of the reducing rotational velocity from typical for UX Ori stars velocities to observed one.



## **Determination of the fractal dimensionality of large-scale structure by the method of pairwise distances**

*Gerasim Ruslan*<sup>1,2</sup>, Raikov A.A.<sup>1</sup>, Orlov V.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

A pairwise distance technique developed by the authors is used to identify signs of fractal structure in sets of extragalactic supernovae. Since the region of space occupied by the objects in the sample is highly oblate, we use Mandelbrot's codimensionality theorem. The method of pairwise distances is also used to study the spatial distribution of 352 sources of gamma-ray bursts with measured redshifts. Three cosmological models are examined: a model with a euclidean metric, a "tired light" model, and the standard LCDM model. The fractal dimensionalities are estimated.

## **Astrometric and photometric investigation of asteroids (3100) Zimmerman, (3504) Kholshchevnikov, (4592) Alkii, (4619) Polyakhova**

*Petrova Svetlana*<sup>1</sup>, Gorshanov D.L.<sup>1</sup>, Devyatkin A.V.<sup>1</sup>, L'vov V.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

Observations of the chosen Main belt asteroids named after astronomers of Pulkovo observatory and St.Petersburg State University (3100) Zimmerman, (3504) Kholshchevnikov, (4592) Alkii, (4619) Polyakhova and others were made. Two telescopes of Pulkovo observatory (ZA-320M and MTM-500M) and two telescopes of astronomical observatories of Irkutsk and Kuban State Universities were used for the observations. The APEX-II and EPOS software systems were used to process the data. Light curves of the asteroids were obtained and color indices were also calculated, that allowed to make hypothesis about the physical parameters of the asteroids. Axial rotation periods of the observed objects were obtained for the first time by means of frequency analysis. Accuracy of the orbital elements of the asteroids was estimated on the basis of obtained observations and MPC data.

## **Work of tidal forces in the vicinity of the rotating black holes for ultrarelativistic particles**

*Rasulova Anna Muradovna*<sup>1,2</sup>, Grib A.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>The Herzen State Pedagogical University of Russia

<sup>2</sup>A. A. Friedmann Laboratory for Theoretical Physics

In a series of papers it was shown that the ultrarelativistic particles colliding in the center of mass frame in the vicinity of the horizon of the rotating black holes can achieve high energy (order of the Grand Unification, or even Planckian order). In this paper we show that the achievement of energy in the vicinity of the horizon of black holes is possible due to the effect of geodesic deviation. This effect is reduced to a deviation between a geodesic family. This deviation of geodesic will lead to the tidal forces by analogy with the classical physics. In the report the work of the tidal forces is considered in the vicinity of the

horizon and the relative deviation of the proton is the distance of the order of the Compton wavelength. We have assumed that the proton moves radially for easy calculations.

## **The magnetic field inertia and rotation dynamics of radio pulsars**

*Goglichidze Oleg Anzorovich*<sup>1</sup>, Barsukov D.P.<sup>1</sup>, Tsygan A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

We discuss the magnetic field inertia which results in so called anomalous electromagnetic torque making a neutron star precess. Particularly we focus on the relative contribution of the fields of different scales and show that the small-scale fields may give comparable contribution in this torque. Also an important role may play internal toroidal field. If the star magnetic field is not symmetric with respect to dipolar moment axis, the pulsar inclination angle may oscillate with typical amplitude of tens of degrees due to precession. Such variations may in principle be observable.

## **X-ray studies of the supernova remnant G350.0-2.0**

*Karpova Anna*<sup>1,2</sup>, Zyuzin D. A.<sup>2</sup>, Danilenko A. A.<sup>2</sup>, Shibanov Yu. A.<sup>2,1</sup>, Shternin P.S.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

Central Compact Objects (CCOs) in supernova remnants (SNRs) are a small class of radio-quiet young neutron stars (NSs) with a pure thermal spectrum seen in X-rays. Only about ten CCOs are known. Studying such objects is of great importance for understanding fundamental properties of matter under extreme conditions inside NSs. SNR G350.0-2.0 is interesting due to the CCO candidate, 1RXS J172653.4–382157, detected in its field. Here we present spectral analysis of the X-ray emission from this source and the remnant using XMM-Newton data.

## **First Intermediate Flare from SGR 1935+2154**

*Kozlova Anna Vladimirovna*<sup>1</sup>, Israel G.L.<sup>2</sup>, Svinkin D.S.<sup>1</sup>, Frederiks D.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Osservatorio Astronomico di Roma, INAF, via Frascati, I-0000 Monteporzio Catone, Italy

The first intermediate flare from newly discovered SGR 1935+2154 was detected and localized by four Interplanetary network (IPN) spacecraft on 2015 April 12. Among them, only Konus-Wind gamma-ray burst spectrometer (KW) was able to measure high-resolution light curves and multi-channel energy spectra of the flare. We report on the results of temporal and spectral analysis of the KW data, the flare energetics, a search for Quasi-Periodic Oscillations (QPOs) in the light curve, and, finally, discuss the source distance estimate based on the distribution of double blackbody spectral fit parameters.

## Cooling of neutron star in HESS J1731-347

*Ofengeim Dmitrii Dmitrievich*<sup>1,2</sup>, Yakovlev D.G.<sup>2</sup>, Kaminker A.D.<sup>3</sup>, Klochkov D.K.<sup>3</sup>, Suleimanov V.F.<sup>4,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>2</sup>Ioffe Institute

<sup>3</sup>Institut für Astronomie und Astrophysik, Universität Tübingen, Germany

<sup>4</sup>Kazan (Volga region) Federal University

The neutron star XMMU J173203.3-34418 (hereafter XMMU J1732) located in the supernova remnant HESS J1731-347 is most unusual. For a possible age of the star, 27 kyr, its measured surface temperature (redshifted for a distant observer) is approximately 1.8 MK (Klochkov et al. 2015). The star is noticeably hotter than an ordinary neutron star of similar age which mainly cools from inside via neutrino reactions of modified Urca process. In fact, XMMU J1732 is the hottest isolated neutron star with measured age and temperature.

As shown by Klochkov et al. (2015), such a hot star can be explained by the standard cooling theory (Yakovlev and Pethick, 2004), but under stringent conditions. First, the outer heat blanketing envelope of the star should be predominantly made of carbon, instead of traditionally assumed iron. This increases thermal conductivity of the envelope and rises the surface temperature of the star. Second, one needs strong superfluidity of protons in the stellar core. It suppresses neutrino process which involve protons, including the modified Urca process, and slows down the cooling. Combination of these two factors raises the surface temperature to the observed level but in a restricted region of stellar masses and radii.

This paper significantly elaborates the analysis of XMMU J1732 cooling by Klochkov et al. (2015). It properly includes neutrino emission due to neutron-neutron collisions in the stellar core; such emission is not affected by proton superfluidity. A method to interpret the observations is suggested which enables one to determine possible values of mass and radius of the star for proton superfluidity of any strength and for any amount of carbon in the heat blanketing envelope. This method is universal - depends on equation of state of neutron star matter only slightly. An analysis of the observations with the updated theory noticeably improves the constraints on mass and radius of XMMU J1732. This, in turn, further constrains possible class of equations of state of superdense matter in neutron star cores.

## Radio-interferometric and near-infrared observations of PSR J1357–6429

*Aida Kirichenko*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

PSR J1357–6429 is a young radio pulsar detected in X-rays and  $\gamma$ -rays. It powers a compact pulsar wind nebula visible in the X-ray domain. Previous studies suggested that the pulsar has a significant proper motion which implies an extremely high transverse velocity of about 2000 km/s. In order to verify that, we performed radio-interferometric and high spatial resolution near-infrared observations of the pulsar. Based on the obtained radio data, we estimated the most accurate pulsar position, RA = 13:57:02.525(14) and Dec = –64:29:29.89(15). Using the new and archival radio data, we did not find any proper motion and estimated its 90 per cent upper limit  $\mu$ .

## **Magnetic wisps in non-equilibrium relativistic plasma of pulsar wind nebulae**

*Petrov Alexey Evgenievich*<sup>1</sup>, Bykov A.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Investigations of physical mechanisms of conversion of magnetic energy into accelerated particles at the termination shock of a pulsar wind (PW) are of great interest for the high energy astrophysics. This requires modeling of highly non-equilibrium processes in relativistic plasma of pulsar wind nebulae (PWNe). The models being confronted to observations allow to determine the PW composition, particle distribution and nonthermal preure. In particular, modeling of the observed dynamical structures, like wisps, in PWNe can be used to derive the wind plasma parameters. Due to the predominately synchrotron nature of the nebular emission, these structures may be related to the magnetic structures propagation. The kinetic consideration of the magnetic field perturbation propagation in plasma of a PWN (Petrov & Bykov 2014) allowed to derive the evolution equation, which describes the local dynamics of the structures. The equation is used here to express the velocity of propagation, the dissipation rate, the dispersion length of magnetic structures through the PWNe plasma characteristics and magnetic fluctuation spectra responsible for particle scatterings. In this work we present a discussion of the characteristics of plasma of a PWN based on the comparison of the observed features of PWNe with the models of magnetic structures produced by relativistic winds.

## **WASP-17b – possible, first exoplanet that move off parent star. Carrying out an international observational campaign**

*Sokov Eugene Nikolaevich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Pulkovo Astronomical Observatory

On August 11, 2009 a team of British project SuperWASP for a search of exoplanets presented the discovery of WASP-17b exoplanet. WASP-17b is the first exoplanet that revolves in a retrograde orbit, i.e. the planet revolves a star in the opposite direction to the rotation of the star itself. This phenomenon suggesting on a previously conducted exoplanet gravitational perturbations by another object. In addition, WASP-17b has an unusually low density, which is from 0.08 to 1.9 g/sm<sup>3</sup>. The discovery made using the "Hubble" telescope in 2013 added greater interest to this exoplanet. As a result of observations of the telescope we can assume that the atmosphere of WASP-17b exoplanet has signs of water vapor. Most recently based on carried out international observation campaign organized at the Pulkovo Observatory, with telescopes located in private and professional observatories of Argentina, Australia and the island of Rarotonga, the removing of the exoplanet from its parent star was discovered. This feature of transiting exoplanets previously didn't meet and at the moment is unique.

## **The investigation of electron detachment proce in collisions of negative hydrogen ions with hydrogen molecules**

*Aleksandrovich Olga Vladimirovna*<sup>1</sup>, Tiukanov A.S.<sup>1</sup>, Belyaev A.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Herzen State Pedagogical University of Russia

The electron detachment proce in collisions of negative hydrogen ions with hydrogen molecules is considered. Two types of non-adiabatic transitions are studied: (i) between discrete states and (ii) between discrete and continuous states. Detachment transition probabilities and cro sections of the proce are calculated by means of the braching claiical trajectory method.

## **Electron screening in measuring nuclear synthesis cro-sections under laboratory conditions**

*Meluzova Daria Sergeevna*<sup>1</sup>, Zinoviev A.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

The paper suggests a technique for determining potentials for the He-W,Ta systems from the Rutherford backscattering measurements. The values obtained are presented. They have been used to calculate the effect of electron screening in measuring nuclear synthesis cro-sections under laboratory conditions.

## **Numerical simulation of the X-ray beam absorption by the modified ABS-plastic**

*Miloichikova Irina Alekseevna*<sup>1</sup>, Stuchebrov S.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The National Research Tomsk Polytechnic University

Currently the creation of the individual anatomically correct phantoms (based on tomographic images) for the radiotherapy planning is relevant task. The 3D print methods (for example, the fused filament fabrication) can be used for this purpose. The mixture of the plastic filament with the heavy element can be used to produce the material with the specified density (according to the human tiues density). In this research the numerical simulation results of the X-ray beam interaction with the ABS-plastic doped with different concentrations of the lead are presented. The profiles and the depth dose distributions of the X-ray beam in the modified ABS-plastic are sown.

## **Study of correlations of mean transverse momenta of particles produced in nucleus-nucleus collisions in framework of blast-wave model**

*Sokolskii Vladimir<sup>1</sup>, Altsybeev I.G.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

Long-range correlations (LRC) between observables measured in separated rapidity intervals provide important information about the initial states of proton-proton and nucleus-nucleus collisions at high energies. The correlation strength is conventionally characterized by the correlation coefficient  $b_{\text{corr}}$ . Different observables can be used in LRC method. In particular, correlations between mean transverse momenta of particles produced in two rapidity intervals may be considered. Such correlations arise, for example, in quark-gluon string models due to string repulsion or fusion [1]. In present report we study an appearance of mean transverse momenta correlations due to radial flow in the framework of blast-wave model [2] with the toy Monte-Carlo program. We show that event-by-event fluctuations in surface velocity of the fireball lead to this kind of correlations. It is found that correlation rises with increasing surface velocity and a magnitude of its fluctuations. It is shown also that  $b_{\text{corr}}$  are higher for heavier particles. We conclude that the impact of radial flow should be taken into account in interpretation of the experimental measurements of mean transverse momenta correlations.

### **Simulation of endovenous laser photocoagulation of varicose veins in-vitro using 2-micron laser radiation**

*Chabushkin Alexei*<sup>1</sup>, Ryabochkina P.A.<sup>1</sup>, Belyev A.A.<sup>1</sup>, Lyapin A.A.<sup>1</sup>, Khruschalina S.A.<sup>1, 1</sup>

<sup>1</sup>N.P. Ogarev Mordovia State University

We presented the results of the simulation of endovenous laser obliteration of varicose veins in-vitro using 2-micron LiYF<sub>4</sub>:Tm laser radiation. It is shown that laser photocoagulation of varicose veins occurs using radiation with  $\lambda = 1.885 \mu\text{m}$ ,  $P = 4 \text{ W}$  and pull-back velocity equal to 1 mm/s.

### **Influence of the isotopic substitution of the H + on the dynamics of phase transformations in the bovine serum albumin**

*Vashchenkov Viktor*<sup>1,2</sup>, Dmitriev A.<sup>1,2</sup>, Fedoseev A.I.<sup>1</sup>, Lushnikov S.G.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

It is known the sequence of phase transformations of the proteins significantly depends on the solvent in which they are dissolved. Isotopic substitution H+ D+ changes the solvent properties and can change the sequence of phase transformations of the proteins. In this paper was studied the features of the phase transitions of the proteins in buffer solutions based on H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O with temperature changing for the model protein bovine serum albumin (BSA) using Brillouin light scattering (BS). The temperature dependences of the shift, the intensity and the half-width at half-maximum of the Brillouin doublets and the intensities of the components of the elastic scattering in the solutions of the BSA were obtained. The analysis of the BS data showed the denaturation of the BSA depending on the solvent may have the intermediate phases, and upon further heating a gel-like state transition occurs.

## **The computer modeling of fragments of cancellous bone tissue for stress-strain state study**

*Lastovkina Ekaterina<sup>1</sup>, Kolmakova T.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>The National Research Tomsk State University

At the present time the problem of replacement and reconstruction of bones is very important. For this goal the identical in bones behavior implants should be created. The purpose of this work is a computer modelling of the microstructure of cancellous bone fragments. As the structural unit of our model a trabecular node containing the trabeculae located perpendicularly relative to each other was considered. The obtained model of structure of cancellous bone fragments are needed for carrying out calculation of stress-strain state, analysis of which will allow to develop recommendation for the creation of a mechanically compatible with bone tissue implants.

## **Study of the secondary structure of BSA and ovalbumin by FTIR spectroscopy**

*Abrosimova Karina Vladimirovna<sup>1</sup>, Shulenina O.V.<sup>1</sup>, Paston S.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

In the work the anhydrous BSA, BSA solution in water, native and denatured ovalbumin were explored by FTIR spectroscopy of single ATR. Amid I band was analyzed using decomposition of component bands in the form of Gaussian curves. Secondary structure of BSA and ovalbumin was determined under different conditions. During the denaturation of protein there were a reduction in the number of  $\alpha$ -helical regions and the growth of the content of  $\beta$ -layers. Furthermore the method of ATR FTIR spectroscopy allows to observe this effect for proteins in egg.

## **Rational design of the trehalose/maltose-binding protein serving as a potential glucose biosensor**

*Pivovarov Viacheslav Aleksandrovich<sup>1</sup>, Fonin A.V.<sup>2</sup>, Rychkov G.N.<sup>3,1</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Institute of Cytology Russian Academy of Science

<sup>3</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute

In recent decades, the number of people with diabetes has been continuously increasing. A continuous or a sufficiently regular monitoring of sugar level in the blood of diabetic patients is needed to prevent the negative effects of hyper- and hypoglycemia. A promising direction for the creation of a non-invasive glucometer is the development of a biosensor system with a protein sensitive element whose interaction with glucose could be reversible. The purpose of this work was to find possible amino acid substitution in the trehalose/maltose binding protein (TMBP), which would lead to a shift of dissociation constant of the protein-glucose complex to physiological values of blood glucose concentration. Ex-



pected stability of mutant forms of TMBP can potentially serve as a sensitive element of a biosensor and facilitates continuous monitoring of glucose in blood of a man.

Here we recommended possible substitutions and tested their effect on glucose binding to TMBP *in silico* by molecular mechanics and flexible molecular docking techniques. The crystallographic structure of the TMBP-trehalose complex (PDB ID 1EU8) was used as an initial model. The structure of the TMBP-glucose complex was obtained by docking, and residues participating in glucose binding were identified. Point substitutions of that residues was constructed and formation of glucose complex with TMBP mutant forms were characterized in terms of the scoring function value, number of intermolecular hydrogen bonds, and anticipated value of the dissociation constant.

Obtained results allowed us to conclude that four point substitutions D70E, D123E, W257Y and R364K destabilizes interactions of glucose with strong binding subsite of TMBP, potentially expanding a dynamic range of measurements up to glucose concentrations usual for patient with hyperglycemia.

## **The interaction of DNA with piperazine derivatives of benzoimidazophthalazine**

*Osinnikova Daria Nikolaevna*<sup>1</sup>, *Moroshkina E.B.*<sup>1</sup>, *Travkina V.I.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

Interaction of DNA with synthetic derivatives of benzo [4,5] imidazo [1,2-a] phthalazine containing piperazine residues in 9th position was investigated by spectral, optical and hydrodynamic methods. These compounds were synthesized in the Institute of Hygiene, Occupational Pathology and Human Ecology FMBA of Ruia [1]. Observed changes in the absorption spectra of these ligands by increasing concentration of DNA in solution indicate that they interact with a macromolecule. Quantitative analysis of these changes allows to determine the stoichiometry of the formed complexes. Upon binding of the compounds with the DNA molecule there is a significant increase of the intrinsic viscosity and optical anisotropy of macromolecule. The calculations have shown that there is an increase thermodynamic rigidity of the macromolecule and its contour length does not change. Thus, we can conclude that the intercalation benzoimidazophthalazine chromophore in the DNA double helix does not occur. It can be assumed that the compounds bind to DNA in the minor groove of the double helix, increasing its thermodynamic rigidity.

## **Conformations of polyelectrolyte macromolecules with different charge density in solutions of different ionic strengths**

*Dommes Olga Aleksandrovna*<sup>1</sup>, *Pavlov G.M.*<sup>1,2</sup>, *Okatova O.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Macromolecular Compounds RAS

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

Studies of charged polymer chains are interesting in both fundamental and applied aspects. Especially, polyelectrolytes attract huge attention of researchers due to their ability

to form interpolymer complexes with synthetic and biopolymers. The study was carried out on the fractions of the hydrophilic copolymers of N-methyl-N-vinyl acetamide and N-methyl-N-vinyl amine hydrochloride of different degrees of polymerization and of different charge density using methods of molecular hydrodynamics. Hydrodynamic and conformational characteristics as well as molar masses of isolated molecules were estimated. In addition, the intrinsic viscosity of the fractions was studied at the extreme ionic strengths – in distilled water ( $\sim 10^{-6}$ M) and in 6M NaCl. Kuhn-Mark-Houwink-Sakurada relations for intrinsic viscosity, sedimentation and translational diffusion coefficients were obtained. Conformational behavior of macromolecules with different linear density of charge was compared.

## Interaction of short peptides KE and KEDW with DNA

*Boldyrev Aleksandr Yurevich*<sup>1</sup>, Morozova E.A.<sup>1,2</sup>, Kuznetsova E.P.<sup>1,2</sup>, Kasyanenko N.A.<sup>3,1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>St. Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

The aim of this research is to study the molecular mechanism of peptide KEDW and KE interaction with DNA in a solution. We have used UV-spectrophotometry to investigate the influence of peptide binding on DNA secondary structure. Comparative analysis of spectral data shows that peptide KEDW interacts with DNA in solution via the formation of contacts with the nitrogenous bases. However, the significant changes in DNA spectral properties were found for KEDW binding and did not found for peptide KE. The influence of peptides on the DNA tertiary structure has been also investigated. The viscosity of DNA solution has been changed after the addition of KEDW and KE. The effect of peptides binding on the rigidity of the DNA molecule (persistence length) was also considered. We used the method of dynamic flow birefringence. The drop in DNA optical anisotropy of about 15-20% was observed for both peptides. Thus, the interaction of peptides with DNA influences on DNA secondary and tertiary structure. Importantly, the type of peptide-DNA interaction depends on the concentration of components.

## The study of DNA-nanoparticles and DNA-nanoclusters systems in a solution and on the surface

*Varshavskiy Mikhail*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

Metallic nanoparticles (NPs) and nanoclusters (NCs) nowadays are the objects of intense study due to the rapid development of new nanotechnologies and nanomaterials. The unique size-dependent properties of nanoparticles make these materials attractive in many areas of high technologies. Silver NPs investigated in this work were synthesized chemically in our lab. The methods used were UV absorbance and circular dichroism spectroscopy, viscometry, atomic force microscopy and scanning electron microscopy. It was shown that silver nanoparticles are stable in aqueous solution. The presence of DNA in solution influences the silver nanoparticles and stabilizes the system. The optimal ratio for silver nitrate

and sodium borohydride in aqueous solution was determined. On this conditions the formed nanoparticles are stable for several months and have an average size of about 12 nanometers. Silver NCs was observed at certain conditions.

## Conformational transitions in an end-grafted chain admixed to a polymer brush made of starlike macromolecules

*Kazakov Alexander*<sup>1</sup>, *Polotsky A.A.*<sup>2,3</sup>, *Birshtein T.M.*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Institute of Macromolecular Compounds RAS

<sup>3</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

An end-grafted single polymer chain inserted into a planar brush made of arm-grafted starlike macromolecules is studied theoretically by using the Scheutjens-Fleer self-consistent field method. Effect of the grafting density (number of grafted stars per unit area), the number of star arms, and the length of the linear chain on the chain conformation is investigated. We show that a chain shorter than the “longest path” in the star (equal to double arm length) acquires a coil conformation close to the grafting surface, at any grafting density. A chain which length exceeds the “longest path” length can undergo a transition from the coil to the “flower” conformation consisting of an extended “stem”, immersed into the brush connected to a coil-like “crown” on the top of the brush. This transition is the first-order-like transition: it occurs sharply, and a coexistence of two states (“coil” and “flower”) is observed in the transition region, this is expressed via bimodal shape of the chain end distribution. The coil-to-flower transition can also be induced by increasing the chain length provided that the grafting density is fixed. In dense brushes this transition is also the first-order-like whereas in loosely grafted brushes it occurs continuously without coexistence of two states. Such a continuous transition is characteristic for a chain inserted into the brush of linear macromolecules. It is shown that the length of the chain at the first-order transition point is a decreasing function of the grafting density, that is, it decreases with increasing thickness of the brush.

Acknowledgments

This work was supported by RFBR (grant 14-03-00372a), RAS (program OKh-3) and the Government of the Russian Federation (grant 074-U01).

## Computer modeling of complexes of DNA and polycations in solution

*Kondinskaia Diana*<sup>1</sup>, *Kostritskii A.*<sup>1</sup>, *Nesterenko A.*<sup>2</sup>, *Antipina A.*<sup>1</sup>, *Gurtovenko A.*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>3</sup>Institute of Macromolecular Compounds RAS

The work is devoted to the investigation of complexation between DNA and polycations using molecular dynamics simulations. These complexes are of interest because of

their possible medical applications. There were four polymers in the study – polyethylenimine (PEI), poly-L-lysine (PLL), polyvinylamine (PVA) and polyallylamine (PAA). Each of them was composed of 20 monomers and had a protonation degree in correspondence with neutral pH. For the DNA model Drew-Dickerson dodecamer was chosen. The simulations were carried out to study an impact of these polymers on the secondary structure of DNA and to shed light on specific interactions between polymers and DNA. All the complexes were formed in less than 10 ns and in all the systems DNA's secondary structure did not undergo any crucial changes. Also, it was proved, that the main interactions are between DNA's phosphate groups and polymers' protonated amine groups, but PVA interacts mostly with the atoms of the major groove. Distances between centers of mass, radial distribution functions and contacts' residence times were measured.

## **Adsorption of cationic polymers on bacterial membranes: Computer simulation**

*Kostritskii Andrei<sup>1</sup>, Kondinskaia D.<sup>1</sup>, Nesterenko A.<sup>2</sup>, Gurtovenko A.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>3</sup>Institute of Macromolecular Compounds RAS

Cationic polymers have been shown to be promising antibacterial substances. The main mechanism of their action is supposed to be based on specific interaction with negatively charged bacterial lipid membrane. So, deeper understanding of processes which underlie this interaction could help us to develop more effective antibiotics. In this study we used molecular dynamics simulations to investigate an adsorption of four types of polycations on a bacterial membrane mimic. We considered following polymers, which differed both in a chemical structure and a protonation state: polyallylamine (PAA), linear polyethylenimine (LPEI), polyvinylamine (PVA) and poly-L-lysine (PLL). The simulations showed their rapid adsorption driven by electrostatic interactions and a slower subsequent equilibration on the bilayer surface. Both a structure and a charge of a polymer proved to impact a stability of a binding and its depth of penetration into the bilayer. Furthermore, it has been shown that PVA and LPEI significantly change 2D distribution of the lipids in the monolayer they adsorb to.

## **Investigation of mechanical tension of isolated animals blood veels and airways**

*Turgunova Natalia Djuraboevna<sup>1</sup>, Aleinik A.N.<sup>1</sup>, Nosarev A.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>The National Research Tomsk Polytechnic University

<sup>2</sup>Siberian State Medical University

For the purpose of testing and the search for new drug compounds, designed to heal many human diseases, it is necessary to investigate the deformation of experimental tissue samples under influence of these drugs. For this task a precision force sensor for measuring the mechanical tension, produced by isolated ring segments of blood vessels and airways was

created. The results indicate that the hydrogen sulfide donor L cysteine in concentrations 100  $\mu$ M-100 mM, has a relaxing effect on the range of concentrations, both in rats and in guinea pigs.

## **Morphological analysis of red blood cells by polychromatic interference microscopy of thin films**

*Dyachenko Anton Andreevich*<sup>1</sup>, *Malinova L.I.*<sup>2</sup>, *Ryabukho V.P.*<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky

<sup>2</sup>Saratov State Medical University

<sup>3</sup>Institute of Precision Mechanics and Control, RAS

Red blood cells distribution width (RDW) has been shown to be associated with increased risk of heart failure (HF) in general population. It predicts mortality and other major adverse events in HF patients. In this report new measurement method of RDW is presented. It's based on interference color analysis of red blood cells in blood smear and further measurement its optical thickne. In this report description of this method is presented. Main results of applying proposed method are shown. Statistical parameters of the optical thickne distribution of red blood cells in a blood smear are counted. They were used for estimation of parameter as RDW. This estimation parameter of RDW was counted for each sample under investigation.

## **The study of the influence of the nucleotide composition of DNA on the dynamics of phase transformation**

*Dmitriev Artem*<sup>1,2</sup>, *Vashchenkov V.E.*<sup>1,2</sup>, *Zakharov G.A.*<sup>3</sup>, *Fedoseev A.I.*<sup>1</sup>, *Savvateeva-Popova E.V.*<sup>3</sup>, *Lushnikov S.G.*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

<sup>3</sup>Pavlov Institute of Physiology RAS

Results of Brillouin light scattering studies of deoxyribonucleic acid (DNA) in the temperature interval 298–363 K are presented. DNA fragments from the 1st intron of *Drosophila melanogaster limk1* gene from wild type *Berlin* and mutant – *agnostic (agn<sup>ts3</sup>)* were used as experimental samples. In contrast to the wild-type, *agn<sup>ts3</sup>* was carried the AT-rich insertion of 28 bp. High resolution melting analysis was used for determining of the degree of connectedne of DNA. Combined analysis of experimental data reveals a close relation between structure and low-frequency conformational DNA dynamics with variation temperature. The results are discued in the framework of modern models of conformational DNA transformations.

## Extended kinetic model of real-time polymerase chain reaction

*Fedorov Aleksey Aleksandrovich*<sup>1</sup>, Sochivko D.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Institute for Analytical Instrumentation

<sup>2</sup>Sintol, LLC

Polymerase chain reaction with detection of products in real time (real-time PCR) is the molecular-genetic technique most frequently used for qualitative and quantitative analysis of specific nucleic acid (NA) sequences in many areas of biomedical research, such as laboratory diagnostics of infections, medical genetics, forensics and biosecurity. A distinguishing feature of real-time PCR is very high sensitivity and specificity compared to other analytical methods. Despite the fact that the overall physico-chemical basis of the method is well known, detailed models of real-time PCR able to quantitatively characterize the process are attracting the attention of researchers and still being developed [1]. This is due to the fact that real-time PCR is a multi-step reaction, involving about ten basic molecules, so the analysis of the reaction kinetics is a non-trivial task.

At present, the main theoretical framework for detailed description of real-time PCR is the analysis of chemical kinetics. We have developed an extended kinetic model of real-time PCR based on a system of equations including enzyme kinetics. For the first time, the model includes temperature dependence of the reaction parameters. The system takes into account enzyme participating in the reaction, complementary strands hybridization, fluorescent probe for registration of reaction product, and the temperature dependence of primers and probe hybridization. The resulting system of kinetic equations was solved and analyzed by numerical simulation using C++. The system parameters were selected on the basis of literature and own experimental data. Unlike majority of existing real-time PCR models, the registration of reaction curve was carried out indirectly by the number of fluorescent probe molecules consumed instead of synthesized product molecules. This allowed us to obtain more realistic real-time PCR kinetic curves and more adequate description of the final stage when reaction comes to saturation, which was confirmed by comparing the theoretical and experimental data.

## Biliverdin as near-infrared fluorescent proteins chromophore

*Bublikov Grigorii Sergeevich*<sup>1</sup>, Stepanenko Olesya V.<sup>1</sup>, Shcherbakova D.M.<sup>2</sup>, Kuznetsova I.M.<sup>1</sup>, Verkhusha V.V.<sup>2</sup>, Turoverov K.K.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Cytology Russian Academy of Science

<sup>2</sup>Albert Einstein College of Medicine

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Biliverdin (BV) is a natural chromophore of new near-infrared fluorescent probes developed from bacterial phytochrome photoreceptors (BphPs). Being a heme derivative, BV is abundant in mammalian cells. BV incorporated in BphPs absorbs and fluoresces in a near-infrared "window of transparency" (650-900 nm) of biological tissues, where hemoglobin of erythrocytes and melanin do not absorb any longer and water does not absorb yet. This gives an opportunity for non-invasive imaging of deep tissues and whole organs in living animals [1, 2, 3]. One of the current problems is the construction of the improved near-infrared fluorescent probes, namely probes with higher fluorescent quantum yield and dif-

ferent fluorescent maxima for simultaneous visualization of several target objects in one experiment. This task can be facilitated if we understand the spectral properties of BV and factors that can change them. To this end we performed a comparative analysis of the spectral properties of phytochromes with known X-ray structure and BV environments in these proteins and performed experimental examination of spectral characteristics of BphPs with different ways of BV binding. In this work we studied holo- and apo-forms of infrared fluorescent protein iRFP713, from *R. palustris* bacterial phytochrome RpBphp2. This protein has one conserved cysteine residue (Cys 15), was covalently binds BV imbedded in the pocket of GAF domain. For this protein the role of an unusual figure-of-eight knot structure, which bridges the PAS and GAF domains [4], in protein stability is discued [5]. We also examine mutant forms of iRFP670 (from bacterial phytochrome RpBphp6) and iRFP682 (from bacterial phytochrome RpBphp2) which have shorter absorption and fluorescence spectra. These proteins above conserved Cys 15 in PAS domain have the second cysteine residue which also can chemically bind BV embedded in GAF domain pocket, namely Cys 256 in GAF domain [6]. We examined spectral haracteristics of mutant forms of these proteins containing cysteine residues only in PAS domain (Cys 15), only in the GAF domain (Cys 256), in PAS and GAF domains simultaneously, and having none of these cysteine residues. This work was supported by the MCB Program of RAS, RFBP grant (13-04-01842).

## **Interaction of small interfering RNA and DNA with cationic agents**

*Unksov Ivan Nikitich*<sup>1</sup>, Slita A.V.<sup>2</sup>, Petrova A.V.<sup>2,3</sup>, Pereviazko I.I.<sup>1</sup>, Bakulev V.M.<sup>1</sup>, Rolich V.I.<sup>1</sup>, Bondarenko A.B.<sup>1</sup>, Kasyanenko N.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Research Institute of Influenza WHO National Influenza Centre of Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Formation of self-aembled structures in CT-DNA/siRNA+cationic surfactant solutions was studied. Methods of atomic force microscopy (AFM), fluorescence and UV-Vis spectroscopy, DLS, viscometry and flow birefringence were utilized. Changes in DNA conformational parameters were fixed upon the interaction with different cationic agents. The concentrations of components and ionic strength influence on the formation of compact structures for siRNA. Size of the structures was obtained by AFM and sedimentation. The fluorescence of DAPI in DNA-surfactant and siRNA-surfactant solutions was investigated. The difference between DNA and siRNA binding with surfactant is regarded. The comparative study of the binding activity of the surfactant and other cationic agents was made.

## **Investigation of conditions for reproducible generation and sorting droplets "water in oil" in the microfluidic chip for screening cell libraries**

*Filatov Nikita Alekseevich*<sup>1</sup>, Bukatin A.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

Droplet microfluidics is a promising technology for screening libraries of individual cells. In this work we investigated the droplet generation, single cell encapsulation and their sorting under different conditions: water and oil preures, surfactant concentration.

## **Microelectrode array development for registration of electrophysiological activity in neuronal culture in vitro**

*Malishev Eugene Ivanovich*<sup>1</sup>, Frizyuk K.S.<sup>1</sup>, Pimashkin A.S.<sup>2</sup>, Gladkov A.A.<sup>2,3</sup>, Bukatin A.S.<sup>1</sup>, Vdovichev S.N.<sup>4</sup>, Kazantsev V.B.<sup>2</sup>, Mukhina I.V.<sup>2,3</sup>, Dubina M.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>2</sup>Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod NRU

<sup>3</sup>Nizhny Novgorod State Medical Academy

<sup>4</sup>The Institute for Physics of Microstructures of the Russian

Using microelectrode arrays today is one of the most perspective methods in electrophysiological studies of fundamental brain research. In this study we've fabricated microelectrodes with different materials and sizes in order to find optimal design for electrophysiological signal registration in cultured neuronal networks. We found minimal acceptable diameters for each investigated material in order to achieve maximal electrode density and optimal signal to noise ratio. Also, it is perspective to combine porous material (e.g., Platinum black or TiN) with low-impedance materials (e.g. PEDOT) to minimize electrode diameter.

## **Investigation of the characteristics of eletret microphones for the development of intracranial preure sensor design**

*Sumovsky Alexander Sergeevich*<sup>1</sup>, Andreeva A.V.<sup>1</sup>, Lyutetsky N.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

Within scientific work poible options of a design of micromechanical sensor for control of intra cranial preure were developed. Theoretical calculation of the key design data of the sensor was made. In addition, main characteristics of sensor, such as sensitivity, range of measured values of preure and level of equivalent input noise were investigated. Proceeding from the obtained data, the optimum version of a design of the sensor, conforming to all set requirements was chosen.



## **Experimental and theoretical study of conformational changes induced by the action of THz radiation in the proline-containing fragments of globular proteins**

*Nemova Eugenia<sup>1</sup>, Kobzeva T.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the RAS

<sup>2</sup>Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the RAS

Registration of conformational changes was to study the adsorption of molecular oxygen and nitrogen oxide to functional groups on the albumin molecule. It was shown that conformational change under the influence of terahertz radiation leads to a change of availability of the respective centers. Thus, it was found that 60 minutes irradiation albumin pulsed THz source in the range 0.1-2.5 THz leads to disruption of the tertiary structure, and showing the locations most susceptible to change. This was a regular structure of the protein with a proline-containing amino acid residue.

## **A model to simulate the initial stages of protein crystallization in the capillaries by counter diffusion method**

*Sokolovskiy Andrey Sergeevich<sup>1</sup>, Eliseev I.E.<sup>2</sup>, Yudenko A.N.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

A numerical model is presented to simulate the growth and nucleation of protein lysozyme crystals by counter diffusion method. The comparison of our experimental and simulation results shows that the numerical solution accurately describes the initial stages of crystallization. The developed model can be used to describe crystallization process with various counter diffusion experiment parameters.

# MATHEMATICAL PHYSICS AND NUMERICAL METHODS

---

## Numerical modelling of hydriding of zirconium alloy

*Rodchenkova Natalia Ivanovna<sup>1</sup>, Zaika Yu.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the RAS

Zirconium alloys are the construction materials for critical elements in active zones of nuclear power reactors. During the operation of reactors such materials are subject to hydrogenation. Hydrogenation results in a decrease of alloy plasticity and cracking resistance. The formation of brittle hydrides at crack tips can result in severe embrittlement. One of the most important requirements for the reactor's active zone materials is low hydrogen absorptivity. The mathematical model of hydride formation and hydride layer growth is developed. The task is to estimate the model parameters for Zr–1Nb alloy and to determine the dynamics of profiles of hydrogen concentration in hydride and in solution. Iterative computational algorithm for solving the nonlinear boundary-value problem with the moving phase bound (Stefan condition) based on implicit difference schemes is developed. The results of computational experiments are presented in a report.

## Noise-induced phase transition in an autocatalytic chemical system

*Pham Minh Tuan<sup>1</sup>, Virchenko Yu.P.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Belgorod National Research University

We present a framework for the analysis of a chemical kinetics model proposed by Horsthemke et al. [1]. This model, when subjected to multiplicative white noise, can undergo a phase transition to a bimodal state, while no such transition exists in the absence of the noise term. This noise-induced transition is studied analytically by investigating the so-called critical surface in the phase space of bifurcation parameters. In addition, to illustrate our result, the phase diagrams in some interesting cases are also presented.

## **Dynamics of heating Solid State by the influence of the electron beam**

*Mashkov Konstantin<sup>1</sup>, Zamoryanskaya M.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Toffe Institute

The heating of the solid body by irradiating the electron beam is an important effect, since the low thermal conductivity of the body (low values of thermal conductivity) of hundreds of degrees. This should be taken into account in the study of cathodoluminescent properties of solids, as the temperature of the sample affects the luminescence intensity leads to a spectral shift of the luminescence bands, and decay times change, and the buildup of radiative bands. In this paper we demonstrated the calculation of heating of the sample by irradiating an electron beam to heat a certain area, and receive time dependences of temperature change in this area and determine the time of maximum heating temperature.

## **Many Body Effects in Optical Absorption Spectra of Lithium Azide (LiN<sub>3</sub>)**

*Filippov Semyon Igorevich<sup>1</sup>, Gordienko A.B.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kemerovo State University

The characteristics of the optical absorption of lithium azide have been calculated accounting for the electron-hole interaction via the Bethe-Salpeter Equation (BSE) by means of the kernel polynomial method (KPM), which reduces significantly the total computational cost. The analysis of two-particle states on the absorption edge provides the new look on the initial stages of chemical decomposition initiated by an external influence.

## **Wannier Functions for ternary chalcopyrite semiconductors**

*Filippov Daniil Igorevich<sup>1</sup>, Gordienko A.B.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kemerovo State University

This work is concerned with the Wannier functions basis and one of its applications — efficient band structure interpolation. The results of the calculations of maximally localized Wannier functions of the ternary chalcopyrite semiconductors are first presented. The ground state calculations have been performed within the local-density (PZ81) and the meta-GGA (TB-mBJ) approximations for exchange and correlation, using the pseudo-atomic-orbital (PAO) basis. It is shown, that the GGA-calculations lead to the more localized Wannier functions, compared to that of LDA one. It is also shown, that a coarse  $4 \times 4 \times 4$  k-grid is quite suffice for the fine interpolation of the valence band for all considered crystals, and finite PAO-basis allows to interpolate the complete band structure as well.

## **Numerical simulation of the TDS-spectrum in a nonlinear boundary-value problem of hydrogen thermal desorption**

*Kostikova Ekaterina Konstantinovna<sup>1</sup>, Zaika Yu.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the RAS

One of the technological challenges for hydrogen materials science (including ITER project) is the currently active search for structural materials with various potential applications that will have predetermined limits of hydrogen permeability. One of the experimental methods is thermodesorption spectrometry (TDS). A hydrogen-saturated sample is degaeded under vacuum and monotone heating. The desorption flux is measured by mass spectrometer to determine the character of interactions of hydrogen isotopes with the solid. We are interested in such transfer parameters as the coefficients of diffusion, dilution, desorption. The report presents a distributed boundary-value problem of thermal desorption and a numerical method for TDS-spectrum simulation, where only integration of a non-linear system of low order ordinary differential equations is required.

## **Band structures of one-dimensional photonic crystal containing negative index materials**

*Pravdin Konstantin Vladimirovich<sup>1</sup>, Popov I.Yu.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

We consider the one-dimensional photonic crystal composed of an infinite number of parallel alternating layers filled with metamaterials. We study band structures of the Maxwell's operator and ascertain how it changes with varying of the system parameters.

## **A generalized mathematical model of piston acceleration by combustion products in axisymmetric channel**

*Bykov Nikita V.<sup>1,3</sup>, Nesterenko E.A.<sup>2,3</sup>, Vlasova N.S.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>IPI RAN

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University

Problem of mathematical modeling of motion of continua in different channels are described. Channels can have varying cross-sectional area. As an energy source for such setups are typically used high-energy materials; most often in the role of energetic material plays simple powder, le often - explosive. Each of the designs booster units can be used one or the other set of environments, covering the entire volume of the channel. A several mathematical models describing the media are considered.

## **Numerical modeling of an electrical wire explosion**

*Ryakhovskiy Alexey*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Different approaches to the modeling of an electrical wire explosion are studied. Different stages of the process are studied and modeled separately such as melting, evaporating, ionization and nucleation. Magnetohydrodynamical system of equations, describing the behaviour of metal-vapor plasma is being solved using central difference schemes. Different equations of state and transport coefficient models are studied and compared. The general approach to modeling the process is derived, that is based on a fusion between MHD, Lagrange particle tracking and VOF method. The corresponding solvers are developed in OpenFOAM. The obtained results are consistent with experimental data.

## Proximity effect in ferromagnet-semiconductor hybrid structure

*Kalitukha Inna*<sup>1,2</sup>, Korenev V. L.<sup>2</sup>, Akimov I.A.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Toffe Institute

<sup>3</sup>TU Dortmund

One of directions of spintronics is to integrate magnetism in semiconductor architecture of modern computers. This can be accomplished by creating devices on ferromagnet-semiconductor hybrid structures. In such structures strong exchange interaction between spin systems of ferromagnet and semiconductor so-called proximity effect takes place. Here we demonstrate proximity effect and its properties in Co/CdTe quantum well hybrid structure.

## Magnetic linear dichroism in electron photoemission from ultrathin films of transition metal silicides

*Grebenyuk Georgy Sergeevich*<sup>1</sup>, Gomoyunova M.V.<sup>1</sup>, Pronin I.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

The phase composition and magnetic properties of ultrathin cobalt, manganese and iron silicides films grown on silicon have been studied in situ. Experiments were carried out in ultra high vacuum, the films were formed by solid-phase epitaxy and characterized by high-resolution photoelectron spectroscopy with synchrotron radiation and magnetic linear dichroism in core level photoemission. It is shown that the formation of metal-silicon interface proceeds in a similar manner at room temperature for the investigated systems. At the first stage the layers of interfacial silicide and metal-silicon solid solution are formed. Ferromagnetic ordering of the interface has a threshold nature and is observed after the deposition of 0.6 nm of Co, 0.7 nm of Fe and 0.5-2 nm of Mn. Solid-phase reactions in the Co/Si, Fe/Si and Mn/Si systems start at 250°C, 100°C and 150°C respectively and lead to the formation of several different silicides including ferromagnetic Co<sub>3</sub>Si and Fe<sub>3</sub>Si.

## **Improving quantum efficiency of multijunction solar cells based on lattice-matched nanoheterostructures grown by MOCVD, due to photoeffect in InAs quantum dot array**

*Salii Roman Aleksandrovich*<sup>1</sup>, Mintairov S.A.<sup>1</sup>, Nadtochiy A.M.<sup>1</sup>, Pauysov A.S.<sup>1</sup>, Brunkov P.N.<sup>1</sup>, Nevedomsky V.N.<sup>1</sup>, Kalyuzhnyy N.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

In this work the topical problem of development of quantum dot (QD) array growth technology by MOCVD has been investigated. The technology is oriented to pseudomorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells. All epitaxial structures were obtained by MOCVD technique in Ioffe Physical-Technical Institute. The growth peculiarities in InAs-GaAs lattice-mismatched system were studied. The photoluminescence (PL) dependences of key growth parameters (growth conditions of InAs QDs as well as growth conditions of GaAs “underlayer” and “cap” layer) were obtained. The multimodal distribution of QDs by sizes was found using AFM, TEM and PL methods. GaAs solar cell nanoheterostructures with arrays of QDs were designed and obtained. Ones have been demonstrated a significant increase of photogenerated current due to photoeffect in array of InAs QDs (0.592 mA/cm<sup>2</sup> for AM1.5D and 0.815 mA/cm<sup>2</sup> for AM0).

## **Spectroscopic properties of superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> nanoparticle colloidal solutions**

*Smerdov Rostislav*<sup>1</sup>, Bocharova T.V.<sup>1</sup>, Gareev K.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The investigation of optical and electron spin resonance (ESR) spectroscopic properties are carried out. Six characteristic absorption bands related to distinctive conglomerates of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> formed via sol-gel synthesis process on SiO<sub>2</sub> porous matrix are observed in optical spectra. ESR spectra investigation makes it possible to reveal small characteristic signal on the left side of ESR band whose nature has yet to be discovered.

## **Synthesis of composite structures on the basis of GaBO<sub>3</sub> and FeBO<sub>3</sub> trigonal crystals**

*Mustafaeva Sofie Mustafaevna*<sup>1</sup>, Matvienko M.P.<sup>1</sup>, Mogilenec U.A.<sup>1</sup>, Maksimova E.M.<sup>1</sup>, Nauhatsky I.A.<sup>1</sup>, Strugatsky M.B.<sup>1</sup>, Yagupov S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University

Thin film of iron borate is of a great interest for various scientific studies. The method of a liquid-phase epitaxy was selected for obtaining a thin magnetic film of FeBO<sub>3</sub> on a substrate of GaBO<sub>3</sub> single crystal. Technological parameters of crystallization were determined experimentally. As a result, we have synthesized a thin magnetic layer of FeBO<sub>3</sub> on the diamagnetic single crystal of gallium borate.

## Energy spectrum of InSb/AlAs quantum dots

Rumynin Kirill Mikhailovich<sup>1</sup>, Abramkin D.S.<sup>2</sup>, Bakarov A.K.<sup>2</sup>, Gutakovskiy A.K.<sup>2</sup>, Shamirzaev T.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University

<sup>2</sup>The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the RAS

The results of energy spectrum of InSb/AlAs QDs investigations are discussed in this report. Heterostructure with QDs were grown by molecular beam epitaxy. A study of the heterostructures with QDs performed by transmission electron microscopy shows that QDs consist of quaternary alloy  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ . Calculations of the QDs energy structure were carried out depending on the alloy composition  $x$  and  $y$ . Experimental study of the energy structure of QDs was performed by spectroscopy of time-resolved and cw photoluminescence (PL). It was shown that QDs have band alignment of type-I or type-II depending on alloy composition when QDs of type-I have indirect band gap with ground electronic state belonging to  $X_{xy}$  valley. Alloy composition of the obtained QDs of type-I ( $x = 0.2 \div 0.5$ ,  $y = 0 \div 0.2$ ) was estimated due to comparison of calculated energy of QDs optical transition with PL data.

## Structural and morphological features of ultrathin epitaxial InSb films in AlAs matrix

Kolotovkina Darya Alexandrovna<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University

This work presents results of the investigation of structural and morphological features of epitaxial InSb layers in the AlAs matrix. Our research group used transmission electron microscopy (TEM). The specimens were grown by molecular beam epitaxy and prepared in cross section (110) and plan view foils (100). We found a formation of the embedded epitaxial layer of solid solution  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$  in the AlAs matrix during precipitation of In and Sb on the AlAs surface. The embedded layer had continuous area (wetting layer) and islands. The study revealed two types of islands in the epitaxial layer the first having coherent interfacing with the lattice, and the second a relaxed island. We estimated concentration of In, Sb in the solid solution by indirect means. We used the method of geometric phase to analyze the distribution of misfit dislocation cores on the interface. Every misfit dislocation was formed by two close  $60^\circ$ -dislocations with Burgers vectors like. The sum Burgers vector of the dislocation pair was situated in the plane of the interface.



## **Ion synthesis of InSb nanocrystals in the buried SiO<sub>2</sub> films implanted with ions In<sup>+</sup> and Sb<sup>+</sup>**

*Dzubina Lubov Leonidovna*<sup>1,2</sup>, Cherkov A.G.<sup>1</sup>, Volodin V.A.<sup>1,2</sup>, Tyshenko I.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University

<sup>2</sup>The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the RAS

The ion-beam synthesis of nanocrystals InSb in the buried SiO<sub>2</sub> layer is studied. The formation of new phase after annealing at temperature from 500 to 1100°C is investigated with high-resolution electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and Raman scattering. Formation of InSb nanocrystals is beginning after annealing at 900°C and higher, when Sb diffusion length is beginning to be comparable with the average distance between atoms. Stoichiometric analysis shows that crystalline structured and maximal sized (~ 26 nm) nanocrystals are located nearby maximum of ions distribution (Rp). Smaller sized and indium exceed nanoclusters are located before and after Rp. This is in a good agreement with known diffusion features of atoms In and Sb in SiO<sub>2</sub> matrix. Peaks on Raman spectra are observed nearby scattering on optical phonon in crystalline InSb. This peaks shifted from crystalline InSb peaks by ~ 6 cm<sup>-1</sup>. This shift is interpreted as compression in synthesis nanocrystals. There is an assumption about formation of InSb via liquid phase.

## **Multilayer neutron monochromator-polarizer on the basis of iron**

*Kyaw Zaw Lin*<sup>1</sup>, Syromyatnikov V.G.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute

**Abstract** In this paper the multilayered neutron monochromator polarizer consisting of 490 alternating layers of iron and niobium is offered. Each layer of Fe and Nb has thickness 25 Å. Use of thin layers in the period of structure will allow to receive the reflected Bragg's peaks with high resolution on wavelength. Existence of identical thickness of layers in the period allows to avoid the Bragg's peaks of even orders. Parameters of the first Bragg peak for eight model neutron monochromators-polarizers on the basis of iron and cobalt are given in work. Calculated curves show that the first Bragg peak reflected from structure of Fe/Nb has relative half-width of 1.1%, the maximum coefficient of reflection 0.997 and the polarizing efficiency 0.999. Also the first experimental curves of coefficient of reflection of neutrons from structure of Fe/Nb depending on the momentum transfer are given.

## **Chemical composition and early stages of graphitization of de-aggregated particles of detonation nanodiamond**

*Shestakov Mikhail Sergeevich*<sup>1</sup>, Alexenskiy A.E.<sup>1</sup>, Baidakova M.V.<sup>1</sup>, Dideikin A.T.<sup>1</sup>, Shvidchenko A.V.<sup>1</sup>, Shnitov V.V.<sup>1</sup>, Kidalov S.V.<sup>1</sup>, Vul' A.Ya.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Recently it was shown that effective deaggregation of detonation nanodiamonds (DND) could be performed after low temperature annealing in air [1] or in atmosphere of molecular hydrogen [2]. The hydrosols are promising substances for medical and biotechnological systems due to small size, non-toxicity and ability of de-aggregated DND particles attach and carry various molecules and functional groups [3]. We have applied XPS, NEXAFS and FTIR techniques to perform the comprehensive study of structure and chemical composition of nanodiamonds de-aggregated after hydrogen or oxygen annealing. Moreover, both nanodiamonds were annealed at high vacuum at increasing temperatures. Despite of chemical composition differences both types of DND particles demonstrate traces of sp<sup>2</sup>-phase forming at substantially low temperatures (over 420°C). This temperature of vacuum annealing is much lower than that was reported in [4]. This low-temperature sp<sup>2</sup>-phase forming could be the possible reason underlying both existing processes of thermal de-aggregation (at hydrogen and oxygen atmospheres) of DND. Subsequently, vacuum annealing at different conditions were performed with both nanodiamonds and initially purified DND. The impact of the process on DND surface properties was studied with FTIR and DLS techniques. We believe the data on chemical composition of de-aggregated nanodiamonds will help opening a new way for application of this unique material. The study was partly supported by the Russian Scientific Foundation (project 14-12-00795).

## **The role of diipation in spectral properties of plasmon resonances in metal-dielectric nanocomposites**

*Olekhno Nikita Andreevich*<sup>1,2</sup>, Beltukov Y.M.<sup>1</sup>, Parshin D.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

In the present work we have reduced Maxwell equations for disordered binary nanocomposites to generalized eigenvalue problem, which allows to study plasmon resonances using arbitrary models for dielectric functions of both components of the composite. Expressions which connect resonant spectrum of diipationless systems and composites with various diipation models have been derived analytically. This representation also allows to establish mapping between several kinds of lattice models of binary nanocomposites.

## The detonation nanodiamond-based size standard for dynamic light scattering

*Koniakhin Sergei*<sup>1,2</sup>, Shvidchenko A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

Dynamic light scattering (DLS) is a powerful nondestructive method that is employed in physics, chemistry, biology, and nanotechnology to determine the size of objects suspended in a solvent. This method requires the standards, namely the water suspensions of monodisperse particles with diameter predetermined by other method or multiple methods. However, the standard with particles size lower than 10 nm has not been created yet. Here we propose an original protocol for producing unique standard for dynamic light scattering based on ultracentrifugation of stable chemically disaggregated detonation nanodiamond suspensions.

## Investigation of light-induced degradation of tandem photoconverters on a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H

*Titov Aleksei Sergeevich*<sup>1,2</sup>, Abramov A.S.<sup>1,2</sup>, Andronikov D.A.<sup>1,2</sup>, Emtsev K.V.<sup>1,2</sup>, Semenov A.F.<sup>1,2</sup>, Terukova E.E.<sup>1,2</sup>, Yakovlev S.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Research and development center for thin-film technologies in energetics under Ioffe Institute

Photo-induced degradation of tandem  $\alpha$ -Si:H/ $\mu$ c-Si:H photoconverters under standard light flux densities of 1000 W/m<sup>2</sup> (AM1.5G) has been investigated. Spectral and current-voltage characteristics of solar modules produced with standard and modified recipes are presented and analyzed. Optimization of crystallization level in intrinsic layer of lower (microcrystalline) cascade has been performed in this research.

## Structural transformations in liquid Ga-In eutectic alloy under nanoconfinement

*Nefedov Denis Yurievich*<sup>1</sup>, Charnaya E.V.<sup>1</sup>, Haase J.<sup>2</sup>, Michel D.<sup>2</sup>, Kumzerov Y.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Universität Regensburg

<sup>3</sup>Ioffe Institute

Studies of liquids under nanoconfinement are of significant interest. The aim of the present work consists in studies of melted Ga-In eutectic alloy embedded into an opal matrix. Experimental data were obtained for both gallium isotopes <sup>71</sup>Ga and <sup>69</sup>Ga within the temperature range from 77 to 293 K at magnetic fields of 9.4, 11.7, and 17.6 T using Bruker Avance 400, 500, and 750 MHz pulse spectrometers. Crystallization of eutectic alloy occurs gradually. At the temperature range of partial crystallization several anomalous effects were observed. In particular, in the temperature range 155 to 143 K two components

of the NMR line appear, both relate to liquid alloy. The low-frequency component disappears upon further cooling, which might correspond to the freezing of the alloy in this state, and the high-frequency component gets more intensive. Presence of two components of NMR line evidences the inhomogeneity of electron system of the Ga-In eutectic alloy, which agrees with the suggestion about structural transformations.

## **Study of ZnO layers obtained by spray-pyrolysis**

*Semenova Anastasia Aleksandrovna*<sup>1</sup>, Lashkova N.A.<sup>1</sup>, Matyushkin L.B.<sup>1</sup>, Somov P.A.<sup>2</sup>, Maximov A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Svetlana-Rost, LLC

In this work thin films were obtained by the method of spray-pyrolysis at a different time of synthesis. The thickness of the obtained layers was measured (~ 100 nm). Their properties were investigated by optical microscopy, SEM, AFM. The average grain size was about 20-160 nm.

## **High-temperature sensors based on 4H-SiC Schottky diode structures**

*Demenskiy Aleksey Nikolayevich*<sup>1</sup>, Yerochin S. Yu.<sup>1</sup>, Krasnov V. A.<sup>1</sup>, Shutov S. V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Semiconductor Physics NAS

Test samples of the diode temperature sensors based on 4H-SiC Schottky diodes were fabricated. The temperature response curves (TRC) of the samples obtained were measured in the range 300-550 K. Mathematical expressions for the TRC, thermal sensitivity and high-temperature operation limit of the sensor were derived. Theoretical and experimental values of the sensor high-temperature operation limit and thermal sensitivity were presented. The recommendations for increasing both the high-temperature operation limit of the sensor as well as its thermal sensitivity were formulated.

## **Investigation of the structural features of CoFe - nanotubes obtained by template synthesis**

*Shlimas Dmitriy Igorevich*<sup>1</sup>, Kozlovskiy A.L.<sup>1</sup>, Aleshova N.E.<sup>1</sup>, Meirimova T.Yu.<sup>1</sup>, Kadyrzhanov K.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>L.N.Gumilyov Eurasian National University

In this work, we consider getting Co/Fe - nanotubes by template synthesis. PET membrane with pore density  $4.0 \cdot 10^7$  was used as a template, pore diameters was 400 nm, the height of the template was 12 micron. With increasing potential difference the atomic ratio of metal in obtained nanotubes shifted in favor of cobalt, cobalt reduction potential from the electrolyte solution dominates to the reduction potential of iron. Changing the atomic ratio of metal in nanostructures directly affects to the conductive properties of nanotubes. Controlling the geometry of the pores and the elemental composition of nanostruc-

tures, poible to obtain nanotubes to your specifications, which are then useful as the basic elements of nanoemitters.

## **NMR studies of the ferroelectric transition in bulk and nanostructured $\text{KH}_2\text{PO}_4$**

*Uskova Natalia*<sup>1</sup>, *Baryshnikov S.V.*<sup>2</sup>, *Podorozhkin D.Yu.*<sup>1</sup>, *Charnaya E.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Blagoveschensk State Pedagogical University

<sup>3</sup>Amur State University

This work presents results of investigations of the influence of size effects on the ferroelectric phase transition in potaium dihydrogen phosphate (KDP) by means of NMR. The studies were carried out for the following samples: bulk polycrystalline  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  embedded into porous glaes with a mean pore size of 7-8 nm and  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  embedded in mesoporous silica matrix (MCM-41) with a pore size of 3.7 nm. The jump of anisotropic component of the chemical shift tensor was observed at temperature near 122 K for bulk KDP and for KDP nanoparticles within MCM-41 molecular sieves. However, the bulk sample shows the faster rise of the anisotropic component of the chemical shift tensor at temperatures below the phase transition. The lineshape becomes asymmetric below the phase transition. The remarkable rise of the line width is also observed in the ferroelectric phase.

## **Investigation of the effect of thermal annealing on the conducting properties of Zn - nanotubes**

*Meirimova Tatyana Yurevna*<sup>1</sup>, *Kozlovskiy A.L.*<sup>1</sup>, *Aleshova N.E.*<sup>1</sup>, *Shlimas D.I.*<sup>1</sup>, *Kadyrzhanov K.K.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>L.N.Gumilyov Eurasian National University

In recent years a great interest in using a variety of track membranes as templates for the formation of one-dimensional arrays of nanostructures made of different metals and alloys in the form of nanowires and nanotubes. This paper presents the results of research of metallic Zn - nanotubes obtained by electrochemical deposition in the matrix template. EDS analysis of the spectra showed that the nanotubes are composed by 99.5% of the zinc. In the structure oxide compounds is not observed, 0.5% correspond to the impurity of gold, which was used as a conductive layer. X-ray diffraction showed that the test samples have a crystalline structure with a hexagonal primitive cell with lattice parameters  $a \sim 2,6655\text{\AA}$  and  $c \sim 4,9231\text{\AA}$ .

## **Defect structure, mechanical properties and thermal stability of nanostructured titanium produced in different types of rollings**

*Narykova Mariia*<sup>1</sup>, *Betekhtin V.I.*<sup>1</sup>, *Kadomtsev A.G.*<sup>1</sup>, *Kolobov Yu.R.*<sup>2</sup>, *Sklenicka V.*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Nanostructured Materials and Nanotechnologies Science, Education & Innovation Centre

<sup>3</sup>Institute of Physics of Materials AS CR, Brno, Czech Republic

The thermal stability of the structure and mechanical properties of nanocrystalline titanium VT1-0 obtained in two different ways - cryodeformation and combination of cross-screw and longitudinal rollings. The change in microhardne wide range of temperatures (573-1073 K) and annealing time (from 45 minutes to 100 hours). The influence of the method of producing nanostructures on microhardne and durability at tensile in the creep mode.

## **Technology of creation of superhard coatings based on AlMgB<sub>14</sub> thin films**

*Iuzviuk Maria Herardovna*<sup>1</sup>, *Grishin A.M.*<sup>1,2</sup>, *Putrolaynen V.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University

<sup>2</sup>KTH Royal Institute of Technology

One of the main directions in the field of tool wear and maintain its geometry at elevated proceing conditions is the development and application of wear-resistant coatings. One of the non-conventional material is AlMgB<sub>14</sub>. The hardne of this material reaches 51 GPa. The first films AlMgB<sub>14</sub> were prepared by pulsed laser deposition (PLD). The most promising technique of producing films is a method of vacuum magnetron sputtering. It allows to obtain thin film coatings of virtually any size and configuration. In this work RF magnetron sputtering from a single target is used to obtain films AlMgB<sub>14</sub>. To obtain a smooth uniform films with required stoichiometric composition and properties it necessary to select parameters of sputtering: target sputtering power, substrate temperature, target-to-substrate distance, the operating preing and deposition time. Optical and electron microscopy with energy dispersive analysis is used to control the roughne and the stoichiometric composition respectively. The results show that at this stage the obtained films contain main components - Al, Mg and B - and foreign elements such as C, N, O. Measurements of nanohardne and elastic Young's modulus were performed to obtain reliable strength characteristics of samples. The value of nanohardne is 37-39 GPa, the modulus of elasticity is 245-270 GPa, a value of elastic strain index is 0.14 or higher.

## **Deformation in BaTiO<sub>3</sub> and SrTiO<sub>3</sub> Single Crystals due to Converse Flexoelectric Effect**

*Rumyantseva Ekaterina Dmitrievna*<sup>1</sup>, Rumyantseva E.D.<sup>1</sup>, Zalekii V.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

The inhomogeneous deformations in the SrTiO<sub>3</sub> and BaTiO<sub>3</sub> thin plates induced by an electric field have been studied. The type of the inhomogeneous strain (banding, sagging) has been determined by the interferometer method and the flexoelectric tensors have been estimated. It is shown that strain gradients are affected by the domain structure in BaTiO<sub>3</sub>. The sagging deformation has been obtained in SrTiO<sub>3</sub> and its hysteresis due to mechanic relaxation has been shown.

## **Femtosecond laser pulse crystallization of hydrogenated amorphous silicon films**

*Petrov Mikhail*<sup>1,2</sup>, Belik V.P.<sup>1</sup>, Vasutinskiy O.S.<sup>1</sup>, Kukin A.V.<sup>1</sup>, Popov R.S.<sup>1,2</sup>, Terukov E.I.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>3</sup>Research and development center for thin-film technologies in energetics under Ioffe Institute

The paper presents experimental research on crystallization of amorphous silicon films by femtosecond laser pulses. The research was aimed for optimization of irradiation parameters, namely laser radiation wavelength, laser beam power, focus spot size and exposure. The observed effect demonstrated a strongly marked threshold character as function of the laser pulse energy density. The best results were obtained for laser radiation wavelengths within the range 740 - 760 nm.

## **The development of the flow reactor system for semiconductor and metal nanoparticles synthesis**

*Ryzhov Oleg Alexandrovich*<sup>1</sup>, Matyushkin L.B.<sup>1</sup>, Mbvanche R.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The object of this research is an automated method for flow reactor synthesis of semiconductor and metal nanoparticles as a new alternative to the wet chemistry techniques like hot injection method. The proposed prototype of flow reactor is divided into 4 main sections: 1) the system of syringe pumps to set up the flow rates of all liquids, 2) the capillary system, 3) the temperature control system, 4) the primary photoluminescence diagnosis system for semiconductor nanoparticles. Constructional articulation of all the installation elements is carried out using the 3D-printing. Hardware is a personal computer with a LabVIEW program. The experiments on the installation have been made to demonstrate the possibility of semiconductor (CdSe) and metal (Ag) nanoparticles synthesis.

## **Fractal and multifractal analysis of nanostructured materials based on the system Zn-Sn-O**

*Abrashova Ekaterina Victorovna*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The analysis of the surface structures of materials based on the system Zn-Sn-O performed for the limits of applicability of the multifractal approach to predict the appearance of a percolation cluster in nanoporous structures.

## **Temperature dependence of dielectric losses in composites based on polyethylene and barium titanate**

*Shatikhina Irina Vladimirovna*<sup>1</sup>, Shatikhina I.V.<sup>1</sup>, Castro R.A.<sup>1</sup>, Kononov A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Herzen State Pedagogical University of Russia

Temperature dependence of dielectric losses in the composites containing barium titanate is investigated. Two critical temperatures connected with phase transitions in barium titanate are found. Features of manifestation of a rhombic phase are perhaps connected with existence by a monoclinic cell.

## **Growing by laser molecular beam epitaxy heterostructures with layers of oxides and their study by X-ray magnetic circular dichroism**

*Petrova Julia*<sup>1</sup>, S.M. Sutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov

<sup>2</sup>Toffe Institute

Growing by laser molecular beam epitaxy heterostructures with layers of oxides and their study by X-ray magnetic circular dichroism. We have investigated the possibility of obtaining epitaxial layers of iron oxides: hematite  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ , maghemite  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ , magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\epsilon\text{Fe}_2\text{O}_3$ .



## Studying Spinodal Decomposition in the Sample of Gallium Arsenide Selenide Solid Solution via the Technique of Small-Angle X-Ray Scattering at Energies Close to the As and Se Absorption Edges

*Sharkov Michael*<sup>1</sup>, Boiko M.E.<sup>1</sup>, Bobyl A.V.<sup>1</sup>, Boiko A.M.<sup>1</sup>, Konnikov S.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

A sample of  $GaAs_{0.7}Se_{0.3} / GaAs$  solid solution grown by the method of liquid-phase epitaxy was studied using the technique of SAXS (Small-Angle X-Ray Scattering) at the beam energies of 11.89 keV and 12.66 keV which are slightly higher than the values of As (11.87 keV) and Se (12.65 keV) K edges. The SAXS data at the  $K_{\alpha 1}$  wavelength were also measured. Basing on the obtained SAXS data the sample is shown to have been subject to a process of spinodal decomposition into separate GaAs and GaSe phase components. Comparative analysis of three SAXS data sets obtained with the help of individual beam wavelengths allowed one to define sizes and shapes of domains versus their chemical composition for at least two diverse component types forming the sample  $GaAs_{0.7}Se_{0.3}$ . The sample was shown to contain a mosaic grain structure. Spatial characteristics and chemical composition of two domain types within the sample, particularly, GaAs (cells with sizes  $350 \times 350 \times 25$  nm approximately) and GaSe (cells  $350 \times 350 \times 15$  nm approximately). Some fragments without As atoms in the studied sample appeared also to have a chain-like structure. The example of studying spinodal decomposition in the  $GaAs_{0.7}Se_{0.3} / GaAs$  compound has demonstrated the technique of near-edge SAXS to be capable of defining relations between inhomogeneity parameters within the considered sample. Namely, data on domain size and shape are connected with assumptions on chemical composition of these domains.

## Synthesis of zinc selenide colloidal nanocrystals doped with manganese

*Nikiforova Angelina Valerjevna*<sup>1</sup>, Mazing D.S.<sup>1</sup>, Aleksandrova O.A.<sup>1</sup>, Moshnikov V.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Colloidal quantum dots of ZnSe doped with manganese were synthesized in aqueous and organic solvents using facile nucleation doping technique. Samples were studied by means of absorption and photoluminescence spectroscopies. Depending on the synthesis conditions thus obtained nanocrystals exhibit strong photoluminescence with the peak maximum at 585-600 nm and full width at half maximum ranging from 57 to 100 nm.

## **Effects of resistive switching in composite films based on polymer with graphene and graphene oxide nanosheets**

*Krylov Pavel Stanislavovich*<sup>1,2</sup>, Berestennikov A.S.<sup>1,2</sup>, Aleshin A.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

We researched the effects of resistive switching in composite films based on poly-functional polymers - polyvinylcarbazole (PVK) and polyfluorene (PFD), dielectric polymer - polyvinyl chloride (PVC), and nanosheets of graphene (Gr) and graphene oxide (GO). Concentration of graphene and GO into the polymer matrix was 2-3 wt.%, which corresponds to the percolation threshold in such systems. Atomic composition of the composite films PVK:GO was researched. It was found that the effect of switching in the structures Al / PVK (PFD,PVC):GO (Gr) / ITO is manifested in abrupt change of resistance of the composite film from low conducting state to relatively high conducting state when applying bias to Al - ITO-electrodes ~ 0.1 - 0.3 V. The obtained switching voltages are much lower than the threshold voltage for other similar composites. The mechanism of the resistive switching is associated with the process of capture and accumulation of charge carriers in Gr (GO) nanosheets placed into the polymer matrix.

## **Optical visualisation of graphene films on transparent substrates**

*Rabchinskii Maxim Konstantinovich*<sup>1,2</sup>, Dideikin A.T.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov

<sup>2</sup>Ioffe Institute

Graphene, since its discovery by exfoliation of graphite in 2004 by Novoselov, Geim and co-workers, still attracts enormous attention in the scientific community because of its unique properties [1, 2]. There are several technologies of graphene production: mechanical cleavage of highly oriented pyrolytic graphite (HOPG), chemical oxidation of graphite with subsequent reduction, chemical vapor deposition (CVD) and others [3, 4]. With the development of graphene technology, it has become important to visualize and determine the thickness and defectiveness of the deposited graphene layers, and optical microscopy offers possibility of fast and efficient analyzing of obtained material [5, 6]. However, it requires use of specially prepared silicon substrate. In our work we demonstrate new technique of visualizing graphene films on several transparent substrates. It's based on forming of optical system, in which sample is placed, and using linearly polarized light, resulting in significant decrease in intensity of light, reflected from bare substrate. Consequently, it provides possibility of obtaining of highly-contrast images of graphene films, which is confirmed both by theoretical calculations and experimental data. As this technique doesn't require any specially prepared substrate or placing samples in liquids [7], it could be efficient method for analyzing of graphene films and also provides visual controlling of some operations with graphene (e.g. placing electrical contacts).

## **Structural studies of the carbon film graphene with inclusions**

*Mikhaylina Anna Arkadyevna*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

This paper presents the results of structural studies of a new facility on the basis of natural carbon - carbon graphene membranes with a grid. Identification of carbon structures and defects made the study of the Raman spectrum. The morphology of the membrane was studied using 3D laser microscope and a scanning electron microscope.

## **The research of electric properties and defectoscopy of nanocomposites based on silicon dioxide and polymers reinforced with carbon nanotubes**

*Osokin Constantine Sergeevich*<sup>1</sup>, Eseev M.K.<sup>1</sup>, Goshev A.A.<sup>1</sup>, Kapustin S.N.<sup>1</sup>, Horodek P.<sup>2</sup>, Kobets A.G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics PAN

<sup>3</sup>Institute of Electrophysics & Radiation Technologies National Academy of Sciences of Ukraine

The investigation of nanocomposites reinforced with carbon nanotubes with a goal of their properties functionalization is being conducted in many research centers [1, 2]. In works [3-5] the study of functional properties of nanocomposites reinforced with multi-walled nanotubes (CNT) based on silicon dioxide matrix was conducted. Significantly non-linear percolation character of composites dielectric properties dependence (conductivity and complex permittivity) on the filler concentration has been found. The studies of dielectric properties of nanomaterials have been conducted with a help of dielectric relaxation spectroscopy method. Surface properties of nanocomposites were studied using atomic force and electron microscopy. Besides, there was a research of samples inner properties conducted by means of positron annihilation spectroscopy method on LEPTA [6] (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna). The researches are continued in current work with polymer nanocomposites based on epoxy considering the orientation of nanotubes in samples by the positron annihilation spectroscopy methods and collation of the results with the works of other authors [7]. Based on the results obtained the methods of diagnostic and control of functional properties of nanocomposites are offered.

## **Research zinc oxide nanowires grown on the sol-gel layers by hydrothermal method**

*Somov Pavel*<sup>1</sup>, Bobkov A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Svetlana-Rost, LLC

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Zinc oxide nanowires were grown by the hydrothermal method on nanocomposite layers of zinc oxide and silicon dioxide prepared by the sol-gel method. The morphology of samples were studied by scanning electron microscopy. Also the electrical properties were investigated by impedance spectroscopy and were analyzed by equivalent circuits.

## **Synthesis of copper doped zinc selenide nanocrystals emitting in blue-green range of the spectrum**

*Mazing Dmitrii Sergeevich*<sup>1</sup>, Chernaguzov I.S.<sup>1</sup>, Aleksandrova O.A.<sup>1</sup>, Moshnikov V.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Blue – green emitting zinc selenide nanocrystals were synthesized by doping with copper in aqueous medium. Dopant ions were introduced into the host lattice at the nucleation stage and were secured inside the core through deposition of wider bandgap zinc sulfide shell. Nanoparticles are characterized by wide photoluminescence peak with full width at half maximum about 95 nm and maximum at 470-480 nm.

## **Local enhancement of the magnetic field in a vacuum using dielectric nanostructures**

*Baryshnikova Kseniia*<sup>1</sup>, Shalin A.S.<sup>1</sup>, Ginzburg P.B.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

<sup>2</sup>Tel Aviv University (Israel)

Management of the electromagnetic waves at the nanoscale is an important task of modern nanophotonics [1, 2]. The nanostructures of different materials and shapes effectively communicate with the light at optical range [3]. Previously plasmonic nanoparticles were intensively studied because they can localize electric field near their surface [4]. The particles of materials with high refractive index have both electric and magnetic response, but the fields are localized mainly inside the particle, which interact with the light like a resonator [5, 6]. Material of the particles can be non-magnetic; magnetic response is a result of the circular displacement current inside the particles [7]. Important feature of the magnetic resonance in dielectric systems is that the localization of the magnetic field is retained in the hole inside the particle [8]. "Hot spots" of the magnetic field in free space can be used effectively for exciting the magnetic moments of the particles with no dependence on

the electrical ones and controlling movement of the magnetic dipoles in analogy with the electric dipoles in areas of the electric field gradient. This report highlights the mode structure of the dielectric cylinder's magnetic resonances, also we analyze the magnetic field enhancement in dependence on the structure's geometrical parameters and optimize parameters of this enhancement.

## **The charge carriers transport in composite films based on bacterial cellulose modified with conductive polymer PEDOT/PSS**

*Berestennikov Alexander Sergeevich*<sup>1,2</sup>, *Krylov P.S.*<sup>1,2</sup>, *Aleshin A.N.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

Composite films based on bacterial cellulose (BC) modified with conductive polymer PEDOT/PSS are synthesized. Structural, optical and electrical properties of such composite films are investigated. It was found that the obtained BC:PEDOT/PSS films characterized by strong absorption in the red and nearinfrared spectral region and by weak intensity of photoluminescence at 300 K. The temperature dependence of the resistivity of the BC:PEDOT/PSS films follows a power law in the temperature interval 300–80 K and the resistivity values vary weakly with time. The charge carrier transport in the BC:PEDOT/PSS composite films governed mainly by the charge transport in the conducting polymer. The obtained BC:PEDOT/PSS films are promising for application as biocompatible electrodes, temperature sensors and other biochips, which are compatible with technology of printable organic electronics.

## **Effect of superparamagnetic nanoparticles on the separation via electromigration analytical methods**

*Fedorov Aleksey Aleksandrovich*<sup>1</sup>, *Bulyanitsa A.L.*<sup>1</sup>, *Osmolovskaya N.A.*<sup>1</sup>, *Krasovskiy A.N.*<sup>1</sup>, *Shmykov A.Yu.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Institute for Analytical Instrumentation

The study is aimed at the development of a novel separation method based on electromigration, chromatography and magnetism. These effects are supposed to be combined using superparamagnetic nanoparticles (SPNP) incorporated into a polymer layer or sorbent in a fused silica capillary column (CC) to provide a magnetic field due to their intrinsic magnetization and/or applied electric field. The electric field application will also provide different migration rates of the separated mixture components and electroosmotic flow in CC. The combined effect of electric and magnetic fields is expected to improve the separation efficiency for both magnetic (e.g. metal nanoparticles and their bioconjugates) and non-magnetic analytes.

The research work is also aimed at mathematical simulation of magnetic field effects upon the separation using electromigration analytical techniques. The theoretical character-

ization of the effects achieved by SPNP incorporation into the polymer sorbent is a complex multi-factor simulation based on modeling various physical fields (magnetic, electric, temperature) in anisotropic media. Preliminary mathematical models describing the considered new separation method are based on equations characterizing the effect of magnetic particles (generalized Biot-Savart law), longitudinal transfer in CC and zeta-potential of the sorbent (Poion-Boltzmann equation), perpendicular transfer in CC (Lorentz magnetic force), etc.

The research work is supported by the Russian Foundation for Basic Research 15-03-04643.

## **Magnetic properties of superconducting nanocomposites based on indium in porous dielectrics**

*Mikhailin Nikolai Yurievich*<sup>1</sup>, Kozub V.I.<sup>1</sup>, Kumzerov Yu.A.<sup>1</sup>, Parfeniev R.V.<sup>1</sup>, Sysoeva A.A.<sup>1</sup>, Fokin A.V.<sup>1</sup>, Shamshur D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Magnetic properties of In nanocomposite based on opals and porous gla were studied. In this type of structure indium forms a 3D network of nanoparticles, which is ordered in case of opals and random in case of porous gla. Porous gla with 7 nm mean pore size and opals with various minimal pore size (10 nm - 45 nm) were used. Magnetisation dependencies on external magnetic field H1.5 K. Critical temperature (up to 4 K) and critical magnetic field ( $H_c(T=2\text{ K})$  up to 15 kOe) in nanocomposite samples are significantly higher than in the bulk In ( $T_c = 3.4\text{ K}$ ,  $H_c(T=0) = 280\text{ Oe}$ ). At temperatures lower than 3 K magnetisation jumps were observed. Structure of jumps and its dependency on field sweep rate, temperature and sample structure was studied and a basic model describing this effect was suggested.

## Optical study of metal nanoisland resonant

*Babich Ekaterina Sergeevna*<sup>1</sup>, Scherbak S.A.<sup>2</sup>, Heisler F.<sup>3,4</sup>, Chervinskii S.D.<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>3</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,  
Mechanics and Optics

We present our studies on plasmonic properties of isolated silver nanoislands different in shape and size. The net of nanoislands was fabricated on soda-lime glass substrate using silver-sodium ion exchange and subsequent thermal poling treatment. Characterization of each nanoisland was provided by means of atomic force microscopy, scanning electron microscopy and dark field spectroscopy. Experimental data was compared with the results of numerical modeling.

## Spectral luminescence and laser properties of $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ crystals

*Chabushkin Alexey*<sup>1</sup>, Ryabochkina P.A.<sup>1</sup>, Lyapin A.A.<sup>1</sup>, Sydorova N.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N.P.Ogarev Mordovia State University

Yttrium-stabilized zirconia crystals activated with  $\text{Er}^{3+}$  ions are promising materials for 1.6-1.7  $\mu\text{m}$  lasers. We investigated spectral luminescence and laser properties of this crystals. The spectral dependence of the gain cross section for the  ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  transition of  $\text{Er}^{3+}$  ions in  $\text{ZrO}_2\text{-13.4mol\% Y}_2\text{O}_3\text{-0.6mol\% Er}_2\text{O}_3$  crystals was determined.

## Peculiarities of Maxwell's equations solution for buried quantum well

*Shapochkin Pavel Yur'evich*<sup>1</sup>, Kapitonov Yu.V.<sup>1</sup>, Lovtcius V.A.<sup>1</sup>, Eliseev S.A.<sup>1</sup>, Efimov Yu.P.<sup>1</sup>, Petrov V.V.<sup>1</sup>, Ovsyankin V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

Maxwell's equations for light reflection from thin single quantum well at given depth is studied. Obtained analytical solution predicts several peculiarities in reflection coefficient and phase behavior. These peculiarities are experimentally demonstrated for thin In-GaAs/GaAs quantum wells.

## **Investigation of the spectral-luminescent properties of Er<sup>3+</sup>-doped nanosized crystals Y<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>PO<sub>4</sub> and Y<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>PO<sub>4</sub>·0.8H<sub>2</sub>O (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1)**

*Khrushchalina Svetlana Aleksandrovna*<sup>1</sup>, Vanetsev A.S.<sup>2</sup>, Gaitko O.M.<sup>3</sup>, Kyashkin V.M.<sup>1</sup>, Ryabochkina P.A.<sup>1</sup>, Sildos I.<sup>2</sup>, Tabachkova N.Yu.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>N.P.Ogarev Mordovia State University

<sup>2</sup>Tartu Ülikool

<sup>3</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS

<sup>4</sup>The National University of Science and Technology MISIS

The present paper contains the results of investigations of phase composition, morphology and spectral-luminescent properties of nanosized crystals Y<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>PO<sub>4</sub> and Y<sub>1-x</sub>Yb<sub>x</sub>PO<sub>4</sub>·0.8H<sub>2</sub>O (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1). Study of the luminescent characteristics of these concentration series showed the presence of broadband luminescence in the region of wavelengths of 370-900 nm along with the anti-Stokes luminescence of Er<sup>3+</sup> ions under excitation at  $\lambda = 972$  nm corresponding to the absorption band of the ions Yb<sup>3+</sup>. Based on the additional research it was concluded about the mechanism of this luminescence.

## **Absorption cross section of two-particle clusters of homogeneous and layered conductive nanoparticles with the degenerate electron gas**

*Nalbandyan Viktor Meruzhanovich*<sup>1</sup>, Kucherenko M.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Educational Government-Financed Institution of Higher Professional Education "Orenburg State University"

In this study we investigated the absorption of electromagnetic field energy two-particle cluster, given the degenerated electron gas of material particles. The obtained absorption cross-sections of clusters have complex multiresonant range and a strong dependence on the various parameters of the cluster. The value of absorption cross section depends on the direction of the intensity vector E of the external electric field relative to the axis of the cluster r.

## **On a theory of light scattering from a Bose-Einstein condensate**

*Ezhova Victoria Mikhailovna*<sup>1</sup>, Gerasimov L.V., Kupriyanov D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

We develop quantum theory for elastic light scattering on macroscopic and inhomogeneous atomic sample existing in the BEC phase. Evident signatures of cooperative dynamics in light scattering on condensate have been observed in experiments [1, 2]. The strong coherent scattering of light on a sample led to the condensate fragmentation and this effect was explained in [1] in terms of Kapitza-Dirac diffraction phenomenon. Our approach is based on the second quantized formalism and on self-consistent description of the



excitation proce. We derive a general equation for the polariton propagator contributed to the T -matrix and scattering amplitude. Our theory follows important density correction to the quasi-energy structure and radiation loes aociated with the static interactions of atomic dipoles and with incoherent scattering in the case of near resonance excitation.

## **Optical Tamm states in a photonic crystal structure based on the cholesteric liquid crystal**

*Pyatnov Maxim (Vladimirovich)<sup>1</sup>, Vetrov S.Ya.<sup>1</sup>, Timofeev I.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Siberian Federal University

<sup>2</sup>L.V. Kirensky Institute of Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science

We investigate the localized surface modes being analogous to the optical Tamm states in a structure consisting of the cholesteric liquid crystal layer, a phase plate, and a metal layer. These modes are analogous to the optical Tamm states. It is demonstrated that the transmiion spectrum can be controlled by varying the plane of polarization of the incident light and external fields acting on the cholesteric.

## **Radiative transitions under H+H- collisions**

*Dadonova Alla Vasil'evna<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>The Herzen State Pedagogical University of Russia

The proce of resonant charge exchange and photo detachment give examples of bound-bound and bound-free electron transitions in the H + H- quasimolecules temporally formed during collisions. The present work is aimed at the calculations of spectral profiles produced in the reactions.

## **Short-period grating for radiation input to planar total internal reflection waveguide**

*Lozhkina Olga<sup>1</sup>, Lozhkin M.S.<sup>1</sup>, Kapitonov Yu.V.<sup>1</sup>, Manuhova A.D., Shapochkin P.Yu.<sup>1</sup>, Efimov Yu.P., Eliseev S.A.<sup>1</sup>, Lovtcius V.A.<sup>1</sup>, Petrov V.V.<sup>1</sup>, Kozlov G.G.<sup>1</sup>, Ovsyankin V.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

In present paper we demonstrate the method of near IR radiation input to the GaAs/AlGaAs planar total internal reflection waveguide by a short-period grating formed directly on the waveguide by plasma beam etching through a polymer electron-lithographic mask.

## **Temporal selfcompression of chirped converging beams in thin fused silica plate**

*Grudtsyn Iakov Viktorovich*<sup>1</sup>, Mikheev L.D.<sup>1</sup>, Koribut A.V.<sup>1</sup>, Trofimov V.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The P.N. Lebedev Physical Institute

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University

Studied both experimentally and theoretically is the interaction of positively and negatively chirped femtosecond pulses in the visible (475 nm) with a thin fused silica plate in convergent beam geometry. Significant selfcompression was observed, radiation spectrum varied with chirp and its sign as well as with intensity value.

## **Accounting of Breit and QED corrections for calculations of Mg-like ion spectra**

*Konovalova Elena Alexandrovna*<sup>1</sup>, Kozlov M.G.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

In this work we calculated low-lying energy states for the ions of magnesium isoelectronic sequence. We use several methods: configuration interaction (CI), combination of CI plus many-body perturbation theory (CI+MBPT), and CI plus coupled-cluster (CI+CC). We focused on the role of Breit corrections and QED corrections and found out that for the heaviest ions considered here (S V and Cl VI) these corrections become important. The accuracy is estimated in comparison calculated atomic spectra with corresponding experimental data.

## **Spectrum of parametric radiation in resonance regime of photon generation**

*Levchenko Alexander*<sup>1</sup>, Trifanov A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

We investigate spectral and statistical properties of the field generated because of the dynamical Casimir effect under various resonance conditions arise as a consequence of the periodic motion of the boundary of the cavity. In particular, we scrutinize the effects of intermode interaction and the occurrence of two-mode squeezing.

## **Nonlinear dynamics of the exciton reflection spectrum**

*Beliaev Leonid Yurievich*<sup>1</sup>, Ovsyankin V.V., Stroganov B.V.<sup>1</sup>, Petrov V.V.<sup>1</sup>, Efimov Yu.P.<sup>1</sup>, Dolgikh Yu.K.<sup>1</sup>, Eliseev S.A., Kapitonov Yu.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

We present the investigation of spectral dynamics of resonant exciton nonlinear reflection GaAs/InGaAs quantum well structure. It was found that at the moment when pump comes and disturb the system, there is a rapid decrease of the amplitude and broadening of the spectra, after which the system starts to relax to its initial condition. It turned out that the character of changes of the parameters KRR and HWHM depends only on the values of pump intensity and does not depend on the probe. It is shown that the magnitude of inhomogeneous broadening changes greater quantities radiation width and makes a greater contribution to the broadening of the spectrum, and radiation width in the time interval from approximately 0 to 40 ps is increased, due to the new formation of excitons. It is shown that with increase of pump, the relaxation times of the system increase linearly.

## **Methods for excitation and detection signals of ODMR in nitrogen-vacancy centers in diamond in the scheme of quantum micro-magnetometer**

*Dmitriev Alexander Konstantinovich*<sup>1</sup>, Vershovskii A.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

Signals of optically detected magnetic resonance (ODMR) have been studied in the scheme of a three-component quantum magnetometer based on nitrogen vacancy color centers in diamond crystal. Sample with a volume of  $\sim 0.01 \text{ mm}^3$  has been mounted on the end of an optical fiber. A method for excitation of the ODMR signal is proposed that ensures identification of the resonance lines at a minimum number of dead zones. A sensitivity to components of the field vector on a level of  $4.6 \text{ nT} \times \text{Hz}^{-1/2}$  is achieved. It is shown that the shot-noise-limited sensitivity amounts to  $0.2 \text{ nT} \times \text{Hz}^{-1/2}$ .

## **Inverse problem of laser correlation spectroscopy solution for the polydisperse solutions analysis**

*Nepomniashchaia Elina Konstantinovna*<sup>1</sup>, Velichko E.N.<sup>1</sup>, Aksenov E.T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

In this work a problem of polydisperse solutions analysis was considered. A new algorithm for inverse problem of laser correlation spectroscopy solution was suggested. Results of model and experimental signals proceeding show the high accuracy and resolution of a computer program, based on the suggested algorithm.

## Observation of spin-dependent effects in garnet crystals via $Ce^{3+}$ emission

*Uspenskaya Yulia Alexandrovna*<sup>1</sup>, Gurin A.S.<sup>1</sup>, Tolmachev D.O.<sup>1</sup>, Asatryan H.R.<sup>1</sup>, Romanov N.G.<sup>1</sup>, Baranov P.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Garnet crystals with the  $Ce^{3+}$  activator demonstrate increasing potential for their use as high-performance scintillators in many fields, including positron emission tomography imaging and high energy physics. Recent publications on the application of garnet crystals doped with rare-earth elements for quantum computing open up new possibilities in this direction. Coherent properties of rare-earth single-spin qubits in yttrium aluminium garnets  $Y_3Al_5O_{12}$  have been demonstrated. In the present paper, we report results of a study of Ce doped single crystals of different garnets by means of photoluminescence, tunnelling afterglow, electron paramagnetic resonance (EPR) and optically detected magnetic resonance (ODMR).

## Influence of the wavelength and dose of the exciting radiation on photosensitized generation of singlet oxygen

*Irina Aleksandra Dmitrievna*<sup>1,2</sup>, Vasyutinskii O.S.<sup>2</sup>, Glazov A.L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

Photosensitized generation of singlet oxygen with photosensitizer Radachorin was experimentally studied. The paper presents intensities of the singlet oxygen phosphorescence and Radachorin fluorescence versus the wavelength and dose of exciting radiation in the range from 345 to 520 nanometers. Intensity correlations for transitions between a  $^1\Delta_g$  and  $X^3\Sigma_g^-$  states of molecular oxygen and  $S_1$  and  $S_0$  states of the photosensitizer were revealed. The received experimental results allow to estimate the optimum energy of exciting photons for effective generation of singlet oxygen and to confirm a possibility of indirect control of singlet oxygen concentration at light generation in the Radachlorin solution by photosensitizer fluorescence.

## Investigation by means of ECV technique of ion-implanted photosensitive structures for backside illuminated CCD's to optimize parameters of based on them devices

*Yakovlev Georgii Evgenevich*<sup>1</sup>, Frolov D.S.<sup>1</sup>, Zubkov V.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Silicon structures implanted by boron for CCD matrix with back side illumination were investigated by means of electrochemical capacitance-voltage profiling. The structures were specially fabricated using various energies and doses of implantation, as well as various materials were used as their coating layers: Al, silicon oxide and their combinations. The concentration profiles of charge carriers over the structure depth were experi-

mentally obtained. Further using Poisson equation and Fredholm equation of the first kind the distribution of charge carrier concentration and electric field intensity in depth of the structures were calculated. By analyzing and comparison of theoretical and experimental concentration profiles the recommendations for optimization of structure parameters were proposed aiming at increase of sweeping field and decrease of surface potential impact on charge carrier transport.

## **New method of liquid medium streams investigation on basis of nuclear - magnetic spectroscopy and laser radiation scattered**

*Vologdin Vasilij Aleksandrovich*<sup>1</sup>, Davydov V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

The results of studies of the structure of magnetized fluid flow using the autocorrelation function of the scattered laser light. The character of the intensity of the scattered laser light for different directions of the magnetization vector of the flowing liquid on the angle of the impact of radiation on the current thread. The experimentally measured angle  $\nu$  between the dipole axis and the direction of current flow, which had previously been impossible to determine. A method that allows a contactless manner to define internal defects in the pipeline

## **Investigation of high density volume of particles based on of the correlation peak to background ratio**

*Vovk Tatiana Antonovna*<sup>1</sup>, Petrov N.V.<sup>1</sup>, Nikolaeva T.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

A method for the study of suspension particles in the case of high concentrations is developed. It is based on the imaging of different layers of the volume illuminated by coherent light. Numerical calculations of this method are performed. It characterizes the distribution of particles in the volume and estimates the concentration by means of correlation analysis of particle images in adjacent planes of the volume through the ratio of the correlation peak to the pedestal.

## **Kinetics of photosensitizer fluorescence and singlet oxygen phosphorescence as a function of oxygen concentration in water**

*Beltukova Dina Mihailovna*<sup>1,2</sup>, *Vasyutinskii O.S.*<sup>1,2</sup>, *Glazov A.L.*<sup>1</sup>, *Semenova I.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

The paper presents experiments on simultaneous recording of Radachlorin photosensitizer fluorescence and singlet oxygen phosphorescence as a function of oxygen concentration. The analysis of the results obtained allowed us to estimate main photophysical parameters of the process, namely the bleaching rate coefficient, diffusion coefficient, and a ratio of the absorption and fluorescence rate constants. These data can be utilized for providing optimal photosensitizer concentration and excitation light intensity for singlet oxygen generation in solutions.

## **Spectroscopy and optical properties of rare-earth phosphors garnets synthesized under high pressure**

*Yusuf Alexey*<sup>1</sup>, *Galashov E.N.*<sup>1</sup>, *Mandrik E.M.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University

The work is devoted to the rare earth phosphors garnets. The result of this work is a significant drop in temperature synthesis of phosphors (1300°C) compared to the classical solid phase synthesis (above 1650°C). Light characteristics of synthesized phosphors do not concede to the best commercial lighting characteristics of samples of the company Cree.

## **Features of forming of selective indicatrix photoinduced light scattering in the LiNbO<sub>3</sub>: Rh crystals**

*Maksimenko Vitaliy Aleksandrovich*<sup>1</sup>, *Danilova E.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University

Article contains the results of experimental investigation of the angle-selective photoinduced light scattering in LiNbO<sub>3</sub>:Rh crystal. The different cases of pumping beam directions are discussed. We considered the angle-selected light scattering as a kind of four-wave interaction.

## **Optical anisotropy of photonic crystals with cubic symmetry in the multimode regime of light propagation**

*Ukleev Timofei<sup>1,2</sup>, Iurasova D.I.<sup>3</sup>, Shevchenko N.N.<sup>3</sup>, Sel'kin A.V.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

<sup>3</sup>Institute of Macromolecular Compounds RAS

Bragg reflection spectra are studied for opal-like photonic crystals made of polystyrene spheres. A resonant enhancement of reflectivity is observed in cro-polarization configuration of the analyzer and polarizer when varying the azimuthal orientation of a sample in respect to the incidence plane. The cro-polarization effect takes place at oblique incidence of light on the lateral (111) crystal plane with the plane of incidence being non-perpendicular to the inclined (11-1) crystal plane, demonstrating a high anisotropy of the cubic crystal. The effect is shown to arise in the regime of multimode propagation of light inside the photonic crystal when the multiple Bragg diffraction of light occurs.

## **Effect of the silver nanoparticles shell on the rhodamin 6G fluorescence in the polyvinyl alcohol film**

*Konstantinova Elizaveta Ivanovna<sup>1</sup>, Slezhkin V.A.<sup>1</sup>, Bryukhanov V.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University

The effect of the silver nanoparticles shell on the fluorescence intensity, the lifetimes and the luminescence quantum yields of the rhodamine 6G molecules in the polyvinyl alcohol film has been studied. Ablated silver nanoparticles enhance the molecules R6G fluorescence more than nanoparticles coated with a protective shell have been obtained.

## **Method for in-situ measurement of the high temperature distribution in micron-size specimens based on acousto-optic spectral imaging**

*Machikhin Alexander<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS

We developed a unique acousto-optic imaging system for in-situ measurement of high temperature distribution over micron-size specimens. The system was designed to measure temperature distribution inside minerals and functional material phases subjected to high preure and high temperatures in a diamond anvil cell (DAC) heated by a high powered laser. Experimental results are presented.

## **Raman spectroscopy to ae derm detsellyulyarization biomatrix**

*Pershutkina Svetlana Valer'evna*<sup>1</sup>, Shalkovskaya P.Yu.<sup>1</sup>, Timchenko E.V.<sup>1</sup>, Timchenko P.E., Volova L.T.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Samara State Medical University

The work presents results of the evaluation of derm detsellyulyarization biomatrix using Raman spectroscopy. As the basic method of research on derm detsellyulyarization biomatrix method was used Raman spectroscopy when implemented by high-resolution digital spectrometer Shamrock sr-303i with integrated refrigerated storage DV420A-OE, provides spectral resolution of 0.15 nm ( $1 \text{ cm}^{-1}$ ), the laser module LuxxMaster LML-785.0RB-04 (up to 500 mW, wavelength 785 nm). For confirm the findings results was performed scanning electron microscopy. The samples of research were used derm samples produced by different protocols detsellyulyarization. As a result of studies, the following conclusions: - Was particularly Raman spectrum for derm biomatrix made by different protocols. It is found that the major differences occur at wavenumbers 1062 and 1659  $\text{cm}^{-1}$  corresponding to glycosaminoglycans and type I collagen. - An analysis of two-dimensional input optical coefficients for evaluating derm biomatrix made by different protocols. - Results of the research are confirmed by scanning electron microscopy.

## **Application of the method Raman spectroscopy for diagnosis of dental tiues**

*Kulabuhova Arina Yuryevna*<sup>1</sup>, Timchenko P.E.<sup>1</sup>, Timchenko E.V.<sup>1</sup>, Zherdev L.A.<sup>1</sup>, Volova L.T.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Samara State Medical University

The paper presents the results of studies of diseases of tooth tiue using Raman spectroscopy. Raman spectra were obtained particularly samples of enamel, dentin and cement of the tooth and the tooth pulp calcifications. Based on the analysis of the Raman spectra we investigated the distribution of mineral and organic components of solid tooth tiues under normal and caries lesions and calcifications studied dental pulp. Introduced criteria for identifying these types of pathologies. For hard tooth tiues ratio of the intensities at the wave numbers 1069 and 870  $\text{sm}^{-1}$  remains constant even in the formation of tooth decay, at the same time, calcification of the tooth with a diagnosis of growth characterized by degeneration of the pulp ratio at wave numbers 1069 and 870  $\text{sm}^{-1}$ , which can be used for the diagnosis of fibrous pulpitis. For typical offset enamel towards substitution (type A) OH-group on  $(\text{SO}_3)_2$  ( $1098 \text{ cm}^{-1}$ ) in the apatite compared with substitution (B-type)  $(\text{PO}_4)_3$ -group on  $(\text{SO}_3)_2$ - ( $1069 \text{ cm}^{-1}$ ). At pathological procees, such as calcification of dental caries and a shift to the B-type substitution. The research results are confirmed by scanning electron microscopy.



## Investigation of coherent population trapping signals in $^{87}\text{Rb}$ cells with buffer gas

*Fedorov Maksim Igorevich*<sup>1</sup>, Ermak S.V.<sup>1</sup>, Petrenko M.V.<sup>2</sup>, Pyatyshev E.N.<sup>1</sup>, Semenov V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

Characteristics of CPT (coherent population trapping) signal are investigated in small-size gla vapor cells containing  $^{87}\text{Rb}$  and Ne buffer gas with narrow linewidth laser pumping on  $D_2$  line. Parameters of CPT absorption signals are measured using small-size vapor cells with Ne buffer gas preure in range of 200 – 400 Torr, cell temperature in range of 65 – 120 °C and values of laser pumping power of 30 – 400 mkW/cm<sup>2</sup>. Optimum conditions, under which the minimal value of short-term instability of resonance line is achieved, are obtained in experiments. CPT signals using vapor cells based on integrated technologies containing  $^{87}\text{Rb}$  in atmosphere of Ne are also investigated. The CPT signals with typical linewidths of 2 – 3 kHz and signal-to-noise ratio of 1500 in 1 Hz bandwidth are observed, which allows one to provide relative frequency instability of  $10^{-11}$  at 100 s.

## Quantum magnetometers as a base for atomic clock

*Sagitov Eduard Anvarovich*<sup>1</sup>, Ermak S.V.<sup>1</sup>, Petrenko M.V.<sup>2</sup>, Semenov V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

The poibility of the atomic clock based on two quantum magnetometer system development is demonstrated. One of the magnetometers is self-oscillation type, another is  $M_z$ -type magnetometer based on end-state UHF-resonance. The laser pumping of  $^{87}\text{Rb}$  atoms placed into anti-relaxation coated sell is provided. The magnetometers frequency difference fluctuations experimental results is represented and Allan deviation is determined. The role of the radio-optical resonance frequency light shift different components is denoted for the determine of the quantum magnetometers optimal operation mode. The effect of the light shift compensation is demonstrated.

## **Intracellular detection of singlet oxygen in biological objects by simultaneous recording of its radiative and nonradiative relaxation**

*Belashov Andrey Vladimirovich*<sup>1,2</sup>, *Semenova I.V.*<sup>1</sup>, *Petrov N.V.*<sup>2</sup>, *Vasyutinskii O.S.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

Molecular oxygen and in particular reactive oxygen species play a key role in a vast variety of biological processes. The paper presents results of simultaneous recording of radiative and nonradiative relaxation of singlet oxygen in biological objects at intracellular level. Holographic methods provide information about spatial distribution of singlet oxygen while detection of its phosphorescence intensity directly confirms its presence.

## **Dielectric spectroscopy of sillenite crystals $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$**

*Nabiullina Lilia Ansafovna*<sup>1</sup>, *Castro R.A.*<sup>1</sup>, *Shadrin E.B.*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Herzen State Pedagogical University of Russia

<sup>2</sup>Ioffe Institute

Features of processes of a dielectric relaxation and charge transport in sillenite crystals  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  are investigated. The results are being discussed involving the model of the hopping mechanism of conductivity. It is established that charge transport is thermally activated process which activation energy  $E_a = (0.72 \pm 0.03) \text{ eV}$ .

## **Broadband conversion of CO-laser radiation in nonlinear crystal $\text{AgGaSe}_2$**

*Budilova Oksana*<sup>1</sup>, *Ionin A.A.*<sup>1</sup>, *Kinyaevskiy I.O.*<sup>1</sup>, *Klimachev Yu.M.*<sup>1</sup>, *Kozlov A.Yu.*<sup>1</sup>, *Kotkov A.A.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The P.N. Lebedev Physical Institute

A broadband two-stage conversion of CO laser radiation (second harmonic generation (SHG) and the difference frequency generation (DFG)) in a nonlinear crystal  $\text{AgGaSe}_2$  was realized. The internal conversion efficiency was ~1%. SHG radiation spectrum consists of 48 spectral lines in the wavelength range from 2.5 to 2.9 microns, and the emission spectrum of DFG consists of ~50 lines in a range from 4.38 to 4.85 microns.

## Ultrafast dynamics of the phonon modes induced by femtosecond laser pulses in a ferroelectric-semiconductor $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$

*Grishunin Kirill*<sup>1</sup>, Brekhov K.A.<sup>1</sup>, Sherstuyk N.E.<sup>1</sup>, Mishina E.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation

In this work it was studied the excitement and dynamics of the phonon modes by femtosecond laser pulses in a ferroelectric-semiconductor  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ . The possibility of excitation of two phonon modes in the crystal. One of the modes corresponds to acoustic phonons, while the other agrees qualitatively with the behavior of the soft mode in the ferroelectric. It is also important to note that the high-frequency oscillations excited underwent a "softening" of the frequency at times of a few picoseconds. This effect may be indicative of a phase transition "order-disorder" in the ferroelectric induced by femtosecond laser pulse and developing in the picosecond range.

## The influence of sulfide surface passivation on the radiative recombination in double quantum wells CdSe/ZnSe with self-assembled quantum dots

*Eremenko Maxim Viktorovich*<sup>1</sup>, Berkovits V.L.<sup>1</sup>, L'vova T.V.<sup>1</sup>, Reznitsky A.N.<sup>1</sup>, Ulin V.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

The effect of surface passivation in an aqueous  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  solution on the temperature dependence of the PL has been studied. It was found, that integral intensity PL at room temperature is increased by 30 times. It is shown, that the quenching of integral intensity PL at high temperature ( $T > 150\text{-}200\text{K}$ ) is determined by ejection of the excitons on the surface states, which are the centers of nonradiative recombination.

## Investigation of quantum efficiency of $\text{A}^3\text{B}^5$ heterostructures after FIB milling

*Mitrofanov Maksim Igorevich*<sup>1,2</sup>, Evtikhiev V.P.<sup>1</sup>, Smirnov A.N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Paper describes  $\text{Ga}^+$  focused ion beam (FIB) etching of  $\text{A}^3\text{B}^5$  based heterostructures in the own designed UHV FIB/SEM system and comparison of influence on the quantum efficiency and crystal perfection in accordance to the different FIB conditions. For investigation of radiation defects influence on the luminescence and crystal properties of  $\text{A}^3\text{B}^5$  heterostructures were etched  $50\times 50$  microns boxes with different depth on the  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  double heterostructure. On the  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  laser hetero-

structure with  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  quantum well were etched trenches with depths above and deeper than quantum well layer. Line of the samples also was fabricated with  $\text{XeF}_2$  gas assisted ion etching. Micro photoluminescence and micro Raman spectra of the samples were obtained. Comparison of experimental results with theory calculations shows promising possibility to use UHV FIB for the fabrication of the lasers and other integrated nanophotonics elements based on  $\text{A}^3\text{B}^5$  semiconductors.

## **Modelling of polar optical phonons spectra in multiple quantum wells and superlattices GaN/AlN**

*Pankin Dmitrii Vasilevich*<sup>1</sup>, Smirnov M.B.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

Polar optical phonons in multiple quantum wells GaN/AlN are studied within the framework of dielectric continuum model (DCM). Attention is focused on dependencies of phonon frequencies on structural parameters (number of layers and their thickness). Knowledge of these dependencies is indispensable for the use of Raman and IR spectroscopy for the sample characterization. The common DCM routine involves analysis of the boundary condition system which is solved by the transfer matrix method. Such approach is rather cumbersome and time-consuming. Arguing to physical sense of the polar phonon modes and analyzing the DCM procedure, the authors put forward a new technique for easy solving the boundary condition equations.

## **Investigation of cascade of the phase transitions in the multiferroic $\text{CuB}_2\text{O}_4$ by polarization spectroscopy**

*Molchanova Anastasiia Dmitrievna*<sup>1</sup>, Boldyrev K.N.<sup>1</sup>, Popova M.N.<sup>1</sup>, Pisarev R.V.

<sup>1</sup>Institute of Spectroscopy RAS

Copper metaborate  $\text{CuB}_2\text{O}_4$  crystallize in space group  $I42d$ ,  $Z=12$ . Copper ions  $\text{Cu}^{2+}$  ( $S=1/2$ ) occupy two different crystallographic positions in the unit cell of this structure. This compound exhibits a unique combination of magnetic, magnetoelectric, linear and nonlinear optical properties. Magnetic subsystems Cu(4b) and Cu(8d) order magnetically at different temperatures, 21 K and  $\sim 8$  K, respectively. Previously we have discovered a splitting of the phase transition at  $\sim 8$  K into two transitions with temperatures  $T_1=8.5\text{K}$  and  $T_2=8.0\text{K}$ . This work is devoted to the new phase transitions of  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . The investigation of the transmission spectra of the sample was carried out in the optical liquid helium flow cryostat with pumping helium vapor that allowed to cool crystal to a temperature down to 1.3 K. Thus, this investigation makes possible to discover the new phase transitions at temperatures  $T_3 = 2.0$  K and  $T_4 = 1.9$  K. Linear dichroism changes its sign at  $T_3 = 2.0$  K and completely disappears at  $T_4 = 1.9$  K as well as at temperatures  $T_1$  and  $T_2$ .

## Far IR spectroscopy of like-huntite samarium chromium borate

*Dobretsova Elena Anatoljevna*<sup>1</sup>, Boldyrev K.N.<sup>1</sup>, Gavrilkin S.Yu.<sup>2</sup>, Mukhin A.A.<sup>3</sup>, Ivanov V.Yu.<sup>3</sup>, Maljtsev V.V.<sup>4</sup>, Leonyuk N.I.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Spectroscopy RAS

<sup>2</sup>The P.N. Lebedev Physical Institute

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute, RAS

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University

In the present work a study of  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$  single crystal was undertaken in the far IR region  $50\text{-}370\text{ cm}^{-1}$ . Spectroscopic data, as well as specific heat and magnetic susceptibility measurements show that  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$  undergoes three phase transitions, at temperatures  $T_1 = 8.0\text{ K}$ ,  $T_2 = 6.7\text{ K}$ , and  $T_3 = 4.3\text{ K}$ . A shift and broadening of phonon lines are observed at temperature decrease. The phonon lines behave like soft modes, which is typical for ferroelectrics. Thus, our studies point to a possible multiferroic nature of  $\text{SmCr}_3(\text{BO}_3)_4$ .

### **The study of encoding and decoding information transfer using the stochastic ultrawideband light flow**

*Glukhov Vladimir*<sup>1</sup>, Kulikov I.<sup>1</sup>, Tolmachev Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

A simple method of the stochastic light flow encoding using the system of thin transparent films was studied and optical correlator based on the Fresnel biprism was used for decoding this pseudo-random ultra wide-band optical signal. Both autocorrelation and cross-correlation functions were measured. The array of mirrors analogous to Michelson's echelon was also considered as an encoder.

### **Selective photosensitive structures Au-AlGaN for the 350 - 370 nm wavelength range**

*Lamkin Ivan Anatolevich*<sup>1</sup>, Tarasov S.A.<sup>1</sup>, Solomonov A.V.<sup>1</sup>, Kurin S. Yu.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Nitride Crystals Ltd

<sup>3</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

Selective Au-AlGaN-based Schottky barrier photosensitive structures operating in different UV ranges have been fabricated. The wide band-gap window effect and the over barrier emission are proposed as methods for control of the photosensitivity spectrum.

### **Optical feedback and control efficiency of high-power laser-thyristors emitting at 905 nm**

*Soboleva Olga Sergeevna*<sup>1</sup>, Podoskin A.A.<sup>1</sup>, Zakharov M.S.<sup>1</sup>, Zolotarev V.V.<sup>1</sup>, Bakhvalov K.V.<sup>1</sup>, Rozhkov A.V.<sup>1</sup>, Veselov D.A.<sup>1</sup>, Sokolova Z.N.<sup>1</sup>, Romanovich D.N.<sup>1</sup>, Pikhin N.A.<sup>1</sup>, Tarasov I.S.<sup>1</sup>, Slipchenko S.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Experimental investigations and analysis of the optical feedback efficiency for high-power pulse semiconductor lasers based on epitaxially integrated thyristor heterostructures have been presented. It has been shown, that the photogeneration rate is a complex function of the injection current and supply voltage. An absorption edge deformation and turning on of the impact ionization is caused by a reverse bias voltage on the collector p-n junction. As a result, we have got the experimental dependencies of photogeneration rate on the injection current and supply voltage.

tion current density and supply voltage. The obtained results are an important implement for the subsequent modeling and research of injection and generation processes in high power laser-thyristors.

## **Charge neutrality and band diagram in the QD lasers with modulation doping**

*Konoplev Sergey Sergeevich*<sup>1</sup>, Savelyev A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

We present a theoretical study of modulation doping of active region in the quantum dot (QD) laser and corresponding issues of QD charge neutrality violation, a band diagram of the laser and charge carriers distribution in the structure. Modulation doping is discussed as a possible technique to control laser output characteristics. It was shown that modulation doping leads to an increase of threshold current of lasing through excited QD optical transition together with power emission from QD ground state.

## **Mode selection control in ring microresonators**

*Levitskii Iaroslav*<sup>1,2,3</sup>, Evtikhiev V.P.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Submicron Heterostructures for Microelectronics Research and Engineering Center of the RAS

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

We present numerical simulations of novel microring resonator geometry, based on subwavelength hollow core defects inside the resonator cavity in order to study its influence on mode structure. Results allowed us to formulate basic approaches for controlling mode structure of ring microresonators.

## **Light-emitting structures based on colloidal quantum dots of cadmium sulfide having a high color rendering index**

*Stepanov Evgeniy Mikhailovich*<sup>1</sup>, Mikhailov I.I.<sup>1</sup>, Tarasov S.A.<sup>1</sup>, Solomonov A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Creation and investigation of structures containing quantum dots, is one of the urgent tasks of modern Photonics. Quantum dots created by colloidal synthesis (CQD's) are highly effective and enable to adjust the emission wavelength by varying the process parameters of synthesis of nanoparticles. The paper shows how by changing the size and concentration of CQD's was achieved the emission spectrum of the structure with a color rendering index greater than 90. When creating a light-emitting structures were used CQD's of cadmium sulfide. As the solvent used was toluene. To create CQD's structures of various sizes were deposited on glass substrate by centrifugation method and annealed in a high vacuum. Wavelength of the main luminescence peaks CQD's were in the range from 380 nm to 480 nm. In order to increase the spectral width of the structure were created whose emission spectrum in

addition to the main peak of the luminescence associated with exciton transitions contained in another wavelength region. This additional maximum on spectra caused by surface states. Methods were used, allowing to increase the intensity of this maximum that approximated the shape of the radiation spectrum to the spectrum of white LEDs based on nitride gallium-indium. Work is underway to create a structure with even higher color rendering index exceeding 95 by presented method.

## **Three-coordinate interferometer for subnanometer-resolved displacement measurements**

*Kazieva Tatiana*<sup>1</sup>, Kuznetsov A.P.<sup>1</sup>, Gubskiy K.L.<sup>1</sup>, Reshetov V.N.<sup>1</sup>, Ponarina M.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MPhI

We present the developed three-coordinate laser heterodyne interferometer that can be integrated in the commercially available industrial scanning probe and electron microscopes. It allows one to ensure traceability of measurements in nanometer range to the primary standard of meter. As outcome, the regular calibration of scanners becomes unnecessary, while the reproducibility and accuracy of the measurements dramatically increases. We offer heterodyne interferometers designed for nanometer-scale displacement measurement traceability to the primary standard of meter for use in scanning probe microscopes, scanning electron microscopes and coordinate measuring machines. Our device guarantees high measurement accuracy (~ 0.1 nm) and high resolution (0.01 nm). Metrological probe microscope equipped with the three-coordinate laser interferometer belongs to Russian national primary special standard unit of length in the measurement of roughness parameters in the range of 1–1000 nm (VNIIMS, Ruia). Three coordinate laser heterodyne interferometer belongs to Russian national primary special standard unit of hardness for Martens scales and scale of nanoindentation (VNIIFTRI, Ruia).

## **Photoelectrical Properties of Hydrogen Sensing Pd-Oxide-InP Schottky Diodes**

*Shutaev Vadim Arkadievich*<sup>1</sup>, Imenkov A.N.<sup>2</sup>, Grebenshchikova E.A.<sup>2</sup>, Yakovlev Yu.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

We investigated electrical and photoelectrical properties of Pd-Oxide-InP Schottky diodes. The studies were conducted both with hydrogen and without hydrogen. Current-voltage characteristics (I-V) were investigated in temperature range 90-306 K. The thermotunnel mechanism of current flow was determined from analysis of variation (I-V) characteristics with temperature as well as the Schottky barrier height. The above Schottky diode and LED with a wavelength of 0.9 μm was used as optocouple in the hydrogen sensor. Response time of the Schottky diode at hydrogen switch-on was 1-2 sec with the recovery time constant equal 10 sec (at short-circuit current regime). In this paper, we demonstrated application of Pd-Oxide-InP Schottky diodes for manufacturing the compact hydrogen sen-



sors with sensitivity threshold as small as 5ppm at room temperature as well as low power consumption.

## **Optical tweezers based on the laboratory microscope**

Chstyakov Dmitry<sup>1</sup>, Losev S. N.<sup>2</sup>, Dudelev V. V.<sup>2</sup>, Soboloeva K.K.<sup>3</sup>,  
Kognovitskaya E.A.<sup>4</sup>, Sokolovskii G.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Ioffe Institute

<sup>3</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>4</sup>D.I. Mendeleyev Institute for Metrology

Utilization of the semiconductor lasers for micromanipulation can significantly reduce the size and cost of the optical tweezers (i.e. devices for optical trapping and manipulation of microscopic objects). In this work, we propose methods of embedding the laser-diode-based optical tweezers in laboratory microscope without changing its construction. Different designs of the optical tweezers are considered. Much attention is devoted to focusing radiation of semiconductor lasers and the ways for overcoming the problems arising from the poor beam quality, typical for the laser diodes. Two models of optical tweezers based on the semiconductor lasers utilizing Gaussian and Bessel beams are practically implemented and integrated with a conventional laboratory microscope.

## **High-temperature lasing in a injection microdisk laser with an active region based on InAs/InGaAs quantum dots**

*Moiseev Eduard Ilmirovich*<sup>1</sup>, Kryzhanovskaya N.V.<sup>1</sup>, Kudashova Yu.V.<sup>1</sup>,  
Zhukov A.E.<sup>1,2</sup>, Maximov M.V.<sup>1,2,3</sup>, Kulagina M.M.<sup>3</sup>, Troshkov S.I.<sup>3</sup>, Zadiranov  
Yu.M.<sup>3</sup>, Lipovskii A.A.<sup>1,2</sup>, Blokhin S.A.<sup>3</sup>, Bobrov M.A.<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>3</sup>Ioffe Institute

Injection microdisks with an active region based on self-assembled InAs quantum dots-in-a-well structure were fabricated and studied at room and high temperature. Reducing the diameter of the laser resulted in a decrease in the threshold current. The minimal threshold current is 1.23 mA. Lasing was observed up to 100 °C with diameter 31 um. The quality factor was more than 45 000.

## **Printable multibit resistive memory based on polymer admixtures**

*Kotova Maria*<sup>1</sup>, Dronov M.A.<sup>1</sup>, Dubinina T.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

One of the directions of the organic electronics development is the development of memory devices. A possibility to construct new memory devices from soluble organic mate-

rials by different printing technologies demonstrates high potential of the resistive memory (ReRAM). The system is able to switch between at least two states "ON" and "OFF" with different resistances. Resistive switchings (RS) between these two states occur under application of electric field of a required magnitude. RS can be reversible and repeatable. We investigated RS in polymers with and without admixture of metal micro particles and photosensitive dyes on hard substrates in macro and micro spatial scales. For fully inject printing technologies, we studied the possibility of producing printable ReRAM from soluble polymer materials and admixtures on flexible substrates. We found that the substrate material does not play a major role for the observation of RS. Therefore the RS were observed for all kinds of materials studied on polymer substrates. Optimisation of the sample and the contact area geometries provided the critical electric field needed for switching to the "ON" state less than 10 kV/cm. Addition of photoactive particles allowed us to reduce the critical electric field by external laser radiation. We demonstrated a possibility for producing ink-jet printable ReRAM memory devices.

## **The research of the UV LEDs interfaces structure properties influencing on the emission output coefficient**

*Evseenkov Anton<sup>1</sup>, Tarasov S.A.<sup>1</sup>, Solomonov A.V.<sup>1</sup>, Kurin S.Yu.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Nitride Crystals Ltd

The work was carried out an experimental study of the optical and electrical properties of ultraviolet light-emitting diodes based on heterostructures GaN/AlGaIn. Particular attention is paid to the study of electroluminescence spectra at different forward currents and temperatures, determination of optical power and radiation efficiency. Also, in order to optimize the parameters of the emitters it developed a method of modeling the process the light output of the LED structures corpuscular Monte Carlo method, which allowed not only to predict the optical properties of the investigated structures and describe in detail the processes that lead to the loss of output radiation into the environment, but also to make recommendations to improve the efficiency of radiation of LED heterostructures. In particular, we show that the best aspect ratio topography texturing for this material system is "1".

## **The research of the temperature characteristics of the ultraviolet light-emitting diodes based on nitride solid solutions**

*Evseenkov Anton<sup>1</sup>, Tarasov S.A.<sup>1</sup>, Solomonov A.V.<sup>1</sup>, Kurin S.Yu.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Nitride Crystals Ltd

Samples of various configurations of the active region - elemental composition and thickness. The best results on the external quantum efficiency and power of the samples showed an active region of 150 nm. The effect of ambient temperature on the efficiency UV LED. The effect is compounded at high densities electricity- radiation efficiency may fall from 1.5 to 0.45 at 40 mA and 150 mA, respectively. It is shown that the structure of

the luminescence efficiency by paing high currents are interrelated with the temperature of the active region structures. It is found that this temperature can reach values greater than 250 ° C. The features of the heat sink of the structures UV LED defined thermal resistance and recommendations on improving the thermal performance UFSD.

## **Study of stre in AlN bufer layers grown by plasma-aisted molecular beam epitaxy on different substrates**

*Zolotukhin Dmitry Sergeevich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

The paper describes generation and relaxation of intrinsic stre in the AlN buffer layers grown by plasma-aisted molecular-beam epitaxy on c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 6H-SiC substrates with different AlN nucleation layers and ultra-thin GaN insertions. These procees were controlled in situ by home-made optical system for curvature measurements. A great difference in a stre sign and behavior were revealed for AlN films grown over the substrates with the different lattice mismatch. The slightly mismatched substrates (6H-SiC) determined the constant value of compreive stre in the AlN films whereas their growth on the highly mismatched ones (c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) led to more complex stre behavior. As a result, atomically smooth AlN buffer layers on the 6H-SiC (c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) substrates with thicknees of 0.6(2)-μm demonstrated a reasonable structural quality with the c-type and a-type threading dislocation density of  $3.8 \times 10^7$  ( $9 \times 10^8$ ) cm<sup>-2</sup> and  $7 \times 10^9$  ( $6 \times 10^9$ ) cm<sup>-2</sup>, respectively.

## **A shape of the equilibrium surface of the meniscus in a cylindrical capillary with the size dependence of the surface tension**

*Sokurov Aslan Arturovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC of RAS

In this paper are obtained the systems of nonlinear differential equations of first order, describing the meniscus in the capillary tubes with the size dependence of the surface tension. It is considered, that the surface tension is a function of curvature of a surface. The resulting equations are solved numerically and have analyzed their solutions.

## **Electron energy distribution of field emiion of SiC**

*Trofimov Vasilij Valerevich*<sup>1</sup>, Nikiforov K.A.<sup>1</sup>, Egorov N.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Field emiion electron energy distribution of SiC is studied by the retarding potential method. Comparison with emiion properties of graphene-like structures are presented. Research methodology using retarding-potential is discued. Results of the study are applicable to problem of the field emiion stabilization, because graphene-like structures may arise on emiion surface during silicon sublimation due to ohmic heating by the field emiion current.

## **NMR study of the topological insulator Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>**

*Antonenko Anastasiya Olegovna*<sup>1</sup>, Charnaya E.V.<sup>1</sup>, Podorozhkin D.Yu.<sup>1</sup>, Mukhamadiarov R.I.<sup>1</sup>, Marchenkov V.V.<sup>2,3</sup>, Naumov S.V.<sup>2</sup>, Huang J.C.A.<sup>4</sup>, Weber H.W.<sup>5</sup>, Bugaev A.S.<sup>4,6</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS

<sup>3</sup>Ural Federal University

<sup>4</sup>National Cheng Kung University

<sup>5</sup>Atominstitut, Vienna University of Technology, Austria

<sup>6</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

NMR measurements of a high quality bismuth telluride single crystal, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, were carried out in the large temperature range from 10 to 293 K using a Bruker Avance 400 spectrometer. To detect NMR signals from the <sup>125</sup>Te isotope, the spin echo method was

applied. It has been found that the NMR spectrum consists of two lines. The line with a positive shift of the resonance frequency corresponds to the bulk of the sample, and the line with a negative shift is interpreted as a signal from the surface of the single crystal. The temperature and orientation dependences of the position of the NMR line from nuclei in the inner part of the sample were studied. It was shown that the line position is mainly governed by the Knight shift caused by the interaction with mobile charge carriers. The thermally activated character of the Knight shift which agrees with intrinsic conductivity was found and the energy parameters of the thermally activated processes were calculated.

## **Determination of surface free energy of superfine raw components in composite materials**

*Drozdyuk Tatyana<sup>1</sup>, Morozova M.<sup>1</sup>, Frolova M.<sup>1</sup>, Aizenshtadt A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University

Structural and energetic approaches are widely used in modern materials science to determine a wide range of physical and chemical properties of minerals and rocks, used as a source of raw materials in the production of materials and products. Energy approaches are used in the quantitative description of the physical properties. They make it possible to select energy parameters which provide the most accurate estimation according to a particular property. Currently, a new scientific direction was formed – geonik. The aim of geonik is to develop the principles of management of development sites of the inorganic world. The value of this research direction for the construction industry, is the energy criterion for ranking the raw material used to produce materials. As this criterion can be used to determine the free internal energy of rock-forming minerals. In studies were shown, that for rocks in a highly dispersed state (particle size of 100 - 500 nm) thermodynamic approach allows to select the basic characteristic of the energy state of matter - free surface energy (critical surface tension  $\sigma_k$ ), which is associated with the genesis of breed. Experimental determination of this parameter is based on measuring of the contact angle of the surface of the solid phase, and calculated by methods: Zisman method or OWRK (Owens, Wendt, Rebel and Kjelble) method. The first method shows good results in determining  $\sigma_k$  of homogeneous and nonporous structures which are characterized by stable equilibrium state of a liquid droplet at the boundary of the three phases (solid - solution - air). Method OWRK (Owens, Wendt, Rebel and Kjelble) considering the surface tension as a complex value. The energy of a solid surface includes two components: dispersive and polar. The dispersion component is mainly caused by Van der Waals forces, the polar component - strong (chemical) interactions and hydrogen bonds. In our view, the use for the calculation of the free surface energy of samples with an active surface is most preferred, because it gives an opportunity to get information about the mechanism of the process of transformational reactions on the surface of highly dispersed systems. The surface tension ( $\sigma_s$ ) of several highly dispersed systems of nanocomposites and their dispersion ( $\sigma^D$ ) and polarization ( $\sigma^P$ ) components were calculated. Data shows that the interactions between components caused by physical forces of attraction in highly dispersed system on the basis of wood and basalt. Therefore at the process of creation of a strong bond between the wood matrix and mineral-filled pore structure of the wood should be considered as the main factor electrostatic barrier, due to the value of the surface charge of the particles. When creating a nanostructured mineral binder based on

highly dispersed material rocks as the main factor is the chemical interaction of components.

## **CLSM investigation of paper surface**

*Soboleva Ekaterina*<sup>1</sup>, Ovasko S.-S.<sup>1</sup>, Backfolk K.<sup>1</sup>, Lyytikainen J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lappeenranta University of Technology

People use paper for many thousands of years for many purposes: information storing and its transmitting, packaging material, material for decorations etc. Currently, many institutions are engaged in studying the properties of paper and coatings that will allow to use paper in many food industries as packaging. One of the study methods is a confocal laser scanning microscopy allows us to study materials without damaging them and watching process in real time. In this paper we studied a number of samples with different types of coatings and using different fluorescent dyes (such as Rhodamine B, Sudan II, etc.). The objective of this study was to investigate the structure and properties of the paper and paper coating. In order to study the depth of penetration of Fluorescent through the coating into the paper Z-stack was used as method of research. It allows to make layered snaps into the sample. This allows to study not only the surface of the coating and paper, but also to consider in more detail the boundary between them. Also, the study used a cross-section to determine more accurately the thickness of the coating. It was found that the coating thickness meets the stated data from laboratories, as well as identified the main types of coatings that best meet the requirements of food industry.

## **Spin relaxation length in Palladium thin films**

*Pavlov Alexandr Valerievich*<sup>1</sup>, Ustinov A.B.<sup>1</sup>, Petrov V.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

This work is devoted to the determination of the mean free path of electrons with respect to the spin relaxation. For that we used spin polarized electron spectroscopy. Thin palladium films of different thicknesses were deposited on a ferromagnetic substrate. Spin relaxation length map was attained by measuring spin polarization of electrons that come through palladium film. Preliminary results indicate unique spin properties of palladium films and characterize them as suitable object to use in field of spintronics.

## **The accumulation of charge on cleaved GaAs heterostructures in the p-n junction**

*Mikhaylov Alexander Olegovich*<sup>1</sup>, Alekseev P.A.<sup>2</sup>, Sharov V.A.<sup>1</sup>, Dunaevski M.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

We examined the distribution of the voltage drop in the volume of the structure GaAs. Also we found the position of the p-n junction.

## Detecting of semiconductor laser radiation using a scanning probe microscope

*Sharov Vladislav Andreevich*<sup>1,2</sup>, Alekseev P.A.<sup>2</sup>, Dunaevski M.S.<sup>2</sup>, Mikhailov A.O.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Toffe Institute

The output power of semiconductor lasers in the visible and near-infrared light is usually measured with a photodetector. If the wavelength of the radiation is bigger, efficiency of this method is reduced. In this case, the photodetector can be replaced by a heat detector placed in the near field of the laser. Recently it has been shown that a scanning probe microscope (SPM) can be used as such detector.

When AFM cantilever (probe) is heated by laser radiation it changes its resonance frequency. Fixing its variation we can accurately calculate the power of the laser. In this study we investigated the semiconductor laser with a wavelength  $\lambda$  1.07 and 2.1 microns. The measurements were made using a semi-contact technique for several types of probes manufactured by Bruker: Si probes ppp-fmr (with an upper Au coating), ppp-fmau (with upper and bottom Au coating) and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  probe Orc 8 (with a top Al-coating). When scanning in the XY phase image was discovered a series of fringes, which is due to the slope  $\theta$  of the probe relative to the plane of the laser mirrors. It is found that the period of the interference fringes  $\Delta$  varies with the angle of the cantilever according to the formula  $\lambda/2 = \Delta \times \text{tg}\theta$ . This expression allows you to accurately determine the wavelength of the laser radiation with the SPM. Using different probes revealed that the most sensitive probe is  $\text{Si}_3\text{N}_4$  probe Orc 8,

Thus, the possibility of detection of the near and mid-infrared semiconductor laser radiation and determining the wavelength of the radiation SPM method was shown. The most sensitive probe for the detection of infrared radiation was determined.

# DEVICES AND MATERIALS OF THE THZ AND MICROWAVE RANGES

---

## Synthesis of Cu - Diamond/MoC composites by hot isostatic preing

*Yusuf Alexey*<sup>1</sup>, Galashov E.N.<sup>1</sup>, Mandrik E.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University

A composite material with high thermal conductivity is obtained by hot isostatic preing of copper and diamonds (with molybdenum carbide coated), which have a bimodal size distribution. Coefficient of thermal conductivity of copper diamond composite materials was measured and is  $700 - 750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . The coefficient of thermal expansion CTE was measured and is  $6.5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . The obtained copper diamond composite materials are promising objects for use in THz and microwave devices.

## Magnetic field simulation of wiggler on LUCX accelerator facility using Radia

*Sutygina Yana Nikolaevna*<sup>1</sup>, Harisova A.E.<sup>1</sup>, Shkitov D.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The National Research Tomsk Polytechnic University

A flat wiggler consisting of NdFeB permanent magnets is planned to install on a compact linear electron accelerator LUCX (KEK) in Japan. After installing the wiggler on LUCX, the experiments on the generation of undulator radiation (UR) in the terahertz wavelength range is planned. To perform the detailed calculations and optimization of UR characteristics, it is necessary to know the parameters of the magnetic field generated in the wiggler. Earlier, we were made the magnetic field calculations along the electron beam trajectory (central axis of the wiggler) for several values of the gap width between the magnet poles. The simulation was performed using three-dimensional magnetostatic code Radia. Comparing the measured amplitude of the magnetic field 0.432 T with the value obtained in the simulation 0.327 T along the center axis for 30 mm gap width has shown that for more accurate calculations it is necessary to segment the magnet blocks in the model. In this paper a revised and extended simulation results of wiggler magnetic field over the entire volume between the poles are presented. The obtained in the Radia simulation magnetic field is compared with the field calculated by another code which is based on the finite element method.



## **Development of semiconductor metamorphic buffer for the manufacture of microwave transistors**

*Lazarenko Aleksandra Anatol'evna*<sup>1</sup>, Sobolev M.S.<sup>1</sup>, Pirogov E.V.<sup>1</sup>, Nikitina E.V.<sup>1</sup>, Egorov A.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>2</sup>Toffe Institute

Different designs of metamorphic buffer layers grown by molecular beam epitaxy on GaAs are compared. Studies were carried out by scanning electron microscopy, atomic force microscopy and by Hall measurements. The optimal design contributed to change the lattice constant of the growing layer from GaAs substrate to an active layer with a high content of indium In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As with a small amount of dislocations and low roughness.

## **Phase noise management of spin-wave delay-line oscillators**

*Drozдовskii Andrey*<sup>1</sup>, Ustinov A.B.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The results of investigation tunable microwave oscillator based on spin-wave delay line are presented. Tuning the operating frequency of the generator 3.5 GHz and phase noise signal about 106 dBc/Hz at 10 kHz offset are shown.

## **The microstrip diplexer based on two-dimensional photonic crystal**

*Khodenkov Sergey Aleksandrovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University

The microwave diplexer based on two-dimensional photonic crystal is developed. The microstrip construction has high frequency selective properties because of the quarter wave resonators located in two ranks which are analogs of discontinuity into structure of photonic crystals.

## **Investigation of the microstrip filters with wide stop band**

*Khodenkov Sergey Aleksandrovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University

Two microstrip filters with irregular resonators are considered. Microwave constructions have a high-frequency stop band not less than  $3.8f_0$ . Using of the oncoming directed resonators allows to improve their frequency selective properties.

## **New scheme of microwave – excitation signal for caesium atomic clock**

*Petrov Aleksandr Anatolevich*<sup>1</sup>, Davydov V.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

New scheme of microwave – excitation signal for the caesium atomic clock is based on method of direct digital synthesis. The theoretical calculations and experimental research showed decrease step frequency tuning by several orders and improvement the spectral characteristics of the output signal of frequency synthesizer. A range of generated output frequencies is expanded, and the poibility of detuning the frequency of the neighboring resonance of spectral line that makes it poible to adjust the C-field in quantum frequency standard is implemented. Experimental research of metrological characteristics of the quantum frequency standard on atoms of caesium - 133 with new design scheme of the microwave – excitation signal showed improvement in daily frequency stability on 20%.

## **Investigation of wave procees in multiferroic structures based on a slot-line with width modulation**

*Nikitin Aleksei Alexandrovich*<sup>1</sup>, Vitko V.V.<sup>1</sup>, Nikitin A.A.<sup>1</sup>, Ustinov A.B.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The microwave properties of thin-film ferrite-ferroelectric magnonic crystals based on a slot-line with width modulation were investigated for the first time. Dispersion characteristics of spin-electromagnetic waves were obtained for ferrite-ferroelectric periodical structures. It was shown that there are band gaps in the transmiion coefficient in this case. The location of these gaps can be changed by applying the external electric field. A ferrite film of magnonic crystal leads not only to magnetic tuning but also to eentially change of transmiion function. Thus number of band gaps eentially increase.

## **Multifactor response of the dispersed soft matter precursors under microwave-induced self-organization**

*Gradov Oleg*<sup>1</sup>, Gradova M.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of energy problems of chemical physics

<sup>2</sup>N.N. Semenov Institute of Chemical Physics

In this report we consider a multifactor nature of the self-organization procees of diipative and membrane-mimetic soft matter microstructures from the iron-containing colloidal precursors with different particle size under microwave irradiation. The resulting structures' morphology determined by the dehydration and aggregation procees under the microwave field, as well as their phase state, chemical composition and the degree of crystallinity, are shown to be dependent on the irradiation time, the microwave field power and the particle size of the precursor. The structure formation in this case appeared to be a typical reaction-diffusion proce with the emergent properties.

## **Microwave dynamical chaos of hybrid spin-electromagnetic waves in multiferroic active rings**

*Kondrashov Alexandr<sup>1</sup>, Ustinov A.B.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

This work reports observation of the microwave dynamical chaos of hybrid spin-electromagnetic waves in active rings based on yttrium iron garnet (YIG) – barium strontium titanate (BST) layered structure. The ring gain coefficient increase leads to transition to microwave dynamical chaos excitation through consequent onset of monochromatic and periodic signal excitation regimes. Increase of electric bias field applied to BST-layer leads to decrease of dynamical chaos excitation threshold gain coefficient level. In chaotic regime increase of electric bias field allows to accurately increase fractal dimension of dynamical chaos.

## **The microwave filter based on the ring resonator**

*Khodenkov Sergey Aleksandrovich<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University

The microstrip band-pass filter based on the multimode resonator with conductors having form of a double rectangular ring is developed. The device has diminutive and high frequency selective properties.

## **Spin-wave matched filter on active ring**

*Martynov Michail<sup>1</sup>, Nikitin A.A., Kalinikos B.A.<sup>1</sup>, Ustinov A.B.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Matched spin-wave filter on active ring was investigated. Opportunity of filtering of the square-wave was shown. The filter was modeled in three cases. An ideal case of filtering showed that signal could be obtain at output of the filter with same ratios of amplitudes, but with a low in shape factor. In a case of mixture signal and noise filtering output signal contained spurious harmonic modulation, that were located near the harmonics of the effective signal.

## **Measurement cell for investigation of microwave parameters of delta-doped diamond samples**

*Vitko Vitalii<sup>1</sup>, Kondrashov A.V.<sup>1</sup>, Nikitin A.A.<sup>1</sup>, Belavsky P.Yu.<sup>1</sup>, Ustinov A.B.<sup>1</sup>, Butler J.E.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics, RAS

A method of microwave parameter measurement of delta-doped diamond samples over a broad frequency range. The measurement method is based on the algorithm of Ni-

Devices and materials of the THz and microwave ranges

cholson Ro. The simulation of S-parameters of the measuring cell based on symmetric stripline is carried out.

## **Investigation of planar ferroelectric capacitors based on ferrite substrates for the dual-tunable MW filter**

*Vitko Vitalii*<sup>1</sup>, Belavsky P.Yu.<sup>1</sup>, Mylnikov I.L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Characteristics of ferroelectric films deposited on ferrite substrates by the RF magnetron sputtering are investigated. Planar ferroelectric capacitors are formed for his aim. As a result investigated ferroelectric films can be used for the dual-tunable MW filter.

### Synthesis and research GaBO<sub>3</sub>:Ni single crystals

*Skutkyavichute Kristina Rimantasovna*<sup>1</sup>, Mogilenev U.A.<sup>1</sup>, Seleznyova K.A.<sup>1</sup>,  
Strugatsky M.B.<sup>1</sup>, Yagupov S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University

It is known that Ni-doped iron borate single crystals FeBO<sub>3</sub>:Ni poe some interesting effects such as photomagnetic memory and dynamic instability of the domain structure which caused by presence of a small amount of nickel ions. The nature of these effects is still in question. In order to understand the role of Ni ions one can try to use the EPR technique. But in this case it is necessary to replace the magnetic matrix formed by iron ions, with diamagnetic one. For this purpose we have synthesized GaBO<sub>3</sub>:Ni single crystals by solution in the melt technique; the exact contents of nickel ions, 0.04 - 0.12 %, have been determined by X-ray fluorescence analysis. This range corresponds to the nickel ions concentration, in which the mentioned effects are observed in FeBO<sub>3</sub>: Ni crystals.

### Effect of replacement of iron by the elements of group IV (Ge, Sn, Pb) in the structure , electrical and magnetic properties of superconducting iron chalcogenides

*Rusakov Vsevolod Aleksandrovich*<sup>1</sup>, Volkov M.P.<sup>1</sup>, Melekh B.A-T.<sup>1</sup>, Kartenko N.F.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

The superconducting iron chalcogenides Fe(Se<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub>)<sub>y</sub> - are promising for use as a material for the superconducting wires and helium temperatures cables. The effects of the iron atom substitution by the IV group elements on the structure, phase composition, electric and magnetic properties for the Fe in Fe(Se<sub>0.2</sub>Te<sub>0.8</sub>)<sub>0.82</sub> are studied. The superconducting properties appear to improve markedly with the Ge and Pb doping.

## **Research vacancy spin centers in the orthorhombic silicon carbide ENDOR and ODMR techniques**

*Anisimov Andrey Nikolaevich*, Baranov P.G.<sup>1</sup>, Babunts R.A.<sup>1</sup>, Badalyan A.G.<sup>1</sup>, Ilyin I.V.<sup>1</sup>, Romanov N.G.<sup>1</sup>, Muzafarova M.V.<sup>1</sup>, Soltamov V.A.<sup>1</sup>, Tolmachev D.O.<sup>1</sup>, Yavkin B.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

<sup>2</sup>Kazan (Volga region) Federal University

We discovered uniaxial oriented centers in silicon carbide having unusual performance. Here we demonstrate that the family of silicon-vacancy related centers with  $S = 3/2$  in rhombic 15R-SiC crystalline matrix has unique characteristics such as optical spin alignment existing at temperatures up to 250°C. Thus the concept of optically addressable silicon vacancy related centers with half integer ground spin state is extended to the wide class of SiC rhombic polytypes. The structure of these centers, which is a fundamental problem for quantum applications, has been established using high frequency ENDOR. It has been shown that a family of silicon-vacancy related centers is a negatively charged silicon vacancy in the paramagnetic state with the spin  $S = 3/2$ , VSi perturbed by neutral carbon vacancy in non-paramagnetic state, VC the silicon vacancy and located adjacently to the silicon vacancy on the c crystal axis.

## **Second-harmonic generation on the edges in nanoscale layers of transition metal dichalcogenides**

*Shestakova Anastasiya Pavlovna*<sup>1</sup>, Lavrov S.D.<sup>1</sup>, Mishina E.D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation

This work presents the results of the optical properties study of nanoscale thick single crystals transition metal dichalcogenides, which were obtained by two methods. In the microscopic images obtained at the wavelength of the second harmonic (400 nm) the edge effects detected, which consists in the strengthening or weakening of the second harmonic signal intensity. The edge effects occurrence associated with either an increased concentration of molecules or with electrically induced second harmonic due to band bending at the edges of the individual layers of crystals.

## **Peak of ultrasonic absorption in ZnSe:Cr in weak magnetic fields**

*Baryshnikov Kirill Alexandrovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

Peak of ultrasonic absorption in ZnSe:Cr in weak magnetic fields ( $< 2$  T) at low temperatures ( $< 4$  K) is theoretically studied. Energy spectrum and wave functions of the ground state of the impurity center Cr surrounded by Se atoms are calculated with the ac-

count of the strong Jahn-Teller effect and the spin-orbit interaction of electrons in the d-shell of Cr ion. A phenomenological model of the effect is proposed. There are two subsystems with equal relaxation times in zero magnetic field, which become different after magnetic field increases.

## **Mass-spectrometer investigation of substances at the small energy ionising electrons**

*Romanov Pavel Alexandrovich*<sup>1</sup>, Fedichkin I.L.<sup>1</sup>, Popov E.O.<sup>1,2</sup>, Filippov S.V.<sup>1,2</sup>, Kolosko A.G.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>3</sup>The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

Researches of moisture content definition and concentration of active radicals from temperature in a IC cavity are conducted at small energy (15-30 eV) ionizing electrons of ma-reflectron. A number of microelectronics and space industry products made at various technological procees are analyzed.

### **Photocleavage of water into hydrogen by using thioxanthene dyes**

*Glukhova Yana Sergeeva*<sup>1</sup>, *Ponyaev A.I.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State Technological Institute (technical university)

The results of spectral and kinetic studies of new thioxanthene anionic dyes and kinetics of photocleavage of water into hydrogen in a homogeneous two-component photocatalytic system has been performed. It is shown that replacing the oxygen atom in xanthene moiety by a sulfur atom increases the quantum yield of triplet and photohydrogen. The data obtained allowed to construct a two-component photocatalytic system cleavage of water based on the tetrabromthiofluoresceine that effectively worked hundreds of hours to the initial quantum efficiency of 15%.

### **Physical and technical aspects of the effective application of ferroelectrics to increase the power density and energy density of alternative energy devices**

*Zubtsov Vladimir Ivanovith*<sup>1</sup>, *Zubtsova E.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Polotsk State University

The article discues a plant for the production of electrical energy developed on the basis of segnetopezoaktive ceramics. The use of an electrochemical generator in this setup allows to increase considerably the conversion efficiency of mechanical energy to electricity. The mechanical energy was obtained by easily realizable manner. The consumption of electric energy of 1 J when using mechanical energy, gives the opportunity to get 3-5 J of electrical energy as the output of power plants.



## **Investigation of electrocaloric effect in ceramic ferroelectrics**

*Belyavskiy Pavel Yur`evich*<sup>1,2</sup>, Eskov A.V.<sup>2</sup>, Anokhin A.S.<sup>2</sup>, Pakhomov O.V.<sup>2</sup>,  
Semenov A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

<sup>2</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,  
Mechanics and Optics

In the report are presented results of the study of electrocaloric effect in a ceramic capacitors based on BST and PMN-PT ferroelectric samples. The value of the observed effect is more than 0.2K at electric field 20 kV/cm near the phase transition.

## **Photoelectric and photomagnetic response of indium tin oxide films**

*Plyastsov Semyon Alekseevich*<sup>1</sup>, Meshkovskiy I.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,  
Mechanics and Optics

The research of photoelectric and photomagnetic response of indium tin oxide (ITO) films was conducted. The voltage up to 18V was observed at energy pulse energy 148 mJ. Electric response at different load resistors values was measured. Generated electric current was measured. For the first time the magnetic filed oscillations were observed. It is proposed that high photon concentration of laser pulse could cause the settlement of singlet and triplet states in conductivity band of ITO. Circulating long living excited charge carriers could cause the observed magnetic field. The behavior of excited charge carries resembles the formation of Benard cells in liquids.

## **Additional contribution to the thermopower in Cr-Si nanocrystalline films**

*Novikov Sergey*<sup>1</sup>, Burkov A.T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

We investigated the transport properties of thin amorphous films of  $\text{Cr}_{1-x}\text{Si}_x$ , where  $x = 0.65, 0.67, 0.72, 0.85$ , obtained by magnetron sputtering on an unheated  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  substrate. The value of additional contribution to the thermopower due to nanoristallization for various compositions was determine. The Nordheim-Gorter relation and data on resistance and thermopower during isothermal annealing were used. It was found the additional contribution to the thermopower in the nanocrystalline state depends on the film composition. The maximum contribution has the films of stoichiometric composition.

## **Effect of surface chemical nitridation on characteristics of GaAs photodiodes**

*Kontrosh Evgeny Vladimirovich*<sup>1</sup>, Lebedeva N.M.<sup>1</sup>, Kalinovsky V.S.<sup>1</sup>, Soldatenkov F.Y.<sup>1</sup>, Ulin V.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

In the work, investigated were characteristics of GaAs photodiodes before and after chemical nitridation in hydrazine sulphide solutions ensuring substitution of surface As atoms for N atoms with formation of GaN monolayer. The obtained monolayer prevents GaAs oxidation in air and conserves improved characteristics of devices during long time (longer than a year).

## PHYSICS OF QUANTUM STRUCTURES

---

### Angular dependence of quantum oscillations of magnetoresistance in strongly anisotropic quasi-two-dimensional metals

*Mogilyuk Taras Igorevich*<sup>1</sup>, Grigoriev P.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kurchatov Institute

<sup>2</sup>L.D. Landau Institute for Theoretical Physics of RAS

In quasi-two-dimensional strongly anisotropic layered metals in the mode of a strong magnetic field, the distance between Landau levels  $\hbar\omega_c$  greater interlayer hopping integral  $t_z$  and width of the Landau levels  $G0$ , deviations from the standard theory of the magnetoresistance. Recently, the author has shown [1] that in this limit the amplitude of the angular oscillations of the monotonous magnetoresistance depends on the form of the Landau levels (i.e., the density of electron states at each Landau level, which in this limit is not Lorentz [2] and is determined by the type of scattering and the ratio parameters  $\hbar\omega_c$ ,  $t_z$  and  $G0$ ). In this paper we study the angular dependence of the quantum oscillations of the magnetoresistance in the limit  $\hbar\omega_c \gg t_z$ ,  $G0$ . According to the standard theory of quantum oscillations [3] the angular dependence of the amplitude of the quantum oscillations give only so-called spin zero, that arise when contributions to the quantum oscillations of the different components of the spin are opposite. However, the quasi metals strong angular oscillations of the monotonous magnetoresistance (see *Eg*, [4] and the review [5]) can also lead to deviations in the angular dependence of the quantum oscillations. In our work theoretically it is shown that these deviations do occur and are large enough. Also, analytical formulas, including both angular and quantum oscillations of the magnetoresistance.

### Study of negative circular polarization dynamics of InP/InGaP quantum dots luminescence in transverse magnetic field

*Nekrasov Sergei Vasilievich*<sup>1</sup>, Kusraev U.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Toffe Institute

Dynamics of InP/InGaP quantum dots luminescence negative circular polarization in transverse magnetic field was studied. Absence of polarization oscillations in time was observed. Three possible scenarios of this phenomena realization were proposed: (i) resident electron spin orientation accumulation during number of laser pulses; (ii) spread of the heavy holes g-factor over an ensemble of quantum dots; (iii) spread of the nuclear field

acting on electrons over an ensemble of dots. First scenario was proven to be unsatisfactory, others need further research.

## Measurements of spin-wave stiffness in helimagnets by small-angle neutron scattering

*Sukhanov Aleksandr Sergeevich*<sup>1</sup>, Grigoriev S.V.<sup>1</sup>, Altynbaev E.V.<sup>1</sup>, Siegfried S.-A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

<sup>2</sup>Helmholtz Zentrum Geesthacht, Germany

In present work technique to study the spin wave dynamics of the Dzyaloshinskii-Moryia helimagnets by polarized small-angle neutron scattering is developed. The technique is used for the MnSi compound in the field range above the critical magnetic field, needed to transform the helix into the field-induced ferromagnet. Using the dispersion relation for spin-waves in this case we show that the small-angle neutron scattering is limited within the ring with the center at Bragg peaks and the certain radius. This radius (cut-off angle) has relation to value of spin-wave stiffness. Moreover, this scattering depends on the neutron polarization showing the one-handed (helimagnon) nature of the spin waves in Dzyaloshinskii-Moryia helimagnets even in ferromagnetic phase. We find the temperature dependence of the spin-wave stiffness for MnSi. We discuss the analogy and differences of this technique to one used previously for conventional ferromagnets.

## Valley splitting in lead selenide nanowires

*Avdeev Ivan Dmitrievich*<sup>1,2</sup>, Nestoklon M.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

We present the tight binding calculations of the lead selenide nanowires. PbSe is widely used semiconductor with direct band gap at L point in Brillouin zone. In a bulk crystal there are four equivalent L valleys, so the ground state is fourfold degenerated. In the nanostructures degeneracy may be lifted by mass anisotropy and the surface-induced valley splitting. Valley splitting in lead selenide nano structures is very important to understand their optical properties.

We introduce the tight-binding calculations of energy spectra of quantum confined states as a function of nanowire radius, the dispersion in full Brillouin zone, and the radial part of local electronic state density, which helps us to recognise valley splitting in the spectra. Also, we compare our results to KP perturbation theory predictions. We show that the value of the valley splitting is comparable with the distance between two different size-confined levels and that it strongly depends on the arrangement of the atoms in the wire.

## Microwave radiation absorption and Shubnikov-de Haas oscillations in InAs/GaSb/AlSb composite quantum wells based on the broken-gap type II heterojunction

*Kochman Igor Vladimirovich*<sup>1</sup>, Veinger A.I.<sup>1</sup>, Mikhailova M.P.<sup>1</sup>, Semenikhin P.V.<sup>1</sup>, Kalinina K.V.<sup>1</sup>, Pangrac J.<sup>2</sup>, Hospodkova A.<sup>2</sup>, Hulicius E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Institute of Physics AS CR, Prague, Czech Republic

The absorption of microwave radiation and Shubnikov-de Haas oscillations in InAs/GaSb/AlSb composite quantum wells grown by MOVPE on the GaSb substrate are studied by electron spin resonance spectroscopy in the 0 – 14 kOe magnetic field range and in the 2.7 – 20 K temperature range. The temperature and angular dependences of the oscillations amplitude of the microwave radiation derivative are investigated. The 2D electron concentrations in quantum well and cyclotron effective masses are determined.

## Electron-Electron Interactions In The Highly Doped Heterojunctions

*Safoshkin Aleksei Sergeevich*<sup>1</sup>, Dubois A.B.<sup>1</sup>, Bukhenskii K.V.<sup>1</sup>, Kucheryavyy S.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Radio Engineering University

<sup>2</sup>Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering

Electron-electron interactions in a single highly doped heterojunction are considered taking into account both intra- and intersubband transitions. Expressions are derived for the time of electron-electron interaction, matrix elements of the full screening potential and dynamic dielectric function in a 2D electron system with the fine structure of the energy spectrum, and for the electron density spatial distribution.

## Electroreflectance of periodic heterostructures with triple InAs/GaAs quantum wells

*Bolshakov Andrey Sergeevich*<sup>1</sup>, Chaldyshev V.V.<sup>1</sup>, Babichev A.V.<sup>1,2</sup>, Kudryashov D.A.<sup>2</sup>, Gudovskikh A.S.<sup>2,3</sup>, Morozov I.A.<sup>2</sup>, Sobolev M.S.<sup>2</sup>, Nikitina E.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Academic University of the RAS

<sup>3</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

A heterostructure containing a periodic system of triple closely-arranged ultrathin InAs/GaAs quantum wells has been investigated by means of the reflectance and electroreflectance spectroscopy. Quantum well exciton level splitting has been experimentally studied and numerically modelled. An effect of Bragg interference on the magnitude of the exciton peaks is clearly seen.

## **Resonant electronic excitation energy transfer by Dexter mechanism in the quantum dot system**

*Samosvat Dmitriy Mikhailovich*<sup>1</sup>, Chikalova-Luzina O.P.<sup>1</sup>, Vyatkin V.M.<sup>2</sup>, Zegrya G.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

In the present work the energy transfer between quantum dots by the exchange (Dexter) mechanism is analyzed. The interdot Coulomb interaction is taken into consideration. It is assumed that the quantum dot-donor and the quantum dot-acceptor are made from the same compound  $A^3B^5$  and placed in the matrix of other material creating potential barriers for electron and holes. Using three-band Kane model, which the most adequate describes a spectrum of semiconductors  $A^3B^5$ , the dependences of the energy transfer rate on the distance between the quantum dot centers and of the quantum dot parameters are found. Numerical calculations show that the rate of the energy transfer by Dexter mechanism is comparable to the rate of the energy transfer by electrostatic mechanism at the distances approaching to the contact ones.

## **Exchange-coupled complexes Mn ions - localized holes in (CdMn)Te/(CdMg)Te quantum wells with 2D hole gas**

*Gurin Aleksandr Sergeevich*<sup>1</sup>, Tolmachev D.O.<sup>1</sup>, Romanov N.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Exchange-coupled complexes consisting of Mn ions and holes were revealed by optically detected magnetic resonance in the narrowest quantum wells of asymmetrical multiple-quantum-well structures (CdMn)Te/(CdMg)Te. Calculations were performed to estimate the parameters of the complexes (exchange interactions and hole g-factors) and simulate the spectra. The formation of such complexes implies the directional electron tunneling from narrow to larger wells, i.e. an electronic cascade, which results in the creation of the excess hole concentration in the narrowest and intermediate-width quantum wells.

## **The plasmonic enhancement of quantum dots luminescence**

*Matyushkin Lev Borisovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The aim of this work is the development of the theory of physical effects arising from the different attitudes of the fundamental transition frequency of the quantum dot and the plasmon resonance frequency of metal nanoparticles located at different distances relative to the layer of quantum dots, and the development of techniques for creating optoelectronic structures that can use effects arising from such interaction as described.

## Ferromagnetic properties of (Ga,Mn)As and (In,Mn)As nanowires

*Reznik Rodion Romanovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Here we report on the study different properties, especially magnetic, of (Ga,Mn)As as well as (In,Mn)As grown by molecular-beam epitaxy on the GaAs substrates at intermediate growth temperatures higher than the ones used for low-temperature growth of DMS thin films.

## Silicon nanocrystal: deformation effect

*Gert Anton Vladimirovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

In the present work, effect of the deformation in silicon nanocrystals covered by hydrogen and carbon atoms is investigated. Deformation leads to the significant enhance of the direct radiative transitions in the nanocrystals. With the DFT calculation the sp<sup>3</sup>d<sup>5</sup>s\* tight-binding parameters for Si-C bonds on the silicon nanocrystal surface are found.

## Interband light absorption by holes in deep quantum wells

*Pavlov Nikolay Vladimirovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

This paper the light absorption coefficient for intraband transitions in the valence band in deep quantum wells AlSb/InAs<sub>0.84</sub>Sb<sub>0.16</sub>/AlSb was calculated with the four-band Kane model. It is shown that the rate of transitions between heavy hole and spin-orbit splitting subbands sufficiently exceeds the one between heavy hole and light hole subbands. It is also shown that the HH1-SH1 transition has the highest absorption coefficient.

## Influence of As nanoiclusions on the photo luminescence of InAs quantum dots in GaAs

*Kosarev Alexander Nikolaevich*<sup>1,2</sup>, Chaldyshev V.V.<sup>1,2</sup>, Nevedomskii V.N.<sup>2</sup>, Bert N.A.<sup>2</sup>, Preobrazhenskii V.V.<sup>3</sup>, Putyato M.A.<sup>3</sup>, Semyagin B.R.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

<sup>3</sup>The Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the RAS

We investigated photoluminescence from InAs semiconductor quantum dots (QDs) in GaAs, which were overgrown by a low-temperature (LT) layer of GaAs, where an array of As nanoiclusions was formed by post-growth annealing. We revealed a complicated impact of the LT-GaAs layer on the QD related PL. Direct overgrowth at LT resulted in a drastic reduction of the QD-related PL due to formation of defects, which were observed by

transmission electron microscopy. The defect formation was eliminated by implementation of GaAs buffer layers between QD and LT-GaAs layers. In this case we observed a strong transformation of the PL spectra due to tunneling of electrons from the InAs QDs into continuum of states in as-grown LT-GaAs. The tunneling effect was eliminated by implementation of AlAs buffer layers. In this case we observed some increase in the PL intensity with annealing, which could be due to electromagnetic interaction of the InAs QDs with As nano-inclusions forming in a close vicinity from them.



# PLASMA PHYSICS, HYDRODYNAMICS AND AERODYNAMICS

---

## Angular-energy spectra of nonlinear Thomson scattering for an intense tightly focused laser pulse up to the diffraction limit

*Vais Olga Evgen'evna*<sup>1</sup>, Bochkarev S.G.<sup>2</sup>, Bychenkov V.Yu.<sup>2</sup>, Andriyash I.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>The P.N. Lebedev Physical Institute

<sup>3</sup>Laboratoire d'Optique Appliquée, Ecole Polytechnique, Paris, France

Current femtosecond pulse petawatt (PW) technologies have enabled to reach very high concentration of laser energy in a tight focal spot with intensity up to  $2 \cdot 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>. It makes possible to generate bright attosecond X-rays in relativistic laser overdense plasma interactions, or via an inverse Compton backscattering process driven by ultra-relativistic electron beam and nonlinear Thomson scattering of laser pulse by free electrons from laser focus. Such X-ray pulses have many applications in atomic and molecular physics, chemistry, and also in life science. The aim of our paper is to study the nonlinear Thomson scattering of a femtosecond relativistically intense tightly focused laser pulse. The investigation addresses namely the regime where the focal spot size,  $D_F$ , can be comparable to the laser wavelength,  $\lambda$ . For description of EM fields of the tightly focused 150 TW, 30-50 fs Gaussian laser pulse beyond the paraxial approximation we use an exact solution of vector Helmholtz applying the angular spectrum representation method. We analyze effect of tight focusing on direct electron acceleration and generation of secondary radiation by test electrons located initially in the vicinity of focal plane. Various models for EM field description are used to calculate electron trajectories and angular energy spectra of the nonlinear Thomson scattering, such as paraxial approximation for Gaussian laser beam, and exact solution to the Helmholtz equation with or without taking into account longitudinal electric field component. Based on detailed comparison of those models we make conclusion that the paraxial approximation describes radiation characteristics incorrectly for  $D_F < 10 \lambda$ , where  $\lambda$  is laser wavelength. That is why a revision of the nonlinear Thomson scattering theory for very typical experimental conditions is required. Our analysis shows the necessity of longitudinal electric field component allowance for secondary radiation spectra correct description in the diffraction limit ( $D_F \approx \lambda$ ). As compared to radiation spectra of test electron calculated applying the paraxial fields, for non-paraxial laser fields there is a shift in the spectral functions to low photon energies and what the most important the isolated attosecond pulses are generated. This work was partially supported by RFBR (grants Nos. 14-02-31407, 13-02-00426), Educational and Scientific Complex of P.N. Lebedev Physics Institute.

## **Optimized Doppler reflectometry on L-2M stellarator to study plasma turbulence**

*Kharchevskii Anton Aleksandrovich*<sup>1,2</sup>, Malakhov D.V.<sup>1,2</sup>, Skvortsova N.N.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute, RAS

<sup>2</sup>Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation

Doppler Reflectometry (DR) applied on large plants of magnetic plasma confinement such as ASDEX, TEXTOR, Tuman-3 Globe-M, FT-2 stellarator TJ-II and L-2M is generally accepted for the study of plasma turbulence. A new complex of gyrotron electron cyclotron resonance (ECR) plasma heating MIG-3 was set on the L-2M stellarator. It provided maximum specific energy pulsed microwave power into the plasma of all toroidal systems. This event made it necessary to modify the diagnostics. Was revealed change of the Fourier spectrum of plasma turbulence. Investigation is showed that it is possible to describe the plasma turbulence structure with three - four processes defined by the spectrum components, which can provide an insight into the behavior of different types of plasma fluctuations.

## **Study of the structure of natural convection over heated horizontal disc**

*Khrapunov Evgenii Fedorovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

We present the results of the study of natural convection over heated horizontal disc. The analysis of data obtained during the experimental include visualization paintings and point temperature measurements. Some of the basic processes that take place at a short distance from the disk and form a further flow described in this work. Particularly, we studied the periodic low-frequency movement of rising air masses. The experimentally observed vortex structures also obtained during the numerical solution of the Navier - Stokes equations.

## **Experimental investigation of nonlinear oscillations of gas in the tube in the transition to shock waves near resonances**

*Shaydullin Linar Radikovich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga region) Federal University

Mode when the flat piston creates fluctuations gas at one end of the tube in the transition to the shock waves at small excitation amplitudes are virtually unexplored. Changing the shape of pressure waves determined when passing through resonance. Dependencies were built for the amplitudes of pressure oscillations at different frequencies and amplitudes of the excitation gas. The study was conducted in the middle of the gas flow radially and axially in a nonlinear wave field adjacent the open end of the tube. New data on nonlinear oscillations of gas in the tubes in a wide range of frequencies and amplitudes of excitation.

## Using DDES and IDDES with shear layer adapted subgrid length scale for separated flows computations

*Guseva Ekaterina*<sup>1</sup>, Garbaruk A.<sup>1</sup>, Strelets M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

The paper presents results of testing new shear layer adapted subgrid length scale which was proposed to solve the issue of delaying RANS to LES transition in the shear layers in hybrid RANS-LES approaches. Computations of a number of separated flows were carried out using DDES and IDDES with the new scale. Results show that for flows with medium separations implementation of the new subgrid length scale into DDES leads to significant improvements of computational results. The influence of the subgrid scale on IDDES results is not so substantial. However, both approaches with the new subgrid length scale are less sensitive to a grid spacing in spanwise direction. As a result modified method is two times less expensive than original one for the flows with slow variations in spanwise direction.

## Approximate semi-empirical method for determining friction axisymmetric bodies

*Nesterenko Ekaterina Anatolyevna*<sup>1</sup>, Bondarev A.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics

In this paper we consider the approximate approach for the evaluation of friction on axisymmetric bodies at zero and small angles of attack. Independent software modules are described. This module is used as the input parameters, the parameters of the gas-dynamic calculation of other complexes.

## Adjustment of the $k-\omega$ SST turbulence model for the prediction of airfoil characteristics near the stall

*Matyushenko Aleksey Alekseevich*<sup>1</sup>, Garbaruk A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Accurate prediction of aerodynamic characteristics of airfoils is essential for design in the areas of aviation and wind turbines. Unfortunately most RANS turbulence models (including one of the best  $k-\omega$  SST) overestimate stall angle and maximum lift coefficient. Flows around several airfoils (S805, S809, S827, DU-96-W-180, and NACA-4412) were considered and it is shown that decreasing the  $a_1$  constant from 0.31 to 0.28 in the  $k-\omega$  SST model significantly improves accuracy of the computed aerodynamic characteristics. However, using the modified value of the  $a_1$  constant leads to less accurate prediction of some simple flows, for example, flat plate turbulent boundary layer.

## Relative particle densities of the H<sub>2</sub>, HD, D<sub>2</sub> molecules in glow and arc discharges in the low preure hydrogen-deuterium mixtures

Zhukov Alexey Sergeevich<sup>1</sup>, Lavrov B.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

In our recent article [1] it was shown that in the framework of simple kinetic models relative particle densities of the H<sub>2</sub>, HD, D<sub>2</sub> molecules may be connected with the intensity ratios of Balmer lines of hydrogen (H) and deuterium (D) in cases of high and low diociation degree of molecules in plasma (models 1a and 1b respectively) as well with the intensity ratios of Q-branch lines of Fulcher- $\alpha$  bands (model 2). The opportunity to find the relative concentrations of isotopic hydrogen molecules (H<sub>2</sub>, HD, D<sub>2</sub>) in a non-equilibrium hydrogen-deuterium plasma by measuring the intensity ratios of spectral lines is discued in the present work.

Experimental verification of the suggested methods was carried out by measuring emiion spectra of non-equilibrium plasma of glow (in deuterium with a small addition of hydrogen) and capillary-arc (in a mixture of comparable amounts of D<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and Ne) discharges at preures 6-8 Torr and a current density of 0.4 and 8.5-17 A/cm<sup>2</sup> respectively. It was used High-resolving-power spectrometer with digital photorecording, based on the DFS-8 [2]. Unlike [2] as the photodetector used a more advanced camera CANON EOS 600D. The intensity distribution was measured in the wavelength range 594-627 nm (the range of wavenumbers 15940-16840 1/cm), and in the neighbourhood of Balmer lines of hydrogen (H <sub>$\alpha$</sub> , H <sub>$\beta$</sub>  and H <sub>$\gamma$</sub> ) and deuterium (D <sub>$\alpha$</sub> , D <sub>$\beta$</sub>  and D <sub>$\gamma$</sub> ).

The intensity ratios of Q-lines were found using the conditional optimization (similar to [3]). The measured distribution of intensity (with a width of 0.5-1.5 nm) was approximated by the sum of a finite number of contours of spectral lines. The analysis of the single, not blended spectral lines showed that Voigt function is most suitable for line contours description. In the case of arc-discharge was sufficient to use the Gauian function (due to the increase in the temperature of the emitting molecules and thus Doppler broadening rising). Optimal sets of parameters of the approximation (background signal, position, width, intensity of lines in the center) were determined by minimizing the mean-square residual functional in a multidimensional space of these parameters. The gas temperature that is required for the model 2 was measured using the technique proposed in [4].

The results of the evaluation of the relative concentrations of the molecules H<sub>2</sub>, HD, D<sub>2</sub> in the studied plasmas showed agreement between estimates based on models 1b and 2, while the evaluation of the model 1a is with them in a meaningful contradiction. Note also that this allows us to make an indirect judgment about a low degree of diociation of molecules in plasma. This result was expected, since the emitting plasma is located mainly inside a metal capillary, the surface of which should be active in the proce of the aociation of atoms into molecules.

Discued methods are completely independent, as it is based on consideration of various physical procees, using different experimental data and do not contain any fitting parameters. Common use of two independent techniques provides an opportunity to examine the applicability in certain conditions. Obviously, they could be extended to the deuterium-tritium mixtures.

Present work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 13-03-00786-a.

## **Investigation of interaction between the supersonic airflow and the pulsed gas discharge**

*Monakhov Nikolai Alexandrovich*<sup>1</sup>, Bobashev S.V.<sup>1</sup>, Belik V.P.<sup>1</sup>, Petrenko M.V.<sup>1</sup>, Popov P.A.<sup>1</sup>, Sakharov V.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

In this work the results of investigation of pulsed gas discharge formation and dynamics in quiescent gas and supersonic airflow are presented. Some features of significant mutual influence of pulsed gas discharge plasma and supersonic jet are revealed. Optical and spectral diagnostics of this interaction allowed us to determine the composition of the jet, to study the peculiarities of electrode matter ejection and flow ionization process and to estimate the temperature.

## **Comparison of curvature-rotation corrections for k- $\omega$ SST model**

*Stabnikov Andrey Sergeevich*<sup>1</sup>, Garbaruk A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

For the accurate RANS prediction of turbulent flows with essential effects of streamline curvature and flow rotation special correction terms are required in the model equations. This work presents results of comparison of two corrections for k- $\omega$  SST model. A range of internal and external flows is considered, including flow in plane rotating channel, flows in channels with 180° and 30° turns, airfoil tip vortex, etc. It is shown that the recently proposed modification of the Menter-Smirnov correction exceeds original version in some cases and is not inferior in others.

## **Simulation of laser plasma generation process of Alfvén and collisionless shock waves in the space plasma**

*Prokopov Pavel Anatolyevich*<sup>1</sup>, Boyarintsev E.L.<sup>1</sup>, Zakharov Y.P.<sup>1</sup>, Melekhov A.V.<sup>1</sup>, Ponomarenko A.G.<sup>1</sup>, Posukh V.G.<sup>1</sup>, Tishchenko V.N.<sup>1</sup>, Shaikhislamov I.F.<sup>1</sup>, Terekhin V.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the RAS

<sup>2</sup>The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Generating process of Alfvénic Waves (AW) along the external magnetic field  $B_0$  and Collisionless Shock Waves (CSW) across the one, have been studied in model experiments with laser (and background) plasma for the first time. There was set a uniform physical Magnetic Laminar Mechanism (MLM) of collisionless interaction between explosion plasma (EP) and magnetised background plasma (BP). This kind of interaction generates AW along the external magnetic field, produced by strong magnetic Bf-fields (cylindrical coordinates, with Z axis along the  $B_0$ ) at the border of magnetic cavern of EP (radius  $R^*$ ). EP ions decelerate, and BP ions accelerate across the  $B_0$  by electric field  $E_f$  due to MLM interac-

tion, in case when MLM parameter  $\delta = R^2/RLRL^* > 1$  ( $RL, RL^*$  – Larmor radius of EP and BP respectively) is big enough. In series of experiments on stand KI-1, in high-vacuum chamber  $d=1.2\text{m}$ ,  $l=5\text{m}$ , the possibility of MLM generation of strong perturbations of BP, propagating across B0 with magnetosonic speed, with  $\delta \sim 0.3$  was confirmed. The data about CSW, generated by laser plasma with  $\delta \sim 1 \div 2$  and Alfvén-Mach number  $MA \sim 10$  (and effective energy  $E_0 = 4\pi E_k \sim 1000\text{ J}$ ), were obtained at the scale  $\sim 1\text{ m}$  with concentration of BP  $\sim 3 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ . At the same condition, but with the  $MA \sim 2$ , generation, structure and dynamic of AW (and whistler waves), propagating along the B0  $\sim 100 - 500\text{ Gs}$ , at the scale  $\sim 2.5\text{ m}$ , with wavelength  $\sim 0.5\text{ m}$ , were studied.

## **Investigation of the transition between the LES and RANS subzones for simulations of wall-bounded turbulent flows within zonal RANS-LES approaches**

*Gritskevich Mikhail Sergeevich*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

A detailed investigation of the transition from LES to RANS for simulations of the wall-bounded turbulent flows is performed for the SST-RANS and SST-SAS based zonal RANS-LES approaches and tested for the developed channel flow and flat plate boundary layer flow. All the results are obtained with the use of general-purpose CFD code ANSYS-FLUENT. It is shown that SST-RANS approach provide unphysical rise of the skin friction coefficient near the interface, while SST-SAS is capable to correctly predict the mean quantities in the RANS domain and, therefore, is recommended for using within zonal RANS-LES approaches.

## **Relativistic plasma resonance in inhomogeneous laser-produced plasma**

*Metelskii Igor Igorevich*<sup>1</sup>, *Kovalev V.F.*<sup>2</sup>, *Bychenkov V.Yu.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The P.N. Lebedev Physical Institute

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics

The results of the analytical investigation relativistic plasma oscillations in the plasma resonance region using renormgroup symmetries method are presented. Stationary solution of equations describing the dynamics of electrons and potential field structure in vicinity of the critical density is found. The spatial-temporal and spectral characteristics of the potential electric field are discussed.

## **Effect of conjugated heat transfer in the heat flow in the shock tube**

*Kuznetsov Egor<sup>1,2</sup>, Poniaev S.A.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

We present the simulation shows the occurrence of reverse currents and complex dependence of the heat flux on the wall of the pipe, taking into account the conjugate heat transfer. The paper shows the change in heat flow, taking into account the conjugate heat transfer and without for different velocities of the shock wave in a shock tube. The importance of taking into account the thermal conductivity of the wall material using a shock tube for testing materials in heat flux at high temperatures of gas behind the reflected shock wave was shown.

## **Waves on a Relativistic Electron Beam in Plasma under Ion Focusing Conditions**

*Chernenco Julia Sergeevna<sup>1</sup>, Sheinman I.L.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Waves on a relativistic electron beam in plasma under ion focusing conditions basing on complete electrodynamic consideration are analyzed. Dispersion laws depending on system parameters are investigated. It is shown that when paing an ultrarelativistic electron beam moving through underdense plasma there are two types of the surface waves. The first type is a high-frequency wave on boundary between the beam and neutralization area and the second type is a low-frequency wave on boundary between neutralization area and outer motionle plasma. The analysis of stability of the surface waves which are excited on the relativistic electron beam moving through the plasma is carried out in case of ultrarelativistic speeds of the beam. Instability of high-frequency waves can be three types: aperiodic, not resonant instability and resonant instability. The resonant instability of high-frequency surface waves is connected with excitement of asymmetrical waves which increments increase with growth of mode number.

## **The principle of maximum randomne in the theory of developed turbulence: A model with maximum parity violation**

*Kulikov Anatoly<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

In the present work we apply methods of quantum field theory and statistical physics to the theory of developed homogeneous isotropic turbulence. Considered model is based on the principle of maximum randomne of velocity field with fixed mean energy spectral flux. Model with a maximum violation of parity, similar to considered in the theory of weak interactions, is presented. Diagram technique and closed set of equations for parame-

ters of the model, allowing one to determine an important experimental value – Kolmogorov constant, is constructed using set of self-consistent equations. Analytical expressions for one-loop 1-irreducible diagrams of the model are obtained by means of computer calculation. Solution found of the closed set of equations yields Kolmogorov index of the velocity fields correlator power dependence on the wave number. Ultraviolet divergences of 2-loop diagrams of the model were analyzed. The existence of anomalous scaling (small shift from Kolmogorov index) is demonstrated. Analytical expressions for the leading order of the expansion over the small parameter of two-loop 1-irreducible diagrams of the model are obtained by means of computer calculation. Through analyzing self-consistent equations in two-loop approximation the values of anomalous scaling and Kolmogorov constant are obtained.

## **Investigation of the effect of acoustic streaming in a gas chamber on the parameters of a glow discharge**

*Fadeev Sergey Alekseevich*<sup>1</sup>, Saifutdinov A.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga region) Federal University

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University

A model of the spatial structure of the positive column of a glow discharge with a cylindrical symmetry and considering the effect of acoustic streaming is developed. Hydrodynamic and kinetic approaches are used for modeling gas-discharge plasma. We have calculated the spatial distribution of main parameters of a glow discharge.

## **Plasma rail accelerator for conducting coatings synthesis**

*Tverdokhlebov Konstantin Valer'evich*<sup>1</sup>, Poniayev S.A.<sup>2</sup>, Zhukov B.G.<sup>2</sup>, Bobashev S.V.<sup>2</sup>, Kurakin R.O.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>St. Petersburg State Technological Institute (technical university)

<sup>2</sup>Toffe Institute

There are many areas which require solid conductive coatings. There are a lot of combinations, which are required for various scientific and technical applications, but preparation of this compositions is not enough mastered. In this work plasma rail accelerator (railgun) is used for thin conductive films deposition. During the process substrate is exposed to plasma jet generated by the railgun, forming the coating on the surface. Samples of the copper and carbon coatings on the glass of varying degrees of homogeneity and continuity are produced and examined by optical and scanning electron microscope. Research has shown that the plasma jet interacts very strongly with the substrate material, the quality and the adhesion of the coating depends not only on the nature of the materials, but also on the parameters of the deposition process. For technology improvements further investigations will be carried out.



## PHYSICS OF FERROICS

---

### **Magnetolectric effect in layered structures in the region of electromechanical resonance**

*Galichyan Tigran*<sup>1</sup>, Filippov D.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

The theory of magnetolectric (ME) effect in the region of electromechanical resonance is presented for layered magnetostrictive-piezoelectric structures. The frequency dependence of the ME effect is presented taking into account the amplitude inhomogeneity of strain and displacement on the thickness of the structure. The theory of ME effect is presented considering the interlayer bonding material. It is shown that the amplitude of ME effect depends not only on the parameters of magnetostrictive and piezoelectric phases, but on the parameters and geometric characteristics of the bonding material also.

### **Inverse magnetolectric effect in polarized and magnetized piezoferrite hollow structures**

*Radchenko Grigoriy Sergeevich*<sup>1</sup>, Filippov D.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Southern Federal University

<sup>2</sup>Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

The present paper is devoted to the original investigation of the converse magnetolectric response of piezomagnetostrictive rings over the first five radial resonances frequency range. The optimal excitation conditions for the first five modes are derived at the dependence of the geometric parameters of the structure. The thorough analysis of the energy redistribution between these modes over wide frequency range has been done. The analytical expressions for the converse magnetolectric coefficient are derived for the rings with axial polarization for the first time.

### **Peculiarities of critical scattering in uniaxial relaxor $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$**

*Vanina Polina Yur'evna*<sup>1</sup>, Borisov S.A.<sup>2</sup>, Naberezhnov A.A.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

The studies of the temperature evolution of critical neutron scattering in uniaxial single crystal relaxor  $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$  have been carried out. It has been determined the values

of critical exponents  $\nu = 0,67(2)$ ,  $\gamma = 1,33(17)$ ; the correlation length  $\xi_{\text{crit}} = 27(3)$  nm, the transition temperature into relaxor state  $T_C = 340,5(12)$  K. The influence of applied electric field on diffuse scattering has been studied.

## **Effect of BaTiO<sub>2</sub> admixture on incommensurate phase in the 0,9NaNO<sub>2</sub>+0,1BaTiO<sub>3</sub> composite and on the KNO<sub>3</sub> ferroelectric phase in the (1-x)KNO<sub>3</sub>+(x)BaTiO<sub>3</sub> composites**

*Alekseeva Olga*<sup>1</sup>, Naberezhnov A.A.<sup>2</sup>, Stukova E.V.<sup>3</sup>, Borisov S.A.<sup>2</sup>, Simkin V.G.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

<sup>3</sup>Amur State University

<sup>4</sup>Joint Institute for Nuclear Research

The results of structure studies of 0,9NaNO<sub>2</sub>+0,1BaTiO<sub>3</sub> composite by neutron diffraction and (1-x)KNO<sub>3</sub>+(x)BaTiO<sub>3</sub> at x = 25 and 50 vol. % by X-rays diffraction are reported. It has been shown that in the mixture 0,9NaNO<sub>2</sub>+0,1BaTiO<sub>3</sub> the order parameter values are le comparing to the bulk NaNO<sub>2</sub> in the temperature range 360-430 K. It argues about coexistence of the ferroelectric and incommensurate phases in this temperature interval. The temperature evolution studies of (1-x)KNO<sub>3</sub>+(x)BaTiO<sub>3</sub> composites structures have revealed the increase of temperature range where KNO<sub>3</sub> ferroelectric phase exists.

## **Optical second harmonic generation study of hexagonal orthoferrites h-RFeO<sub>3</sub> (R = Ho, Er and Lu)**

*Nefedov Sergei Gennadievich*<sup>1</sup>, Pavlov V.V.<sup>1</sup>, Pisarev R.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

Thin epitaxial films of hexagonal orthoferrites h-RFeO<sub>3</sub> (R = Ho, Er and Lu) were studied by the optical second harmonic (SH) generation technique. h-RFeO<sub>3</sub> films with thicckne of 50-70 nm were grown by metal organic chemical vapor deposition on single-crystalline (111)-substrates of cubic yttria-stabilized zirconia ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Spectral, temperature and polarizing dependences of SH intensity were investigated. These dependences were measured in two main polarization geometries E<sub>w</sub>I\_E2w and E<sub>w</sub>II E2w at different angles of incidence. These measurements allowed us to separate interface substrate/film and ferroelectric contributions. The observed temperature anomalies are related to ferroelectric phase transitions. Comparison of linear and nonlinear optical spectra allowed to find contributions from d-d and charge transfer electronic transitions to the nonlinear polarization.

## Linear and nonlinear magnetoelectric effect in bilayer structures based on lead zirconate titanate-nickel

*Firsova Tatyana Olegovna*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

The results of theoretical and experimental research magnetoelectric properties of bilayer magnetostrictive-piezoelectric structures in the form of a rectangular plate on the basis of lead zirconate titanate – nickel are presented. The structures were fabricated by bonding and by electrolysis. On the frequency dependence of the effect observed in the resonance frequency is half the frequency of the fundamental resonance. It is shown that the presence of this resonance due to the nonlinear magnetoelectric effect.

## The role of absorption in the laser-induced excitation of the magnetization precession in yttrium iron garnet films

*Shamray Pavel Yurievich*<sup>1</sup>, *Shelukhin L.A.*<sup>2</sup>, *Pavlov V.V.*<sup>2</sup>, *Kalashnikova A.M.*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

In recent years, there is a high attention paid to ultrafast laser-induced magnetic dynamics in magnetically ordered medium. We investigated the excitation of magnetization precession by 170 fs laser pulse in substituted yttrium iron garnet (YPrLuBi)<sub>3</sub>(FeGa)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> with easy axis magnetic anisotropy. In order to reveal the mechanism of this excitation we studied the dependence of the precession parameters on optical absorption. We found the increase of magnetization amplitude with absorption, which confirmed mechanism of precession excitation based on ultrafast laser-induced anisotropy change suggested previously.

## Ultrafast laser-induced demagnetization in the CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junction

*Maximov Kirill Andreevich*<sup>1</sup>, *Shelukhin L.A.*<sup>2</sup>, *Kalashnikova A.M.*<sup>2</sup>, *Gareev R.R.*<sup>3</sup>, *Zbarsky V.*<sup>4</sup>, *Münzenberg M.*<sup>4</sup>, *Pertsev N.A.*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Ioffe Institute

<sup>3</sup>Universität Greifswald

<sup>4</sup>Univ Leipzig, Leipzig, Germany

We investigated laser-induced demagnetization in the perpendicular-anisotropy CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junction (MTJ). The thicknesses of the layers are close to the critical thickness at which the spin reorientation transition occurs. We demonstrate that femtosecond laser pulse excitation of MTJ leads to strong demagnetization of CoFeB layers. The corresponding probe Kerr ellipticity changes very differently for parallel and anti-parallel magnetizations of layers.

## Magnetodielectric effect in perovskite-type antiferromagnets KCoF<sub>3</sub> and KNiF<sub>3</sub>

*Dubrovin Roman*<sup>1</sup>, *Kizhaev S.A.*<sup>1</sup>, *Pisarev R.V.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

The temperature dependences of low-frequency dielectric constant  $\epsilon$  of the antiferromagnets KCoF<sub>3</sub> and KNiF<sub>3</sub> have been measured at temperatures from 77 K to 300 K. The character of temperature dependences of the dielectric constants shows the essentially different behavior in these two materials. The dielectric constant in KNiF<sub>3</sub> decreases monotonically at cooling over the temperature range of measurements. No anomaly at the Néel temperature  $T_N = 244.8$  K has been detected. In contrast, in KCoF<sub>3</sub> the dielectric constant increases monotonically at cooling over temperature range of measurements and well pronounced anomaly has been found at the Néel temperature  $T_N = 115.3$  K. The absolute values of dielectric constant at the room temperature are  $\epsilon = 6.49 \pm 0.01$  in KNiF<sub>3</sub> and  $\epsilon = 7.60 \pm 0.01$  in KCoF<sub>3</sub>.

## Spin excitations and spin-phonon coupling in antiferromagnetic PbFeBO<sub>4</sub>

*Prosnikov Mikhail*<sup>1</sup>, *Pisarev R.V.*<sup>1</sup>, *Davydov V. Yu.*<sup>1</sup>, *Smirnov A.N.*<sup>1</sup>, *Sablina K.A.*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>L.V. Kirensky Institute of Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science

In our talk, we present the results of investigations of the spin excitations and spin-phonon coupling in PbFeBO<sub>4</sub> by Raman scattering. Up to now, no reports of such experiment in this crystal are available. PbFeBO<sub>4</sub> crystallizes in the orthorhombic space group Pnma (#62, Z=4) with the unit cell parameters  $a = 7.00$ ,  $b = 5.94$ ,  $c = 8.33$  Å. Fe<sup>3+</sup> ions ( $S=5/2$ ) occupy 4a positions inside oxygen octahedra. Chains of edge-connected FeO<sub>6</sub> octahedra running parallel to the crystallographic b-axis connected by BO<sub>3</sub> and PbO<sub>4</sub> groups. At temperatures below  $T_N = 114$  K Fe<sup>3+</sup> spins order antiferromagnetically in chains, but ferromagnetically between chains. Light scattering spectra were measured in the temperature range between 10 and 300 K in the back-scattering geometry with 532 nm excitation line. At 11 K the broad band at 190 cm<sup>-1</sup> was observed, nearby A<sub>g</sub> phonon at 160 cm<sup>-1</sup>. This band shows strong temperature dependence, namely softening, broadening and decreasing in intensity when approaching the Neel temperature. Such temperature and polarisation behavior allows us to assign this band to spin excitations in chains of edge-shared FeO<sub>6</sub> octahedra. The magnetic ordering below 114 K results in anomalous softening and distortion of lineshape of several phonon modes due to spin-phonon coupling. Magnetic and exchange structures of PbFeBO<sub>4</sub>, were also studied by magnetic symmetry analysis and spin-polarized DFT+U calculation.

## Features of lattice dynamics in single crystal lead zirconate - titanate with Ti concentration 0.7%

*Andronikova Daria*<sup>1,2</sup>, Baron A.<sup>3</sup>, Bosak A.A.<sup>4</sup>, Bronwald Y.<sup>1,2</sup>, Burkovsky R.<sup>1,2</sup>, Vakhrushev S.<sup>1</sup>, Leontjev N.<sup>2</sup>, Leontjev I.<sup>5</sup>, Filimonov A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>3</sup>RIKEN SPring-8 Center

<sup>4</sup>European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France

<sup>5</sup>Southern Federal University

Lead zirconate titanate (PZT) is the well known and widely used ferroelectric material. The reason of its popularity is that PZT possesses exceptionally good piezoelectric properties. Another motivation to study PZT is a variety of properties and structures, demonstrated by PZT with different composition. tetragonal phase[1]. At Ti concentration range from 0 to 6% PZT undergoes 2 phase transitions: cubic perovskite-rhombohedral and rhombohedral-orthorhombic transitions. Despite the popularity of the PZT the microscopic reasons of the complicated sequences of the phase transitions are not understood completely. This induced us to investigate lattice dynamics in PZT single crystal with Ti concentration is 0.7% by the X-ray inelastic scattering.

## Study the effect of the finite width of the ferromagnetic thin film waveguide on the spectrum and the transverse distribution of the dipole-exchange spin waves

*Popov Dmitry*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The analysis of the spectrum of the dipole-exchange spin waves localized on the side faces tangentially magnetized ferrite waveguide, for different values of the external field bias. To study selected two typical waveguide material: YIG, and permalloy. The dependence of the depth and width of the magnetic wells of the external magnetic field, and the relative sizes of the waveguide, and plotted the depth of the localized states of the frequency on the same parameters. Based on these data the conditions of existence of localized modes in limited ferrite magnetic waveguides and the ability to control their dispersion characteristics.

## OTHER PROBLEMS OF PHYSICS

---

### **Reduction of longitudinal ultrasonic oscillations in NaClO<sub>3</sub> crystals**

*Igisheva Alena Leonidovna<sup>1</sup>, Soboleva Elvira Gomerovna<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>The National Research Tomsk Polytechnic University

The authors study reduction of longitudinal ultrasonic oscillations (internal friction  $Q^{-1}$  and logarithmic decrement  $\Delta$ ) in NaClO<sub>3</sub> crystals within the temperature range of 78 – 525 K and relative amplitudes of oscillatory deformation of  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  according to the method of compound piezoelectric vibrator at the frequencies of  $\approx 10^5$  Hz.  $Q^{-1}$  maximums under the temperatures of 110 K, 240 K, 260 K,  $\approx 400$  K and its fast growth under the temperature over 500 K are revealed as well as athermic peak of  $\Delta$  in the region of small deformation amplitudes (near  $10^{-7}$ ).

### **Simulation of laser ablation of metals by femtosecond pulses**

*Davydov Roman Vadimovich<sup>1</sup>, Antonov V.I.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

There is a growing interest in the nanofabrication of materials and their applications in various fields of life and technology, such as electronics, energy generation, health care and storage. A great deal of progress in this field has relied on the use of lasers. Production of nanoparticles can be done in several ways, one of them is laser ablation. Despite extensive research work, accurate prediction of the ablation process is still lacking, because it significantly depends on laser parameters, surrounding medium, and target material characteristics. To analyze the physical processes at high energy densities, when laser is used, an adequate description of the thermodynamic properties of matter over a broad region of states including the normal conditions and plasma at high pressures and temperatures is required. For that a mathematical model is proposed, based on hydrodynamic equations and wide-range semi-empirical equations of state. Using this mathematical model, were received results in a good match with experiment for aluminium and copper, was correctly predicted ablation depths for different laser fluences and pulse lengths

## Aspects of symmetry of the longitudinal piezoelectric effect in crystals

Zamkovskaya Anastasia Igorevna<sup>1</sup>, Maksimova E.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University

This paper presents the method for the calculation of anisotropic piezoelectric properties of single crystals and the graphical display of the results in 3 D. Crystallographic preferred orientations were determined for piezoelectric modules, dielectric constant, elastic compliance tensor and electromechanical coupling factor, which measures the ability of a material to interconvert electrical and mechanical energy.

## Modeling coalescence bubstons in disperse systems with regard fractal media

Kumykov Tembulat Sarabievich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC of RAS

Proposed nonlocal mathematical model of coalescence bubstons in the dispersion taking into account the fractal media. A generalized equation of the proce of coalescence bubstons, whose decision was obtained by numerical methods of fractional calculus. Constructed new profiles calculated curves representing the bifurcation diagrams of the proce of coalescence bubstons.

## The accelerator neutron source for boron neutron capture therapy

Ostreinov Yury Mihajlovic<sup>2</sup>, Shchudlo I.M.<sup>1</sup>, Zaidi L.<sup>3</sup>, Kasatov D.A.<sup>1</sup>, Koshkarev A.M.<sup>1</sup>, Kuznetsov A.S.<sup>1</sup>, Makarov A.N.<sup>1</sup>, Sorokin I.N.<sup>1</sup>, Sycheva T.V.<sup>1</sup>, Taskaev S.Yu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Budker Institute of Nuclear Physics

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University

<sup>3</sup>University of Sciences and Technology Houari Boumediene

The accelerator neutron source for boron neutron capture therapy In Institute of Nuclear Physics, is proposed, created and used accelerator source of epithermal neutrons for boron neutron capture therapy (BNCT) - a promising method of treatment of malignant tumors. In 2014, with the support of the Russian Science Foundation created the BNCT laboratory for the purpose to the end of 2016 get the neutron flux, suitable for BNCT. For getting 3 mA 2,5 MeV proton beam, was created a new type accelerator - tandem accelerator with vacuum isolation. On this moment, we have a stationary (longer than 1 hour) proton beam with 2 MeV and current 1.6 mA. Generation of neutrons is carried out by dropping proton beam on to lithium target as a result of threshold reaction  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ . Therapeutic neutron beam is obtained via the beam forming system comprising a moderator, a reflector and an absorber. Established facility is a unique scientific installation. It provides a

generating of neutron flux, including a monochromatic energy neutrons, gamma radiation, alpha-particles and positrons, and may be used by other research groups for carrying out scientific researches. The report describes an accelerator neutron source, present and discus research results and declared plans.

## **Application of Strongly Focused Pulsed Electron Beam for the Gyroscope Flywheel Balancing**

*Alena O. Borduleva*<sup>1</sup>, *Solovev V.V.*<sup>2</sup>, *Bleykher G.A.*<sup>1</sup>, *Krivobokov V.P.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The National Research Tomsk Polytechnic University

<sup>2</sup>Research and production center "Polus"

In the given work the material removing poibility by the strongly focused pulsed electron beam was investigated. The optimal mode of flywheels balancing was found. At this mode the power density is  $P = 1,6 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$  and pulse duration is 650 ms. At such parameters the evaporation rate is equal to  $11 \text{ g/s} \cdot \text{cm}^2$ ; there is poibility to vary the amount of remote material from 1 to 100 mg, that is sufficient to balance flywheel. It was found that treatment by an electron beam does not change the material structure.

## **The study of dielectric properties of the terbium-based lanthanidomesogen**

*Sakhatskii Aleksandr Sergeevich*<sup>1</sup>, *Dobrun L.A.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University

In recent years considerable attention has been drawn to studies of the fundamental properties and the practical liquid applications of the new crystalline compounds synthesized on the basis of rare-earth elements (lanthanides). These compounds (lanthanidomesogens) are paramagnetic and in comparison with other types of liquid crystals they have extremely large anisotropy of magnetic susceptibility [1]. Moreover they are easy to be oriented by the electric field and magnetic field actions. Also these compounds poe a high luminescence and they are very promising for optoelectronic devices such as OLED (organic light-emitting diode) [2]. In this work, we report on a comprehensive study of the dielectric properties of the terbium-based lanthanidomesogen Tb(CPDk3-5)3Bpy17-17, namely, tris[1-(4-(4-propylcyclohexyl) phenyl) octane-1,3-dione]-[5,5'di(heptadecile)-2,2'-bipyridine]terbium. The magnitude and the sign of the dielectric anisotropy and the optical anisotropy of the liquid crystal complex have been found. The relaxation procees (modes) responsible for the dispersion of the principal values of the sample's dielectric permittivity have been studied. The relaxation times, activation energy and the dipole moment of the complex have been determined.



## **The study of molecular association in the air by mass-spectrometric technique**

*Titov Yuriy Alekseevich*<sup>1</sup>, Kuzmin A.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Institute for Analytical Instrumentation

The paper deals with molecules associations present in air. Study of molecules associations were made by quadrupole mass-spectrometer. The paper shows the necessity to consider the presence of molecules associations in the air, in the analysis of its contamination.

## **Melt-spun metallic glasses based on Fe-Co-P-B: structure, solidification, magnetic properties**

*Prahova Darja Alexandrovna*<sup>1</sup>, Grishin A.M.<sup>1,2</sup>, Ignahin V.S.<sup>1</sup>, Lugovskaya L.A.<sup>1</sup>, Osaulenko R.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University

Complex analysis of the metallic alloys based on Fe-Co-P-B prepared in a glassy state a melt-spinning process has been carried out including TGA/DSC analysis of solidification process, X-ray analysis of the structure and measurement of magnetic properties. Influence of the stoichiometric composition on the properties of the glasses has been studied. The crystallization temperature determined with differential scanning calorimeter is above 770 K. The activation energies of phase change have been found using Kolmogorov-Johnson-Mehl-Avrami model. The DSC analysis of the ribbons carried out in two different regimes – isothermal and isochronal, has shown that the same activation energy controls  $T_x(\alpha)$  and  $\ln c(T)$  dependences. The as-quenched materials have amorphous structure and superior soft magnetic properties: coercive field 4 A/m, differential magnetic permeability high 110 000 at 60 Hz.

## **Structure of the cellulose received by method of mechanical destruction**

*Latuga Anastasiya Alekseevna*<sup>1</sup>, Loginova S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University

By XRD analysis we determined the structure of ball-milling microcrystalline cellulose (MCC). The degree of crystallinity of MCC is  $70 \pm 5\%$ . Ball-milling of MCC after one hour reduced the index of crystallinity by 35% and the length of elementary fibrils on 30 Å. After 3 hours of MCC milling the XRD pattern of samples consists of one broad peak that indicates that the material is in the amorphous state. Calculations of the short-range order characteristics were performed by the Finbak -Warren method. The analysis of short-range order characteristics shows that the cellulose chains are distorted, the lengths of bonds in molecules are changed, and the lengths of the hydrogen bonds are changed between the macromolecules of cellulose. We proposed a model of ball-milling cellulose structure. The structure of short-range orders of 6 hours ball-milling cellulose can be described as small

clusters containing distorted cellulose chains with chains length by 25 Å, the "chair" conformation of cellulose units and tg-conformation of hydroxymethyl groups.

## Heat oscillations in a one-dimension crystal

*Simonov Maksim Valdimirovich<sup>1</sup>, Krivtsov A.M.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

In recent decades, the methods of mechanics of discrete media have widely been used to describe non equilibrium processes in matter [1-3]. Interest in discrete approaches has especially risen in connection with the development of nanotechnologies. Analysis of non-equilibrium thermal processes in discrete media with their classical description, remains a serious problem. Description of heat transfer process may differ from the conclusions of the classical heat conduction [4-6]. Obtained that when one-dimensional crystal is unbalanced there is initiated a oscillation process associated with the trend of the kinetic energy to be uniform distributed throughout the crystal. The energies oscillations in one-dimensional crystal with a linear interaction between particles were studied [7]. But for the nonlinear interaction between particles – there is no analytical solution. The main purpose of this work is research the heat oscillations in one-dimensional crystal with nonlinear interactions between particles. Two research problems were studied: the kinetic energy oscillations in one-dimensional crystal with a nonlinear interaction between particles and the kinetic temperature oscillations in one-dimensional crystal with a nonlinear interaction between particles. One-dimension crystal with nonlinear interaction was considered. Defined the dimensionless parameter characterizing the impact of linear and nonlinear interaction between the particles of one-dimensional crystal. Obtained that kinetic energy and the kinetic temperature oscillation with increasing nonlinearity damped faster. The temperature in the crystal increases with the increase of nonlinearity when setting the initial uniform temperature. Proposed approximation for the decay law for kinetic energy and kinetic temperature oscillations. Determined the coefficients in the decay law for the different value of nonlinearity parameter. A good agreement of the proposed approximation at small nonlinearity shows that the analytical solution is not affected by the introduction of small nonlinearity. The difference in the decay laws for the two tasks was investigated.

## Normal-state Nernst coefficient in high-temperature superconductors of the Y-Ba-Cu-O system

*Martynova Olga<sup>1</sup>, Gasumyants V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Besides anomalously high values of the critical temperature high-temperature superconductors (HTSC) are well-known to be characterized by unusual properties in the normal (non-superconducting) state. One of the examples is the behavior of the transport coefficients, whose temperature and concentration dependences demonstrate a lot of specific features. Note, that despite a huge number of the experimental results devoted to an analysis of the temperature dependences of the resistivity, thermopower, and Hall coefficient collected

already in the first years of studying the HTSC-materials (see, for example, reviews [1-3] and references therein) data on the behavior of the Nernst coefficient,  $Q$ , are limited in number. The main reason for this is the fact that the quantitative analysis of the temperature dependences of the Nernst coefficient is impossible when one uses a model-independent approach.

For the above reasons, this paper is devoted to the comparative experimental study of the Nernst coefficient in Y-based HTSC samples with different types of doping, namely  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ( $x=0.09-0.39$ ),  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Zn}_x\text{O}_y$  ( $x=0.05-0.125$ ),  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  ( $x=0.025-0.2$ ),  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_y$  ( $x=0.1-0.4$ ) and  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_3$  ( $x=0.05-0.3$ ). The quantitative analysis of the results obtained was performed together with the data on the thermopower temperature dependences measured on the same samples using consistent model propositions on the energy spectrum structure in HTSC-materials. This approach is described in details in [5] and based on the narrow-band model [4] assumed the existence of a narrow density-of-state peak located near the Fermi level position.

For all the studied types of deviations from the stoichiometry the  $QT$  dependences are observed to remain qualitatively unchanged. The Nernst coefficient at  $T=300\text{K}$  is positive, with decreasing temperature it increases insignificantly, then the  $QT$  dependence demonstrates a broad maximum followed by a sharp fall of the  $Q$  value. The absolute  $Q$  values are very small (they do not exceed  $0.8\text{cm}^2/(\text{Vs})$  in mobility units for whole the studied doping range). A character of their changes with doping is different for studied systems. The  $Q$  ( $T=300\text{K}$ ) value increases essentially with increasing oxygen deficit in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , changes very insignificantly in  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  and  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$ , and decreases with  $x$  in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Zn}_x\text{O}_y$  and  $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{1.5}\text{La}_{0.5}\text{Cu}_3\text{O}_y$ .

The analysis of the results obtained was performed by the following way. First, the thermopower temperature dependences were analyzed within the narrow-band model [4] and the values of the main four parameters of the energy spectrum and charge-carrier system (the band filling with electrons, the total effective bandwidth, the portion of the delocalized states, and the asymmetry degree) were determined for each of the samples. These values were thereupon used when analyzing the  $Q(T)$  dependences that allowed us to determine additionally the values of the charge-carrier mobility,  $u$ , and the degree of the dispersion low asymmetry. The  $u$  values for all the samples were observed to be less than  $3\text{cm}^2/(\text{Vs})$  that is resulted from a narrowness of the conducting band. The variation of the mobility under doping is caused by two factors: i) a broadening of the conducting band resulting in a  $u$  increase; ii) an increase of the system disordering resulting in a  $u$  decrease. The relation between their influence degree determines the mobility variation under the given doping type. In the studied systems the  $u$  values change in a different ways, but in all the cases the  $u(x)$  dependence can be explained using the data on the variations of the main energy spectrum parameters obtained from the analysis of the thermopower temperature dependences. As for the dispersion low asymmetry, the results obtained make it possible to conclude that the existence of such an asymmetry is the fundamental property of the Y-based HTSC energy spectrum and its degree changes very insignificantly under varying sample composition.

## **Dynamic ferrite-ferroelectric magnonic crystal**

*Ustinova Irina*<sup>1</sup>, Nikitin A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The work is devoted to investigation of the transmission characteristics of dynamic magnonic crystal. Dispersion characteristics and transmission characteristics were calculated and analyzed. The results demonstrate electric and magnetic field tuning of the magnonic crystal band gaps.

## **The sol-gel transition in aqueous colloidal solutions of deagglomerated particles of detonation nanodiamond**

*Shvidchenko Aleksandr Valerievich*<sup>1</sup>, Aleksenskii A.E.<sup>1</sup>, Dideikin A.T.<sup>1</sup>,  
Eidelman E.D.<sup>1,2</sup>, Kirilenko D.A.<sup>1</sup>, Vul' A.Ya.<sup>1</sup>, Zhukov A.N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ioffe Institute

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Chemical Pharmaceutical Academy (SPCPA)

<sup>3</sup>Saint Petersburg State University

In recent time nanodiamonds produced by detonation synthesis from carbon of explosives attract increasing attention as a commercially available carbon nanostructures representing of interest to the various applications, including biomedical applications. However, a problem that the resulting particles of detonation nanodiamond are aggregates consisting of primary monodisperse nanoparticles with a size of 4 nm blocked widespread using of these particles for a long time. Only recently, methods of destruction detonation nanodiamond aggregates allowing to obtain substantially monodispersed hydrosols containing diamond particles with a size of about 4 nm have been developed [1-3]. It was found that increasing of the diamond particles concentration to 5 wt. % results in a reversible sol-gel transition titled thixotropy. Experimental evidence of such transition is given in the work. The mechanism of gel formation based on a model of formation of chains from diamond nanoparticles coupled by electrostatic interaction is suggested and the reasons for inability to obtain hydrogels of aggregates of nanodiamond particles are explained. The theoretical arguments and experimental data in favor of this mechanism are given. Electrical properties of these systems are studied. The study was partly supported by the Russian Scientific Foundation (project 14-12-00795).

## **Obtaining and study of the properties of composite materials based on chitosan and chitin's nanofibrils for cellular technologies**

*Yudenko Aleksandra*<sup>1</sup>, Dresvyanina E.N.<sup>2</sup>, Smirnova N.V.<sup>1</sup>, Ivan'kova E.M.<sup>2</sup>, Yudin V.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

<sup>2</sup>Institute of Macromolecular Compounds RAS

One of the most urgent tasks of materials science is the creation of matrices for cell-based technologies, which is based on biocompatible and bioresorbable materials. In turn, it is important for these materials and their decomposition products to not have toxicity. Recently, it has been shown on many polymers that the introduction of nanoparticles with different structures and forms can significantly improve the mechanical properties of composites. The materials of the cellulose's derivatives – chitin and chitosan are widely used in medicine and biology, since they do not have cytotoxicity and have high biocompatibility, biodegradability, are bactericidal, as well as show high sorption characteristics. Studies have shown that the introduction of chitin's particles in chitosan matrix increases the strength and elastic characteristics of composite fibers. Also the lack of genotoxicity of composite samples based on chitosan and chitin nanoparticles make it possible to use them as matrices for cell technologies. The introduction of 5 wt.% nanofibril chitin in chitosan matrix contributes to a more intensive adhesion and spreading of fibroblasts.

## **Study of nanomechanical oscillators based on amorphous C whiskers in vacuum and at atmospheric pressure**

*Lukashenko Stanislav Yurievich*<sup>1,3</sup>, Golubok A.O.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

<sup>2</sup>Institution of the RAS Saint Petersburg Academic University – Nanotechnology Research and Education Centre RAS

<sup>3</sup>The Institute for Analytical Instrumentation

Nanomechanical oscillators (NMO) on the basis of amorphous C nanowhiskers (CNW) localized on the tips of W needles are created and studied. Trajectories of single oscillations are visualized, resonant frequencies and quality factors of NMOs are determined in the vacuum with a residual pressure of 10<sup>-5</sup> torr and in the air. The evaluations of sensitivity to nanoscales based on CNW in the vacuum and in the air are conducted.

## **Elasticity of InP nanowires studied by AFM**

*Geydt Pavel*<sup>1</sup>, Dunaevskiy M.<sup>2</sup>, Haggren T.<sup>3</sup>, Kakko J.-P.<sup>3</sup>, Alekseev P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lappeenranta University of Technology

<sup>2</sup>Ioffe Institute

<sup>3</sup>Aalto University, Finland

Semiconductor nanowires were studied by methods of AFM PeakForce. Young's modulus was measured for InP nanowires less than 50 nm in diameter. Observed Elasticity-size dependence is in accordance with core-shell model for semiconductor nanowires.

## СОКРАЩЕНИЯ НАЗВАНИЙ ОРГАНИЗАЦИЙ

### **Aalto**

Aalto University, Finland

### **Abbe Center of Photonics**

Abbe Center of Photonics, Friedrich–Schiller-Universität Jena, Germany

### **Atominstitut**

Atominstitut, Vienna University of Technology, Austria

### **LUT**

Технологический университет Лаппеэнранта  
Lappeenranta University of Technology

### **АмГУ**

Амурский Государственный Университет  
Amur State University

### **БГПУ**

Благовещенский государственный педагогический университет  
Blagoveschensk State Pedagogical University

### **БГТУ**

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова  
Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D.F. Ustinov

### **БФУ**

Балтийский федеральный университет имени И. Канта  
Immanuel Kant Baltic Federal University

### **ВНИИЭФ**

Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

### **ГАО**

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН  
The Pulkovo Astronomical Observatory

### **ДВГУПС**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Far Eastern State Transport University

### **ЕНУ**

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва  
L.N.Gumilyov Eurasian National University

### **ИАП РАН**

Институт аналитического приборостроения РАН  
The Institute for Analytical Instrumentation

### **ИАТЭ НИЯУ МИФИ**

Обнинский институт атомной энергетики - филиал "Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"  
Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering

### **ИВС РАН**

Институт высокомолекулярных соединений РАН

Institute of Macromolecular Compounds RAS

### **ИЛФ СО РАН**

Институт лазерной физики СО РАН  
Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the RAS

### **Институт физики Тартуского университета**

Институт физики Тартуского университета  
Tartu liikool

### **ИНЦ**

Институт цитологии Российской Академии наук  
Institute of Cytology Russian Academy of Science

### **ИНЭПХФ РАН**

Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН

### **ИОНХ РАН**

Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН  
Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS

### **ИОФ РАН**

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН  
Prokhorov General Physics Institute, RAS

### **ИПМ**

Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН  
Keldysh Institute of Applied Mathematics

### **ИПМА**

Институт прикладной математики и автоматизации  
Institute of Applied Mathematics and Automation of KBSC of RAS

### **ИПМИ**

Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН  
Institute of Applied Mathematical Research of the Karelian Research Centre of the RAS

### **ИПТМУ РАН**

Институт проблем точной механики и управления РАН  
Institute of Precision Mechanics and Control, RAS

### **ИПФ РАН**

Институт прикладной физики РАН  
Institute of Applied Physics, RAS

### **ИСАН**

Институт спектроскопии РАН  
Institute of Spectroscopy RAS

### **ИТМО**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики  
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

### **ИТФ**

Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН  
L.D. Landau Institute for Theoretical Physics of RAS

Сокращения названий организаций

**ИФ им. И.П. Павлова РАН**

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН  
Pavlov Institute of Physiology

**ИФ СО РАН**

Институт физики им. Л. В. Киренского  
Сибирского отделения РАН  
L. V. Kirensky Institute of Physics of the Siberian  
Branch of the Russian Academy of Science

**ИФМ РАН**

Институт физики микроструктур РАН  
The Institute for Physics of Microstructures of the  
Russian Academy of Sciences

**ИФМ УрО РАН**

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения РАН  
M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural  
Branch of RAS

**ИФП НАНУ**

Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарева НАН Украины  
Institute of Semiconductor Physics NAS

**ИФП СО РАН**

Институт физики полупроводников Сибирского  
отделения РАН  
The Institute of Semiconductor Physics, Siberian  
Branch of the RAS

**ИХКиГ СО РАН**

Институт химической кинетики и горения им. В.В.  
Воеводского СО РАН  
Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and  
Combustion Siberian Branch of the RAS

**ИХФ РАН**

Институт химической физики им. Н.Н.Семенова  
РАН  
N.N. Semenov Institute of Chemical Physics

**ИЭРТ НАНУ**

Институт электрофизики и радиационных  
технологий Национальной академии наук  
Украины  
Institute of Electrophysics & Radiation  
Technologies National Academy of Sciences of  
Ukraine

**ИЯФ ПАН**

Институт ядерной физики Польской академии  
наук, Краков, Польша  
Institute of Nuclear Physics PAN

**ИЯФ СО РАН**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО  
РАН  
Budker Institute of Nuclear Physics

**КГТУ**

Калининградский государственный технический  
университет  
Kaliningrad State Technical University

**КемГУ**

Кемеровский государственный университет  
Kemerovo State University

**КФУ**

Казанский (Приволжский) федеральный  
университет  
Kazan (Volga region) Federal University

**КФУ им. В.И.Вернадского**

Крымский федеральный университет имени В. И.  
Вернадского  
V.I. Vernadsky Crimean Federal University

**Лаборатория теоретической физики им. А.А.  
Фридмана**

A. A. Friedmann Laboratory for Theoretical Physics

**МГТУ**

Московский государственный технический  
университет им. Н. Э. Баумана  
Bauman Moscow State Technical University

**МГУ**

Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова  
Lomonosov Moscow State University

**МГУ им. Н.П. Огарёва**

Мордовский национальный исследовательский  
государственный университет  
N.P.Ogarev Mordovia State University

**Медицинский колледж им. Альберта  
Эйнштейна**

Медицинский колледж им. Альберта Эйнштейна,  
Нью-Йорк  
Albert Einstein College of Medicine

**МИРЭА**

Московский государственный технический  
университет радиотехники, электроники и  
автоматики  
Moscow State Technical University of  
Radioengineering, Electronics and Automation

**МФТИ**

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
Moscow Institute of Physics and Technology  
(State University)

**НГТУ**

Новосибирский государственный технический  
университет  
Novosibirsk State Technical University

**НГУ**

Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет  
Novosibirsk State University

**НижГМА**

Нижегородская государственная медицинская  
академия  
Nizhny Novgorod State Medical Academy

**НИИ гриппа**

Научно-исследовательский институт гриппа  
Министерства здравоохранения РФ  
Research Institute of Influenza WHO National  
Influenza Centre of Russia



**НИТУ «МИСиС»**

Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»  
National University of Science and Technology  
"MISIS"

**НИУ «БелГУ»**

Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет  
Belgorod National Research University

**НИЦ КИ**

Национальный исследовательский центр  
«Курчатовский институт»  
Kurchatov Institute

**НИЯУ МИФИ**

Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
National Research Nuclear University MEPhI

**ННГУ им. Н.И. Лобачевского**

Нижегородский государственный университет им.  
Н.И. Лобачевского Национальный  
исследовательский университет  
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod -  
National Research University

**НовГУ**

Новгородский государственный университет  
имени Ярослава Мудрого  
Yaroslav-the-Wise Novgorod State University

**НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии»**

Nanostructured Materials and Nanotechnologies  
Science, Education & Innovation Centre

**НТЦ микроэлектроники РАН**

Научно-технологический центр микроэлектроники  
и субмикронных гетероструктур РАН  
Submicron Heterostructures for Microelectronics  
Research and Engineering Center of the RAS

**НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф.Иоффе**

Research and development center for thin-film  
technologies in energetics under Ioffe Institute

**НТЦ УИ РАН**

Научно-технологический центр уникального  
приборостроения РАН  
Scientific and Technological Center of Unique  
Instrumentation of the RAS

**ОГУ**

Оренбургский государственный университет  
Federal State Educational Government-financed  
Institution of Higher Professional Education  
"Orenburg State University"

**ОИЯИ**

Объединённый институт ядерных исследований  
Joint Institute for Nuclear Research

**ООО «Нитридные кристаллы»**

ООО "Нитридные кристаллы"  
Nitride Crystals Ltd

**ПГУ**

Полоцкий государственный университет  
Polotsk State University

**ПетрГУ**

Петрозаводский государственный университет  
Petrozavodsk State University

**ПНИЯФ**

Петербургский институт ядерной физики имени  
Б. П. Константинова  
Petersburg Nuclear Physics Institute

**РГПУ**

Российский государственный педагогический  
университет имени А. И. Герцена  
The Herzen State Pedagogical University of Russia

**РГРТУ**

Рязанский государственный радиотехнический  
университет  
Ryazan State Radio Engineering University

**СамГМУ**

Самарский государственный медицинский  
университет  
Samara State Medical University

**САО**

Специальная астрофизическая обсерватория  
Special Astrophysical Observatory RAS

**САФУ**

Северный (Арктический) федеральный  
университет  
Northern (Arctic) Federal University

**СГАУ**

Самарский Государственный Аэрокосмический  
Университет  
Samara State Aerospace University

**СГМУ**

Саратовский государственный медицинский  
университет им. В. И. Разумовского  
Saratov State Medical University

**СГУ**

Национальный исследовательский Саратовский  
государственный университет им. Н.Г.  
Чернышевского  
Saratov State University named after  
N.G. Chernyshevsky

**СибГАУ**

Сибирский государственный аэрокосмический  
университет им. М. Ф. Решетнёва  
Siberian State Aerospace University

**СибГМУ**

Сибирский государственный медицинский  
университет  
Siberian State Medical University

**СПб АУ РАН**

Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский Академический университет  
РАН  
Saint Petersburg Academic University of the RAS

Сокращения названий организаций

**СПб ИБГ**

Санкт-Петербургский Институт биорегуляции и геронтологии  
St. Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology

**СПбГТИ(ТУ)**

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
St. Petersburg State Technological Institute (technical university)

**СПбГУ**

Санкт-Петербургский государственный университет  
Saint Petersburg State University

**СПбГУТ**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича  
The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications

**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

**СПбПУ**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

**СПХФА**

Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия  
Saint-Petersburg State Chemical Pharmaceutical Academy (SPCPA)

**СФУ**

Сибирский федеральный университет  
Siberian Federal University

**ТГУ**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
the National Research Tomsk State University

**ТПУ**

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
the National Research Tomsk Polytechnic University

**УрФУ**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
Ural Federal University

**ФИАН**

Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН  
The P.N. Lebedev Physical Institute

**ФИЦ ИУ РАН**

Федеральный исследовательский центр Информатика и управление РАН

**ФТИ**

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
Ioffe Institute

**ЮТИ ТПУ**

Юргинский технологический институт Томский Политехнический Университет  
The National Research Tomsk Polytechnic University

**ЮФУ**

Южный федеральный университет  
Southern Federal University

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Астрономия и астрофизика</b>	<b>3</b>
Наблюдение и исследование сверхновых ИР: SN2012aw и SN2013ej на телескопах АЗТ-8 и LX200 <i>Мокрушина А. А.</i> .....	3
Тектоника земной литосферы в сферических функциях <i>Мохнаткин А. В., Петров С. Д., Горшков В. Л., Щербакова Н. В., Смирнов С. С., Трофимов Д. А.</i> .....	4
Условия для формирования голой сингулярности в метрике Вайдья <i>Вертоградов В. Д., Гриб А. А.</i> .....	5
Анализ туманности пульсарного ветра DA 495 и ее центрального объекта с использованием данных рентгеновских обсерваторий XMM-Newton и Chandra <i>Карпова А. В., Зюзин Д. А., Даниленко А. А., Шибанов Ю. А.</i> .....	6
Топологический анализ рекуррентных структур в гелиообусловленных временных рядах <i>Князева И. С., Макаренко Н. Г., Уртъев Ф. А.</i> .....	6
Диффузия в плотной неизотермической кулоновской плазме <i>Безногов М. В., Яковлев Д. Г.</i> .....	7
Оценка и анализ основных параметров галактических шаровых скоплений, полученных методом Q-коэффициентов <i>Скакун А. А., Шарина М. Е.</i> .....	8
Модель усиления магнитного поля в массивных звездных кластерах <i>Романский В. И., Гладилин П. Е., Осипов С. М., Быков А. М.</i> .....	9
Квазисинхронные базисные наблюдения опасного астероида 2004 BL86 <i>Башакова Е. А., Ляшенко А. Ю., Слесаренко В. Ю.</i> .....	9
О происхождении изолированного рентгеновского пульсара 1E161348-5055, с периодом 6,7 часа <i>Ким В. Ю., Ихсанов Н. Р.</i> .....	10
Структуры в планетезимальных дисках <i>Демидова Т. В., Шевченко И. И.</i> .....	10
Спектрополяриметрические наблюдения активных ядер галактик на БТА-6м <i>Булига С. Д., Гнедин Ю. Н., Афанасьев В. Л., Борисов Н. А., Нацвлишвили Т. М., Пиотрович М. Ю.</i> .....	11
Влияние светового давления на движение опасных астероидов <i>Мартюшева А. А.</i> .....	11
Эффект Лидова–Козаи в планетных системах кратных звезд HD 196885 и 16 Cygni <i>Боруха М. А., Эскин Б. Б., Мельников А. В., Соколов Л. Л., Шевченко И. И.</i> .....	12
Возможность замедления вращения ВР Ori из-за эффекта синхронизации <i>Шульман С. Г.</i> .....	13

Определение фрактальной размерности крупномасштабной структуры методом попарных расстояний <i>Герасим Р. В., Райков А. А., Орлов В. В.</i> .....	14
Астрометрические и фотометрические исследования астероидов (3100) Zimmerman, (3504) Kholshchevnikov, (4592) Alkissia, (4619) Polyakhova <i>Петрова С. Н., Горшанов Д. Л., Девяткин А. В., Львов В. Н.</i> .....	14
Работа приливных сил в окрестности вращающихся черных дыр для ультрарелятивистских частиц <i>Раушлова А. М., Гриб А. А.</i> .....	15
Инерция магнитного поля и динамика вращения радиопульсаров <i>Гогличидзе О. А., Барсуков Д. П., Цыган А. И.</i> .....	16
Изучение остатка сверхновой G350.0-2.0 в рентгеновском диапазоне <i>Карпова А. В., Зюзин Д. А., Даниленко А. А., Шибанов Ю. А., Штернин П. С.</i> .....	16
Первый промежуточный всплеск от SGR 1935+2154 (по данным эксперимента Конус-Винд) <i>Козлова А. В., Израэль Г. Л., Свинкин Д. С., Фредерикс Д. Д.</i> .....	17
Остывание нейтронной звезды в HESS J1731-347 <i>Офенгейм Д. Д., Каминкер А. Д., Клочков Д. К., Сулейманов В.Ф., Яковлев Д. Г.</i> .....	18
Наблюдения пульсара J1357–6429 в ближнем инфракрасном и радиодиапазоне <i>Кириченко А. Ю.</i> .....	19
Магнитные вихри в неравновесной релятивистской плазме пульсарных туманностей <i>Петров А. Е., Быков А. М.</i> .....	19
WASP-17b – возможно, первая удаляющаяся от родительской звезды экзопланета. Международная кампания по её наблюдениям <i>Соков Е. Н.</i> .....	20
<b>Атомная физика и физика элементарных частиц</b>	<b>21</b>
Исследования разрушения отрицательного иона водорода с молекулой водорода методом классических траекторий <i>Александрович О. В., Тюканов А. С., Беляев А. К.</i> .....	21
Электронная экранировка при измерении сечений реакций ядерного синтеза в лабораторных условиях <i>Мелузова Д. С., Зиновьев А. Н.</i> .....	22
Численное моделирование поглощения рентгеновского излучения модифицированным ABS-пластиком <i>Милойчикова И. А., Стучебров С. Г.</i> .....	23
Изучение корреляций средних значений поперечных импульсов частиц, рождающихся в ядро-ядерных соударениях в рамках blast-wave модели <i>Сокольский В. В., Алцыбеев И. Г.</i> .....	25

Исследование воздействия двухмикронного лазерного излучения на внутреннюю стенку венозного сосуда <i>Чабушкин А. Н., Рябочкина П. А., Беляев А. А., Кузнецова О. А., Ляпин А. А., Хрущалина С. А.</i> .....	26
Влияние изотопического замещения Н+ на динамику фазовых превращений в бычьем сывороточном альбумине <i>Вашченков В. Э., Дмитриев А. В., Федосеев А. И., Лушников С. Г.</i> .....	27
Компьютерное моделирование микроструктуры фрагментов губчатой костной ткани для исследования напряженно-деформированного состояния <i>Ластовкина Е. Н., Колмакова Т. В.</i> .....	28
Исследование вторичной структуры БСА и овальбумина методом ИК-спектроскопии <i>Абросимова К. В., Шуленина О.В., Пастон С.В.</i> .....	29
Дизайн активного центра трегалоза/мальтоза-связывающего белка как чувствительного элемента биосенсора на глюкозу <i>Пивоваров В. А., Фонин А. В., Рычков Г. Н.</i> .....	30
Взаимодействие ДНК с пиперазиновыми производными бензоимидазофталазина <i>Осинникова Д. Н., Морощкина Е. Б., Травкина В. И.</i> .....	32
Конформации макромолекул полиэлектролитов с различной плотностью заряда в растворах разных ионных сил <i>Доммес О. А., Павлов Г. М., Окатова О. В.</i> .....	33
Взаимодействие коротких пептидов KE и KEDW с ДНК <i>Болдырев А. Ю., Морозова Е. А., Кузнецова Е. П., Касьяненко Н. А.</i> .....	34
Исследование систем ДНК-наночастицы и ДНК-нанокластеры в растворе и на поверхности <i>Варшавский М. С.</i> .....	36
Теоретическое изучение конформационных переходов в изолированной линейной цепи, внедрённой в полимерную шётку из звездообразных макромолекул <i>Казаков А. Д., Полоцкий А. А., Бирштейн Т. М.</i> .....	37
Компьютерное моделирование комплексов ДНК с водорастворимыми поликатионами <i>Кондинская Д. А., Кострицкий А. Ю., Нестеренко А. М., Антипина А. Ю., Гуртовенко А. А.</i> .....	38
Адсорбция катионных полимеров на поверхности бактериальных мембран. Компьютерное моделирование <i>Кострицкий А. Ю., Кондинская Д. А., Нестеренко А. М., Гуртовенко А. А.</i> .....	40
Исследование механических напряжений изолированных сегментов сосудов и воздухоносных путей животных <i>Тургунова Н. Д., Алейник А. Н., Носарев А. В.</i> .....	41
Анализ морфологии эритроцитов методом полихроматической интерференционной микроскопии тонких пленок <i>Дьяченко А. А., Малинова Л. И., Рябухо В. П.</i> .....	43
Изучение влияния нуклеотидного состава ДНК на динамику фазовых превращений <i>Дмитриев А. В., Вашченков В. Э., Захаров Г. А., Федосеев А. И., Савватеева- Попова Е. В., Лушников С. Г.</i> .....	45

Расширенная кинетическая модель процесса полимеразной цепной реакции в реальном времени <i>Федоров А. А., Сочивко Д. Г.</i> .....	46
Биливердин как хромофор ближне-инфракрасных биомаркеров <i>Бубликов Г. С., Степаненко Олеся В., Щербакова Д. М., Кузнецова И. М., Верхуша В. В., Туроверов К. К.</i> .....	47
Взаимодействие катионных агентов с молекулами малых интерферирующих РНК и ДНК <i>Унксов И. Н., Слита А. В., Петрова А. В., Перевязко И. И., Бакулев В. М., Ролич В. И., Бондаренко А. Б., Касьяненко Н. А.</i> .....	49
Исследование условий воспроизводимой генерации и сортировки эмульсий «вода в масле» в микрофлюидном чипе для скрининга клеточных библиотек <i>Филатов Н. А., Букатин А. С.</i> .....	50
Разработка микроэлектродов для регистрации электрофизиологической активности нейрональных культур in vitro <i>Мальшев Е. И., Фризюк К.С., Пимашкин А. С., Гладков А. А., Букатин А. С., Вдовичев С. Н., Казанцев В. Б., Мухина И. В., Дубина М. В.</i> .....	52
Исследование характеристик электретных микрофонов для разработки конструкции датчика внутричерепного давления <i>Сумовский А. С., Андреева А. В., Лютецкий Н. А.</i> .....	53
Экспериментальное и теоретическое исследование конформационных изменений, вызванных действием терагерцового излучения, в пролин-содержащих фрагментах глобулярных белков <i>Немова Е. Ф., Кобзева Т. В.</i> .....	54
Моделирование начальных этапов кристаллизации белка при встречной диффузии в капиллярах <i>Соколовский А. С., Елисеев И. Е., Юденко А. Н.</i> .....	55
<b>Матфизика и численные методы</b>	<b>57</b>
Численное моделирование гидрирования циркониевого сплава <i>Родченкова Н. И., Заика Ю. В.</i> .....	57
Noise-induced phase transition in an autocatalytic chemical system <i>Фам М. Т., Вирченко Юрий Петрович</i> .....	58
Динамика нагрева твердого тела под действием электронного пучка <i>Машиков К. В., Загорянская М. В.</i> .....	60
Многочастичные эффекты в оптическом поглощении LiN <sub>3</sub> <i>Филиппов С. И., Гордиенко А. Б.</i> .....	61
Функции Ванье тройных полупроводников со структурой халькопирита <i>Филиппов Д. И., Гордиенко А. Б.</i> .....	62
Численное моделирование ТДС-спектра в нелинейной краевой задаче термодесорбции водорода <i>Костикова Е. К., Заика Ю. В.</i> .....	64
Зонная структура спектра одномерного фотонного кристалла с метаматериалами <i>Правдин К. В., Попов И. Ю.</i> .....	66

Обобщенная математическая модель разгона поршня продуктами сгорания с осесимметричным канале переменного сечения <i>Быков Н. В., Власова Н. С., Нестеренко Е. А.</i> .....	67
Численное моделирование электрического взрыва проводников <i>Ряховский А. И.</i> .....	68

## **Наноструктурированные и тонкопленочные материалы** 70

Эффект близости в гибридной структуре ферромагнетик-полупроводник <i>Калитухо И. В., Коренев В. Л., Акимов И. А.</i> .....	70
Магнитный линейный дихроизм фотоэмиссии электронов из сверхтонких пленок силицидов переходных металлов <i>Гребенюк Г. С., Гомоюнова М. В., Пронин И. И.</i> .....	71
Повышение квантовой эффективности каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе псевдоморфных наногетероструктур, выращенных методом МОСГФЭ, за счет фотоэффекта в массиве InAs квантовых точек <i>Салий Р. А., Минтаиров С. А., Надточий А. М., Паюсов А. С., Брунков П. Н., Неведомский В. Н., Калюцкий Н. А.</i> .....	73
Спектроскопические свойства коллоидных растворов суперпарамагнитных наночастиц Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> <i>Смердов Р. С., Бочарова Т. В., Гареев К. Г.</i> .....	74
Синтез композитных структур на основе тригональных кристаллов GaBO <sub>3</sub> и FeBO <sub>3</sub> <i>Мустафаева С. М., Матвиенко М. П., Могиленец Ю. А., Максимова Е. М., Наухацкий И. А., Стругацкий М. Б., Ягупов С. В.</i> .....	76
Энергетический спектр InSb/AlAs квантовых точек <i>Румынин К. М., Абрамкин Д. С., Бакаров А. К., Гутаковский А. К., Шамирзаев Т. С.</i> .....	77
Структурно-морфологические особенности ультратонких эпитаксиальных пленок InSb в матрице AlAs <i>Колотовкина Д. А.</i> .....	78
Ионный синтез нанокристаллов InSb в имплантированных ионами In <sup>+</sup> и Sb <sup>+</sup> захороненных пленках SiO <sub>2</sub> <i>Дзюбина Л. Л., Черков А. Г., Володин В. А., Тыщенко И. Е.</i> .....	79
Многослойный нейтронный монохроматор-поляризатор на основе железа <i>Чжоу З. Л., В. Г. Сыромятников.</i> .....	81
Химический состав и ранние стадии графитизации деагрегированных частиц детонационного наноалмаза <i>Шестаков М. С., Алексенский А. Е., Байдакова М. В., Дидейкин А. Т., Швидченко А. В., Шнитов В. В., Кидалов С. В., Вуль А. Я.</i> .....	81
Влияние диссипации на спектр плазмонных резонансов в нанокompозитах металл-диэлектрик <i>Олехно Н. А., Бельтюков Я. М., Паршин Д. А.</i> .....	82
Новый эталон размеров для динамического рассеяния света на основе детонационных наноалмазов <i>Коняхин С. В., Швидченко А. В.</i> .....	84

Исследование фотоиндуцированной деградации в тандемных фотопреобразователях на основе a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H <i>Титов А. С., Абрамов А. С., Андроников Д. А., Емцев К. В., Семенов А. Ф., Терукова Е. Е., Яковлев С. А.</i> .....	85
Структурные изменения в жидком Ga-In эвтектическом сплаве в условиях наноконфайнмента <i>Нефедов Д. Ю., Чарная Е. В., Naase J., Michel D., Кумзеров Ю. А.</i> .....	87
Исследование слоёв ZnO, полученных методом спрей-пиролиза <i>Семенова А. А., Лашкова Н. А., Матюшкин Л. Б., Сомов П. А., Максимов А. И.</i> .....	88
Сенсоры высоких температур на основе 4H-SiC структур диодов Шоттки <i>Деменский А. Н., Ерохин С. Ю., Краснов В. А., Шутов С. В.</i> .....	90
Исследование структурных особенностей CoFe — нанотрубок, полученных методом темплатного синтеза <i>Шлимас Д. И., Козловский А. Л., Алешова Н. Е., Мейримова Т. Ю., Кадыржанов К. К.</i> .....	92
ЯМР исследования сегнетоэлектрического перехода в объемном и наноструктурированном $\text{KN}_2\text{PO}_4$ <i>Ускова Н. И., Барышников С. В., Подорожкин Д. Ю., Чарная Е. В.</i> .....	93
Исследование влияния термического отжига на проводящие свойства Zn-нанотрубок <i>Мейримова Т. Ю., Козловский А. Л., Алешова Н. Е., Шлимас Д. И., Кадыржанов К. К.</i> .....	94
Дефектная структура, механические свойства и термостабильность наноструктурного титана, полученного при различных видах прокаток <i>Нарыкова М. В., Бетехтин В. И., Кадомцев А. Г., Колобов Ю. Р., Sklenicka V.</i> .....	95
Технология создания сверхтвердых покрытий на основе тонких пленок $\text{AlMgB}_{14}$ <i>Юзвюк М. Х., Гришин А. М., Путролайнен В. В.</i> .....	97
Исследование деформации монокристаллов $\text{SrTiO}_3$ и $\text{BaTiO}_3$ вследствие обратного флексоэлектрического эффекта <i>Румянцева Е. Д., Залесский В. Г.</i> .....	98
Кристаллизация пленок аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) при облучении фемтосекундными лазерными импульсами <i>Петров М. А., Белик В.П., Васютинский О.С, Кукин А.В., Попов Р.С, Теруков Е.И.</i> .....	100
Разработка системы поточного синтеза полупроводниковых и металлических наночастиц <i>Рыжов О. А., Матюшкин Л. Б., Мбванче Ритсох Корнелиус I</i> .....	101
Фрактальный и мультифрактальный анализ наноструктурированных материалов на основе системы Zn-Sn-O <i>Абрашова Е. В.</i> .....	103
Температурная зависимость диэлектрических потерь в композитах на основе полиэтилена и титаната бария <i>Шатихина И. В., Кастро Р. А., Кононов А. А.</i> .....	104



Выращивание методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур со слоями оксидов и их исследование методом рентгеновского магнито-циркулярного дихроизма <i>Петрова Ю. Ю., Сутурин С. М.</i> .....	105
Исследования спинодального распада в образце твердого раствора арсенида-селенида галлия методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей при энергиях вблизи краев поглощения As и Se <i>Шарков М. Д., Бойко М. Е., Бобыль А. В., Бойко А. М., Конников С. Г.</i> .....	106
Синтез коллоидных нанокристаллов селенида цинка, легированных марганцем <i>Никифорова А. В., Мазинг Д. С., Александрова О. А., Мошников В. А.</i> .....	107
Эффекты резистивного переключения в композитных плёнках полимер-частицы графена (оксида графена) <i>Крылов П. С., Берестенников А. С., Алёшин А. Н.</i> .....	108
Оптическая визуализация тонких пленок графена на прозрачных подложках <i>Рабчинский М. К., Дидейкин А. Т.</i> .....	110
Структурные исследования углеродной пленки с графеновыми включениями <i>Михайлина А. А.</i> .....	111
Исследование электрических свойств и дефектоскопия нанокompозитов на основе диоксида кремния и полимеров с добавлением углеродных нанотрубок <i>Осокин К. С., Есеев М. К., Гошев А. А., Капустин С. Н., Хорodeк П., Кобец А. Г.</i> .....	113
Исследование нанопроводов оксида цинка выращенных на золь-гель слоях гидротермальным методом <i>Сомов П. А., Бобков А. А.</i> .....	114
Синтез легированных медью коллоидных нанокристаллов селенида цинка, люминесцирующих в сине-зеленой области спектра <i>Мазинг Д. С., Чернагузов И. С., Александрова О. А., Мошников В. А.</i> .....	116
Локальное усиление магнитного поля в вакууме с помощью диэлектрических наноструктур <i>Барышникова К. В., Шалин А. С., Гинзбург П. Б.</i> .....	117
Транспорт носителей заряда в композитных структурах на основе биоцеллюлозы, модифицированной проводящим полимером PEDOT/PSS <i>Берестенников А. С., Крылов П. С., Алешин А. Н.</i> .....	118
Влияние суперпарамагнитных наночастиц на разделение электромиграционными методами анализа <i>Федоров А. А., Буляница А. Л., Шмыков А. Ю., Красовский А. Н., Осмоловская Н. А.</i> .....	119
Магнитные свойства сверхпроводящих нанокompозитов на основе индия в пористых диэлектрических матрицах <i>Михайлин Н. Ю., Козуб В. И., Кумзеров Ю. А., Парфеньев Р. В., Сысоева А. А., Фокин А. В., Шамшур Д. В.</i> .....	120

## Оптика и спектроскопия

121

Оптические исследования резонансных характеристик металлических наностроек: влияние размера частиц и поляризации света

*Пилюгина Е. С., Щербак С. А., Хейслер Ф., Червинский С. Д.*..... 121

Спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кристаллов $ZrO_2 \cdot Y_2O_3 \cdot Er_2O_3$ <i>Чабушкин А. Н., Рябочкина П. А., Ляпин А. А., Сидорова Н. В.</i> .....	123
Особенности аналитического решения уравнений Максвелла для квантовой ямы под покрывающим слоем <i>Шапочкин П. Ю., Капитонов Ю. В., Ловцюс В. А., Елисеев С. А., Ефимов Ю. П., Петров В. В., Овсянкин В. В.</i> .....	123
Исследование спектрально-люминесцентных свойств наноразмерных кристаллов $Y_{1-x}Yb_xPO_4$ и $Y_{1-x}Yb_xPO_4 \cdot 0.8H_2O$ ( $x = 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ), активированных ионами $Er^{3+}$ <i>Хрущалина С. А., Ванцев А. С., Гайтко О. М., Кяшкин В. М., Рябочкина П. А., Силдос И., Табачкова Н. Ю.</i> .....	125
Сечение поглощения двухчастичных кластеров из однородных и слоистых проводящих наночастиц с вырожденным электронным газом <i>Налбандян В. М., Кучеренко М. Г.</i> .....	126
Рассеяние света неидеальным газом Бозе-Эйнштейна в условиях сильного вырождения <i>Ежова В. М., Герасимов Л. В., Куприянов Д. В.</i> .....	128
Оптические Таммовские состояния в фотоннокристаллической структуре на основе холестерического жидкого кристалла <i>Пятнов М. В., Ветров С. Я., Тимофеев И. В.</i> .....	128
Радиационные переходы при столкновении $H + H$ <i>Даданова А. В.</i> .....	129
Короткопериодная дифракционная решетка для ввода света в плоский волновод полного внутреннего отражения <i>Ложкина О. А., Ложкин М. С., Капитонов Ю. В., Манухова А. Д., Шапочкин П. Ю., Ефимов Ю. П., Елисеев С. А., Ловцюс В. А., Петров В. В., Козлов Г. Г., Овсянкин В. В.</i> .....	131
Временная самокомпрессия сходящихся пучков chirпированного излучения с тонким кварцем <i>Грудцын Я. В., Михеев Л. Д., Корибут А. В., Трофимов В. А.</i> .....	133
Учёт взаимодействия Брейта и КЭД поправок при вычислении спектров магнитоподобных ионов <i>Коновалова Е. А., Козлов М. Г.</i> .....	134
Спектр параметрического излучения в резонансном режиме генерации фотонов <i>Левченко А. В., Трифанов А. И.</i> .....	135
Нелинейная динамика спектра экситонного отражения <i>Беляев Л. Ю., Овсянкин В. В., Строганов Б. В., Петров В. В., Ефимов Ю. П., Долгих Ю. К., Елисеев С. А., Капитонов Ю. В.</i> .....	136
Способы возбуждения и регистрации ОДМР азотно-вакансионных центров в алмазе в схеме микроразмерного квантового магнитометра <i>Дмитриев А. К., Вершовский А. К.</i> .....	137
Решение обратной задачи лазерной корреляционной спектроскопии для анализа состава полидисперсных растворов <i>Непомнящая Э. К., Величко Е. Н., Аксенов Е. Т.</i> .....	139
Спин-зависимые эффекты в кристаллах гранатов с примесью церия и гадолиния <i>Успенская Ю. А., Гурин А. С., Толмачев Д. О., Асатрян Г. Р., Романов Н. Г., Баранов П. Г.</i> .....	140

Влияние длины волны и дозы возбуждающего излучения на фотосенсибилизированную генерацию синглетного кислорода	
<i>Ильина А. Д., Васютинский О. С., Глазов А. Л.</i> .....	141
Исследование ECV-методом ионно-имплантированных фоточувствительных структур для ПЗС-матриц с обратной засветкой с целью оптимизации параметров приборов на их основе	
<i>Яковлев Г. Е., Фролов Д. С., Зубков В. И.</i> .....	142
Новый метод исследования потоков жидких сред на основе ядерно-магнитной спектроскопии и рассеянного лазерного излучения	
<i>Вологдин В. А., Давыдов В. В.</i> .....	144
Исследование объема частиц с высокой плотностью на основе анализа отношения пика корреляционной функции к пьедесталу	
<i>Вовк Т. А., Петров Н. В., Николаева Т. Ю.</i> .....	146
Исследование кинетики флуоресценции фотосенсибилизатора и фосфоресценции синглетного кислорода в зависимости от концентрации кислорода в воде	
<i>Бельтюкова Д. М., Васютинский О. С., Глазов А. Л., Семенова И. В.</i> .....	148
Спектроскопия и оптические свойства люминофоров на основе редкоземельных гранатов, синтезированных в условиях высокого давления	
<i>Юсуф А. А., Галашов Е. Н., Мандрик Е. М.</i> .....	149
Особенности формирования индикатрисы селективного фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$	
<i>Максименко В. А., Данилова Е. В.</i> .....	150
Оптическая анизотропия кубических фотонных кристаллов в условиях многомодового распространения света	
<i>Уклеев Т. А., Юрасова Д. И., Шевченко Н. Н., Селькин А. В.</i> .....	151
Влияние оболочки наночастиц серебра на флуоресценцию родамина бж в пленке поливинилового спирта	
<i>Константинова Е. И., Слежкин В. А., Брюханов В. В.</i> .....	153
Измерение пространственного распределения температуры микрообъектов, находящихся при высоких давлениях, на основе акустооптической спектральной фильтрации изображений	
<i>Мачихин А. С.</i> .....	155
Контроль процесса децеллюляризации кожных биоматриц методом спектроскопии комбинационного рассеяния	
<i>Периуткина С. В., Шалковская П. Ю., Тимченко Е. В., Тимченко П. Е., Волова Л. Т.</i> .....	156
Применение метода спектроскопия комбинационного рассеяния для диагностики заболеваний тканей зуба	
<i>Кулабухова А. Ю., Тимченко П. Е., Тимченко Е. В., Жердева Л. А., Волова Л. Т.</i> .....	157
Исследование сигналов когерентного пленения населенностей на атомах $^{87}\text{Rb}$ в ячейках с буферным газом	
<i>Федоров М. И., Ермак С. В., Петренко М. В., Пяташев Е. Н., Семенов В. В.</i> .....	159
Квантовые магнитометры как основа для стандарта частоты	
<i>Сагитов Э. А., Ермак С. В., Петренко М. В., Семенов В. В.</i> .....	160

Одновременное детектирование излучательной и безызлучательной релаксации синглетного кислорода в биологических объектах на клеточном уровне <i>Белашов А. В., Семенова И. В., Петров Н. В., Васютинский О. С.</i> .....	160
Диэлектрическая спектроскопия кристаллов силленитов $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}$ <i>Набиуллина Л. А., Кастро Р. А., Шадрин Е. Б.</i> .....	161
Широкополосное преобразование излучения СО-лазера в нелинейном кристалле $\text{AgGaSe}_2$ <i>Будилова О. В., Ионин А. А., Киняевский И. О., Климачев Ю. М., Козлов А. Ю., Котков А. А.</i> .....	163
Динамика фононных мод, возбужденных с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в сегнетоэлектрике-полупроводнике $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ <i>Гришунин К. А., Брехов К. А., Шерстюк Н. Э., Мишина Е. Д.</i> .....	164
Влияние сульфидной пассивации поверхности на излучательную рекомбинацию в двойных квантовых ямах $\text{CdSe/ZnSe}$ с самоорганизованными квантовыми точками <i>Еременко М. В., Берковиц В. Л., Львова Т. В., Резницкий А. Н., Улин В. П.</i> .....	166
Исследование квантовой эффективности гетероструктур на основе соединений $\text{A}^3\text{B}^5$ после травления сфокусированным ионным пучком <i>Митрофанов М. И., Евтихийев В. П., Смирнов А. Н.</i> .....	167
Моделирование спектров полярных оптических фононов множественных квантовых ям и сверхрешеток $\text{GaN/AlN}$ <i>Панькин Д. В., Смирнов М. Б.</i> .....	168
Исследование каскада фазовых переходов в мультиферроике $\text{CuV}_2\text{O}_4$ методом поляризационной спектроскопии. <i>Молчанова А. Д., Болдырев К. Н., Попова М. Н., Писарев Р. В.</i> .....	170
Длинноволновая ИК-спектроскопия самариевого хромового бората со структурой хангита <i>Добрецова Е. А., Болдырев К. Н., Гаврилкин С. Ю., Мухин А. А., Иванов В. Ю., Мальцев В. В., Леонюк Н. И.</i> .....	171
<b>Оптоэлектронные приборы</b>	<b>173</b>
Исследование возможности кодирования и декодирования информации, переносимой стохастическим сверхширокополосным световым потоком <i>Глухов В. А., Куликов И. Р., Толмачев Ю. А.</i> .....	173
Селективные фоточувствительные структуры $\text{Au-AlGaN}$ для диапазона длин волн 350 – 370 нм <i>Ламкин И. А., Тарасов С. А., Соломонов А. В., Курин С. Ю.</i> .....	174
Оптическая обратная связь и эффективность управления в мощных лазерх-тиристорах, излучающих на 905 нм <i>Соболева О. С., Подоскин А. А., Захаров М. С., Золотарев В. В., Бахвалов К. В., Рожков А. В., Веселов Д. А., Соколова З. Н., Романович Д. Н., Пихтин Н. А., Тарасов И. С., Слипченко С. О.</i> .....	175
Электронейтральность и зонная диаграмма лазера на КТ с модулированным легированием <i>Коноплев С.С., Савельев А. В.</i> .....	177
Управление селекцией мод кольцевых микрорезонаторов <i>Левецкий Я. В., Евтихийев В. П.</i> .....	178

Светоизлучающие структуры на основе коллоидных квантовых точек сульфида кадмия, обладающие высоким индексом цветопередачи <i>Степанов Е. М., Михайлов И.И., Тарасов С. А., Соломонов А. В.</i> .....	180
Трехкоординатный интерферометр для измерения перемещений субнанометрового разрешения <i>Казиева Т. В., Кузнецов А. П., Губский К. Л., Решетов В. Н., Понарина М. В.</i> .....	181
Фотоэлектрические свойства чувствительных к водороду диодов Шоттки Pd-оксид-InP <i>Шутаев В. А., Именков А. Н., Гребенщикова Е. А., Яковлев Ю. П.</i> .....	183
Оптический пинцет на основе лабораторного микроскопа <i>Чистяков Д.В., Лосев С.Н., Дюделев В.В., Когновицкая Е.А., Соколовский Г.С.</i> .....	184
Высокотемпературная лазерная генерация в инжекционных микродисковых резонаторах с активной средой на основе квантовых точек InAs/InGaAs <i>Моисеев Э. И., Крыжановская Н. В., Кудашова Ю. В., Жуков А. Е., Максимов М. В., Кулагина М. М., Трошков С. И., Задиранов Ю. М., Липовский А. А., Блохин С. А., Бобров М. А.</i> .....	185
Печатные устройства памяти на основе эффекта резистивных переключений в полимерных композитных материалах <i>Котова М. С., Дронов М. А., Дубинина Т. В.</i> .....	187
Исследование влияния свойств границ раздела структуры ультрафиолетовых светодиодов на коэффициент вывода излучения <i>Евсеевков А. С., Тарасов С. А., Соломонов А. В., Курин С. Ю.</i> .....	188
Исследование температурных характеристик ультрафиолетовых светодиодов на основе нитридных твердых растворов <i>Евсеевков А. С., Тарасов С. А., Соломонов А. В., Курин С. Ю.</i> .....	189
Исследование упругих напряжений в буферных слоях AlN в процессе их роста методом плазменно-активированной молекулярно пучковой эпитаксии на различных гетероподложках (c-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 6H-SiC) <i>Золотухин Д. С.</i> .....	190

## **Поверхностные явления** **192**

---

Форма равновесной поверхности мениска в цилиндрических капиллярах с учетом размерной зависимости поверхностного натяжения <i>Сокуров А. А.</i> .....	192
Энергетический анализ автоэлектронной эмиссии из карбида кремния <i>Трофимов В. В., Никифоров К. А., Егоров Н. В.</i> .....	193
Исследование топологического изолятора Vi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> методом ЯМР <i>Антоненко А. О., Чарная Е. В., Подорожкин Д. Ю., Мухамадьяров Р. И., Марченков В. В., Наумов С. В., Huang J. C. A., Weber H. W., Бугаев А. С.</i> .....	194
Определение свободной поверхностной энергии высокодисперсных сырьевых составляющих композиционных материалов <i>Дроздюк Т. А., Морозова М. В., Фролова М. А., Айзенштадт А. М.</i> .....	195
Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия поверхности бумаги <i>Соболева Е. А., Оваско С.-С., Бакфолк К., Люютикайнен Й.</i> .....	197

Длина спиновой релаксации в тонких пленках палладия <i>Павлов А. В., Устинов А. Б., Петров В. Н.</i> .....	198
Накопление заряда на сколах GaAs гетероструктур в области р-п перехода <i>Михайлов А. О., Алексеев П. А., Шаров В. А., Дунаевский М. С.</i> .....	198
Детектирование излучения полупроводникового лазера при помощи сканирующего зондового микроскопа <i>Шаров В. А., Алексеев П. А., Дунаевский М. С., Михайлов А. О.</i> .....	200

## **Приборы и материалы ТГц и СВЧ диапазона 201**

---

Синтез Cu-Diamond/MoC композитов методом горячего изостатического прессования <i>Юсуф А. А., Галашов Е. Н., Мандрик Е. М.</i> .....	201
Моделирование магнитного поля вигглера на ускорителе LUCX в программе Radia <i>Сутыгина Я. Н., Харисова А. Е., Шкитов Д. А.</i> .....	202
Разработка полупроводникового метаморфного буфера для изготовления СВЧ транзисторов <i>Лазаренко А. А., Соболев М. С., Пирогов Е. В., Никитина Е. В., Егоров А. Ю.</i> .....	204
Управление спектром фазовых шумов генераторов на основе спин-волновых линий задержки <i>Дроздовский А. В., Устинов А. Б.</i> .....	205
Микрополосковый диплексер на основе двухмерного фотонного кристалла <i>Ходенков С. А.</i> .....	207
Исследование микрополосковых фильтров с широкой полосой заграждения <i>Ходенков С. А.</i> .....	208
Новая схема формирования сигнала СВЧ возбуждения для квантового стандарта частоты на атомах цезия -133 <i>Петров А. А., Давыдов В. В.</i> .....	210
Исследование волновых процессов в мультиферроидных структурах на основе модулированной по ширине щелевой линии передачи <i>Никитин А. А., Витько В. В., Никитин А. А., Устинов А. Б.</i> .....	211
Многофакторный характер отклика частично упорядоченных сред различной дисперсности на СВЧ облучение в процессе самоорганизации <i>Градов О. В., Градова М. А.</i> .....	212
Сверхвысокочастотный динамический хаос гибридных электромагнитно-спиновых волн в активных кольцах на основе мультиферроиков <i>Кондрашов А. В., Устинов А. Б.</i> .....	214
СВЧ фильтр на кольцевом резонаторе <i>Ходенков С. А.</i> .....	215
Спин-волновой согласованный фильтр на активном кольцевом резонаторе <i>Мартынов М. И., Никитин А. А., Калиникос Б. А., Устинов А. Б.</i> .....	217
Измерительная ячейка для исследования СВЧ-свойств дельта-легированных алмазных образцов <i>Витько В. В., Кондрашов А. В., Никитин А. А., Белявский П. Ю., Устинов А. Б., Батлер Дж. Э.</i> .....	218

Исследование планарных сегнетоэлектрических конденсаторов на ферритовых подложках для СВЧ фильтра с двойным управлением <i>Витько В. В., Белявский П. Ю., Мыльников И. Л.</i> .....	220
--	-----

## **Примеси и дефекты в твердом теле** **222**

---

Синтез и исследование монокристаллов GaVO <sub>3</sub> :Ni <i>Скуткявичюте К. Р., Могиленец Ю. А., Селезнева К. А., Стругацкий М. Б., Ягупов С. В.</i> .....	222
Влияние замещения железа на элементы IV группы (Ge, Sn, Pb) на структуру, электрические и магнитные свойства сверхпроводящих халькогенидов железа <i>Русаков В. А., М.П. Волков, Б.А-Т. Мелех, Н.Ф. Картенко</i> .....	223
Исследование вакансионных спиновых центров в ромбическом карбиде кремния методами ДЭЯР и ОДМР <i>Анисимов А. Н., Баранов П. Г., Бабунц Р. А., Бадалян А. Г., Ильин И. В., Романов Н. Г., Музафарова М. В., Солтамов В. А., Толмачев Д. О., Явкин Б. В.</i> .....	224
Особенности генерации второй гармоники на границах наноразмерных микрокристаллов дихалькогенидов переходных металлов <i>Шестакова А. П., Лавров С. Д., Мишина Е. Д.</i> .....	225
Пик поглощения ультразвука в ZnSe:Cr в малых магнитных полях <i>Барышников К. А.</i> .....	226
Масс-спектрометрическое исследование веществ при малых энергиях ионизирующих электронов <i>Романов П. А., Федичкин И. Л., Попов Е. О., Филиппов С. В., Колосько А. Г.</i> .....	227

## **Физика и технология преобразования энергии** **229**

---

Фоторазложение воды до водорода с использованием тиоксантеновых красителей <i>Глухова Я.С., Поняев А.И.</i> .....	229
Физико-технические аспекты эффективного применения сегнетоэлектриков для увеличения удельной мощности и удельной энергии устройств альтернативной энергетики <i>Зубцов В. И., Зувцова Е. В.</i> .....	230
Исследование электрокалорического эффекта в керамических сегнетоэлектриках <i>Белявский П. Ю., Еськов А. В., Анохин А. С., Мыльников И. Л., Пахомов О. В., Семенов А. А.</i> .....	232
Фотоэлектрический и фотомагнитный отклик пленок ИТО <i>Пляцов С. А., Мешковский И. К.</i> .....	233
Дополнительный вклад в термоэдс в нанокристаллических пленках системы Cr-Si <i>Новиков С. В., Бурков А. Т.</i> .....	235
Влияние нитридной химической пассивации поверхности на характеристики GaAs фотодиодов <i>Контрош Е. В., Лебедева Н. М., Калиновский В. С., Солдатенков Ф. Ю., Улин В. П.</i> .....	236

Угловая зависимость квантовых осцилляций магнитосопротивления в сильно анизотропных слоистых квазидвумерных проводниках <i>Могилюк Т. И., Григорьев П. Д.</i> .....	238
Изучение динамики отрицательной циркулярной поляризации люминесценции квантовых точек InP/InGaP в поперечном магнитном поле <i>Некрасов С. В., Кусраев Ю. Г.</i> .....	239
Измерение спин-волновой жесткости в гелимагнетиках методом малоуглового рассеяния нейтронов <i>Суханов А. С., Григорьев С. В., Алтынбаев Е. В., Siegfried S.-A.</i> .....	240
Долинное расщепление в нанопроволоках из селенида свинца <i>Авдеев И. Д., Нестоклон Михаил Олегович</i> .....	241
Поглощение микроволнового излучения и осцилляции Шубникова – де Гааза в композитных квантовых ямах на основе разьединённых гетеропереходов II типа InAs/GaSb/AlSb <i>Кочман И. В., Вейнгер А. И., Михайлова М. П., Семенихин П. В., Калинина К. В., Pangrac J., Hospodkova A., Hulcius E.</i> .....	242
Электрон-электронные взаимодействия в сильнолегированных гетеропереходах <i>Сафошкин А. С., Дюбуа А. Б., Бухенский К. В., Кучерявый С. И.</i> .....	244
Электроотражение периодических гетероструктур с тройными квантовыми ямами InAs/GaAs <i>Большаков А. С., Чалдышев В. В., Бабичев А. В., Кудряшов Д. А., Гудовских А. С., Морозов И. А., Соболев М. С., Никитина Е. В.</i> .....	245
Резонансный перенос энергии электронного возбуждения по механизму Декстера в системе квантовых точек <i>Самосват Д. М., Чикалова-Лузина О.П., Вяткин В. М., Зегря Г. Г.</i> .....	247
Обменно-связанные комплексы ионов марганца и локализованных дырок в квантовых ямах (CdMn)Te/(CdMg)Te с двумерным дырочным газом <i>Гурин А. С., Толмачев Д. О., Романов Н. Г.</i> .....	248
Плазмонное усиление люминесценции квантовых точек <i>Матюшкин Л. Б.</i> .....	250
Ферромагнитные свойства (Ga,Mn)As и (In,Mn)As нитевидных нанокристаллов <i>Резник Р. Р.</i> .....	251
Нанокристаллы кремния: эффект деформации <i>Герт А. В.</i> .....	252
Внутризонное поглощение излучения дырками в глубоких квантовых ямах <i>Павлов Н. В.</i> .....	253
Влияние нановключений As на фотолюминесценцию квантовых точек InAs в GaAs <i>Косарев А. Н., Чалдышев В. В., Неведомский В. Н., Берт Н. А., Преображенский В. В., Пулято М. А., Семягин Б. Р.</i> .....	254



Спектрально-угловые распределения нелинейного томсоновского рассеяния остросфокусированного лазерного импульса релятивистской интенсивности при фокусировке в дифракционный предел <i>Вайс О. Е., Бочкарев С. Г., Быченков В. Ю., Андрияш И. А.</i> .....	256
Использование оптимизированной доплеровской рефлектометрии на стеллараторе Л-2М для исследования плазменной турбулентности <i>Харчевский А. А., Малахов Д. В., Скворцова Н. Н.</i> .....	257
Исследование структуры естественной конвекции над горизонтальным нагретым диском <i>Храпунов Е. Ф.</i> .....	258
Экспериментальное исследование нелинейных колебаний газа в трубе при переходе к ударным волнам вблизи резонансов <i>Шайдуллин Л. Р.</i> .....	260
Применение методов DDES и IDDES в сочетании с подсеточным масштабом, адаптированным к слоям смешения, к расчетам отрывных течений <i>Гусева Е. К., Гарбарук А. В., Стрелец М. Х.</i> .....	261
Приближенный полуэмпирический метод определения трения осесимметричных тел <i>Нестеренко Е. А., Бондарев А. Е.</i> .....	262
Настройка $k-\omega$ SST модели турбулентности для расчета обтекания аэродинамических профилей при углах атаки в окрестности срыва потока <i>Матюшенко А. А., Гарбарук А. В.</i> .....	264
Относительные концентрации молекул $H_2$ , HD, $D_2$ в тлеющем и дуговом разрядах низкого давления в водородно-дейтериевых смесях <i>Жуков А. С., Лавров Б. П.</i> .....	266
Исследование взаимодействия сверхзвукового потока воздуха с поперечным импульсным разрядом <i>Монахов Н. А., Бобашев С. В., Белик В. П., Петренко М. В., Попов П. А., Сахаров В. А.</i> .....	267
Сравнение поправок на кривизну линий тока и вращение потока для $k-\omega$ SST модели <i>Стабников А. С., Гарбарук А. В.</i> .....	269
Моделирование лазерной плазмой процессов генерации Альфвеновских и бесстолкновительных ударных волн в космической плазме <i>Прокопов П. А., Бояринцев Э. Л., Захаров Ю. П., Мелехов А. В., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Тищенко В. Н., Шайхисламов И. Ф., Терехин В. А.</i> .....	271
Исследование особенностей перехода между LES и RANS областями при расчете пристенных турбулентных течений в рамках зонных RANS-LES подходов <i>Грицкевич М. С.</i> .....	273
Релятивистский плазменный резонанс в неоднородной лазерной плазме <i>Метельский И. И., Ковалев В. Ф., Быченков В. Ю.</i> .....	275
Влияние сопряженного теплообмена на тепловой поток в ударной трубе <i>Кузнецов Е. А., Поняев С. А.</i> .....	276
Волны на релятивистском электронном пучке в плазме в режиме ионной фокусировки <i>Черненко Ю. С., Шейнман И. Л.</i> .....	277

Принцип максимальной хаотичности в теории развитой турбулентности: модель с предельно нарушенной чётностью <i>Куликов А. Б.</i> .....	278
Исследование влияния акустических течений в газоразрядной камере на параметры тлеющего разряда <i>Фадеев С. А., Сайфутдинов А. И.</i> .....	280
Применение рельсового ускорителя плазмы для нанесения проводящих покрытий <i>Твердохлебов К. В., Поняев С. А., Жуков Б. Г., Бобашев С. В., Куракин Р. О.</i> .....	281

## Физика ферроиков

282

Магнитоэлектрический эффект в слоистых структурах в области электромеханического резонанса <i>Галичян Т. А., Филиппов Д. А.</i> .....	282
Инверсный магнитоэлектрический эффект в поляризованных и намагниченных пьезоферритных структурах с пустотностью <i>Радченко Г. С., Филиппов Д. А.</i> .....	284
Особенности критического рассеяния в одноосном релаксоре $Sr_{0,6}Ba_{0,4}Nb_2O_6$ <i>Ванина П. Ю., Борисов С. А., Набережнов А. А.</i> .....	285
Влияние примеси $BaTiO_3$ на существование несоизмерной фазы в композите $0,9NaNO_2+0,1BaTiO_3$ и сегнетоэлектрической фазы $KNO_3$ в композитах $(1-x)KNO_3+(x)BaTiO_3$ <i>Алексеева О. А., Набережнов А. А., Стукова Е. В., Борисов С. А., Симкин В. Г.</i>	287
Исследование гексагональных ортоферритов $h-RFeO_3$ ( $R=Ho, Er$ и $Lu$ ) методом генерации второй оптической гармоники <i>Нефёдов С. Г., Павлов В. В., Писарев Р. В.</i> .....	288
Линейный и нелинейный магнитоэлектрический эффект в двухслойных структурах на основе цирконат-титанат свинца-никель <i>Фирсова Т. О.</i> .....	289
Роль поглощения в лазерно-индуцированном возбуждении прецессии намагниченности в пленках железо-иттриевого граната <i>Шамрай П. Ю., Шелухин Л. А., Павлов В. В., Калашникова А. М.</i> .....	290
Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание в магнитных туннельных переходах $CoFeB/MgO/CoFeB$ <i>Максимов К. А., Шелухин Л. А., Калашникова А. М., Gareev R.R., Zbarsky V., Münzenberg M., Перцев Н. А.</i> .....	292
Магнитодиелектрический эффект в антиферромагнетиках со структурой перовскита $KCoF_3$ и $KNiF_3$ <i>Дубровин Р. М., Кижаяев С. А., Писарев Р. В.</i> .....	294
Спиновые возбуждения и спин-фононное взаимодействие в аниферромагнетике $PbFeVO_4$ <i>Просников М. А., Писарев Р. В., Давыдов В. Ю., Смирнов А. Н., Саблина К. А.</i> .....	295
Особенности динамики решетки в монокристалле цирконата-титаната свинца с концентрацией титана 0.7% <i>Андроникова Д. А., Вагон А., Босак А. А., Бронвальд Ю. А., Бурковский Р. Г., Вахрушев С. Б., Леонтьев Н. Г., Леонтьев И. Н., Филимонов А. В.</i> .....	296

Исследование влияние конечной ширины тонкопленочных ферромагнитных волноводов на спектр и поперечное распределение дипольно-обменных спиновых волн <i>Попов Д. А.</i> .....	297
--	-----

## Другие вопросы физики 299

---

Затухание продольных ультразвуковых колебаний в кристаллах $\text{NaClO}_3$ <i>Игишева А. Л., Соболева Э. Г.</i> .....	299
Математическое моделирование лазерной абляции металлов фемтосекундными импульсами <i>Давыдов Р. В., Антонов В. И.</i> .....	300
Симметричные аспекты продольного пьезоэлектрического эффекта в кристаллах <i>Замковская А. И., Максимова Е. М.</i> .....	302
Моделирование процесса коалесценции бабстонов в дисперсных системах с учетом фрактальности среды <i>Кумыков Т. С.</i> .....	303
Ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии <i>Остреинов Ю. М., Щудло И. М., Зайди Л., Касатов Д. А., Кошкарёв А. М., Кузнецов А. С., Макаров А. Н., Сорокин И. Н., Сычева Т. В., Таскаев С. Ю.</i> .....	304
Применение остросфокусированного импульсного электронного пучка для балансировки гироскопа <i>Бордулева А. О., Соловьев В. В., Блейхер Г. А., Кривобоков В. П.</i> .....	305
Исследование диэлектрических свойств лантанидомезогена на основе тербия <i>Сахацкий А. С., Добрун Л. А.</i> .....	307
Изучение ассоциации молекул в атмосферном воздухе масс-спектрометрическим методом <i>Титов Ю. А., Кузьмин А. Г.</i> .....	308
Быстрозакаленные металлические стекла на основе Fe-Co-B-P: структура, кристаллизация, магнитные свойства <i>Прахова Д. А., Гришин А. М., Игнахин В. С., Луговская Л. А., Осауленко Р. Н.</i> .....	309
Структура целлюлозы, полученной методом механической деструкции <i>Латуга А. А., Логинова С. В.</i> .....	310
Тепловые колебания в одномерном кристалле <i>Симонов М. В., Кривцов А. М.</i> .....	312
Коэффициент Нернста-Эттингсгаузена в высокотемпературных сверхпроводниках системы Y-Ba-Cu-O в нормальной фазе <i>Мартынова О. А., Гасумянц В. Э.</i> .....	313
Динамический феррит-сегнетоэлектрический магнетонный кристалл <i>Устинова И. А., Никитин А. А.</i> .....	315
Золь-гель переход в водных коллоидных растворах свободных частиц детонационного наноалмаза <i>Швидченко А. В., Алексенский А. Е., Дидейкин А. Т., Эйдельман Е. Д., Кириленко Д. А., Вуль А. Я., Жуков А. Н.</i> .....	316

Содержание

Получение и исследование свойств композиционных материалов на основе хитозана и наночастиц хитина для клеточных технологий  
*Юденко А. Н., Дресвянина Е. Н.,  
Смирнова Н. В., Иванькова Е. М., Юдин В. Е.* ..... 317

Исследование наномеханических осцилляторов на основе углеродных вискоз в вакууме и при атмосферном давлении  
*Лукашенко С. Ю., В. В. Лысак, И.С. Мухин,  
И.Д. Сапожников, А.О.Голубок* ..... 318

Измерение точного модуля упругости InP нанопроводов  
*Гейдт П. В., Дунаевский М., Хаггрен Т., Какко Й.-П., Алексеев П.* ..... 320

# ENGLISH ABSTRACTS

## Astronomy and Astrophysics

321

Observation and investigation of supernovae IIP: SN2012aw and SN2013ej employing AZT-8 and LX200 telescopes <i>Mokrushina Anna</i> .....	322
The Earth lithosphere tectonics in spherical harmonics <i>Mokhnatkin Artem</i> , Petrov S., Gorshkov V., Shcherbakova N., Trofimov D., Smirnov S. ....	322
Conditions for the naked singularity formation in generalised Vaidya spacetime <i>Vertogradov Vitalii Dmitrievich</i> , Grib A.A. ....	323
Analysis of the pulsar wind nebula DA 495 and its central object using XMM-Newton and Chandra observations <i>Karpova Anna</i> , Zyuzin D.A., Danilenko A.A., Shibanov Yu.A. ....	323
Topological analysis of recurrent structures of helio-related time series <i>Kniazeva Irina Sergeevna</i> , Makarenko N.G., Urtiev F.A. ....	324
Diffusion in dense non-isothermal Coulomb plasma <i>Beznogov Mikhail Victorovich</i> , Yakovlev D.G. ....	324
Estimation and analysis of basic parameters of galactic globular clusters obtained by Q-coefficient method <i>Skakun Alexandra</i> , Sharina M.E. ....	325
Model of magnetic field amplification in main star clusters <i>Romansky Vadim Igorevich</i> , Gladilin P.E., Osipov S.M., Bykov A.M. ....	325
Quasisynchronous basis observations of hazardous asteroid 2004 BL86 <i>Bashakova Ekaterina Alexandrovna</i> , Lyashenko A.Yu., Slesarenko V.Yu. ....	325
The origin of isolated X-ray pulsar 1E161348-5055, with period 6.7 hr <i>Kim Vitaliy Yur'evich</i> , Ikhsanov N.R. ....	326
Patterns in planetesimal disks <i>Demidova Tatiana</i> , Shevchenko I.I. ....	326
Spectropolarimetric Observations of Active Galactic Nuclei with the 6-m BTA Telescope <i>Buliga Stanislava Dmitrievna</i> , Gnedin Yu.N., Afanasiev V.L., Borisov N.V., Natsvlshvili T.M., Piotrovich M.Yu. ....	327
Radiation pressure influence on the movement of hazardous asteroids <i>Martyusheva Alexandra</i> , .....	327
The Lidov–Kozai effect in planetary systems of multiple stars HD 196885 and 16 Cygni <i>Borukha Maria Alexandrovna</i> , Eskin B.B., Melnikov A.V., Sokolov L.L., Shevchenko I.I. ....	328
Possibility of the BF Ori rotation slowdown due to the orbital synchronization <i>Shulman Sergei</i> .....	328
Determination of the fractal dimensionality of large-scale structure by the method of pairwise distances <i>Gerasim Ruslan</i> , Raikov A.A., Orlov V.V. ....	329

Astrometric and photometric investigation of asteroids (3100) Zimmerman, (3504) Kholshchikov, (4592) Alkiia, (4619) Polyakhova <i>Petrova Svetlana, Gorshanov D.L., Devyatkin A.V., L'vov V.N.</i> .....	329
Work of tidal forces in the vicinity of the rotating black holes for ultrarelativistic particles <i>Rasulova Anna Muradovna, Grib A.A.</i> .....	329
The magnetic field inertia and rotation dynamics of radio pulsars <i>Goglichidze Oleg Anzorovich, Barsukov D.P., Tsygan A.I.</i> .....	330
X-ray studies of the supernova remnant G350.0-2.0 <i>Karpova Anna, Zyuzin D. A., Danilenko A. A., Shibanov Yu. A., Shternin P.S.</i> .....	330
First Intermediate Flare from SGR 1935+2154 <i>Kozlova Anna Vladimirovna, Israel G.L., Svinkin D.S., Frederiks D.D.</i> .....	330
Cooling of neutron star in HESS J1731-347 <i>Ofengeim Dmitrii Dmitrievich, Yakovlev D.G., Kaminker A.D., Klochkov D.K., Suleimanov V.F.</i> .....	331
Radio-interferometric and near-infrared observations of PSR J1357–6429 <i>Aida Kirichenko</i> .....	331
Magnetic wisps in non-equilibrium relativistic plasma of pulsar wind nebulae <i>Petrov Alexey Evgenievich, Bykov A.M.</i> .....	332
WASP-17b – possible, first exoplanet that move off parent star. Carrying out an international observational campaign <i>Sokov Eugene Nikolaevich</i> .....	332

## Nuclear and elementary particle physics 333

---

The investigation of electron detachment process in collisions of negative hydrogen ions with hydrogen molecules <i>Aleksandrovich Olga Vladimirovna, Tiukanov A.S., Belyaev A.K.</i> .....	333
Electron screening in measuring nuclear synthesis cross-sections under laboratory conditions <i>Meluzova Daria Sergeevna, Zinoviev A.N.</i> .....	333
Numerical simulation of the X-ray beam absorption by the modified ABS-plastic <i>Miloichikova Irina Alekseevna, Stuchebrov S.G.</i> .....	333
Study of correlations of mean transverse momenta of particles produced in nucleus-nucleus collisions in framework of blast-wave model <i>Sokol'skii Vladimir, Altsybeev I.G.</i> .....	334

## Biophysics 335

---

Simulation of endovenous laser photocoagulation of varicose veins in-vitro using 2-micron laser radiation <i>Chabushkin Alexei, Ryabochkina P.A., Belyev A.A., Lyapin A.A., Khrushchalina S.A.</i> .....	335
Influence of the isotopic substitution of the H + on the dynamics of phase transformations in the bovine serum albumin <i>Vashchenkov Viktor, Dmitriev A., Fedoseev A.I., Lushnikov S.G.</i> .....	335
The computer modeling of fragments of cancellous bone tissue for stress-strain state study <i>Lastovkina Ekaterina, Kolmakova T.V.</i> .....	336

Study of the secondary structure of BSA and ovalbumin by FTIR spectroscopy Abrosimova Karina Vladimirovna, Shulenina O.V., Paston S.V. ....	336
Rational design of the trehalose/maltose-binding protein serving as a potential glucose biosensor <i>Pivovarov Viacheslav Aleksandrovich</i> , Fonin A.V., Rychkov G.N. ....	336
The interaction of DNA with piperazine derivatives of benzoimidazophtalazine <i>Osinnikova Daria Nikolaevna</i> , Moroshkina E.B., Travkina V.I. ....	337
Conformations of polyelectrolyte macromolecules with different charge density in solutions of different ionic strengths <i>Dommes Olga Aleksandrovna</i> , Pavlov G.M., Okatova O.V. ....	337
Interaction of short peptides KE and KEDW with DNA <i>Boldyrev Aleksandr Yurevich</i> , Morozova E.A., Kuznetsova E.P., Kasyanenko N.A. ....	338
The study of DNA-nanoparticles and DNA-nanoclusters systems in a solution and on the surface <i>Varshavskiy Mikhail</i> .....	338
Conformational transitions in an end-grafted chain admixed to a polymer brush made of starlike macromolecules <i>Kazakov Alexander</i> , Polotsky A.A., Birshtein T.M. ....	339
Computer modeling of complexes of DNA and polycations in solution <i>Kondinskaia Diana</i> , Kostritskii A., Nesterenko A., Antipina A., Gurtovenko A. ....	339
Adsorption of cationic polymers on bacterial membranes: Computer simulation <i>Kostritskii Andrei</i> , Kondinskaia D., Nesterenko A., Gurtovenko A. ....	340
Investigation of mechanical tension of isolated animals blood veels and airways <i>Turgunova Natalia Djuraboevna</i> , Aleinik A.N., Nosarev A.V. ....	340
Morphological analysis of red blood cells by polychromatic interference microscopy of thin films <i>Dyachenko Anton Andreevich</i> , Malinova L.I., Ryabukho V.P. ....	341
The study of the influence of the nucleotide composition of DNA on the dynamics of phase transformation <i>Dmitriev Artem</i> , Vashchenkov V.E, Zakharov G.A., Fedoseev A.I, Savvateeva-Popova E.V., Lushnikov S.G. ....	341
Extended kinetic model of real-time polymerase chain reaction <i>Fedorov Aleksey Aleksandrovich</i> , Sochivko D.G. ....	342
Biliverdin as near-infrared fluorescent proteins chromophor <i>Bublikov Grigorii Sergeevich</i> , Stepanenko Olesya V., Shcherbakova D.M., Kuznetsova I.M., Verkhusha V.V., Turoverov K.K. ....	342
Interaction of small interfering RNA and DNA with cationic agents <i>Unksov Ivan Nikitich</i> , Slita A.V., Petrova A.V., Pereviazko I.I., Bakulev V.M., Rolich V.I., Bondarenko A.B., Kasyanenko N.A. ....	343
Investigation of conditions for reproducible generation and sorting droplets "water in oil" in the microfluidic chip for screening cell libraries <i>Filatov Nikita Alekseevich</i> , Bukatin A.S. ....	344

Microelectrode array development for registration of electrophysiological activity in neuronal culture in vitro <i>Malishev Eugene Ivanovich, Frizyuk K.S., Pimashkin A.S., Gladkov A.A., Bukatin A.S., Vdovichev S.N., Kazantsev V.B, Mukhina I.V., Dubina M.V.</i> .....	344
Investigation of the characteristics of electret microphones for the development of intracranial preure sensor design <i>Sumovsky Alexander Sergeevich, Andreeva A.V., Lyutetsky N.A.</i> .....	344
Experimental and theoretical study of conformational changes induced by the action of THz radiation in the proline-containing fragments of globular proteins <i>Nemova Eugenia, Kobzeva T.V.</i> .....	345
A model to simulate the initial stages of protein crystallization in the capillaries by counter diffusion method <i>Sokolovskiy Andrey Sergeevich, Eliseev I.E., Yudenko A.N.</i> .....	345

## Mathematical physics and numerical methods 346

---

Numerical modelling of hydriding of zirconium alloy <i>Rodchenkova Natalia Ivanovna, Zaika Yu.V.</i> .....	346
Noise-induced phase transition in an autocatalytic chemical system <i>Pham Minh Tuan, Virchenko Yu.P.</i> .....	346
Dynamics of heating Solid State by the influence of the electron beam <i>Mashkov Konstantin, Zamoryanskaya M.V.</i> .....	347
Many Body Effects in Optical Absorption Spectra of Lithium Azide (LiN <sub>3</sub> ) <i>Filippov Semyon Igorevich, Gordienko A.B.</i> .....	347
Wannier Functions for ternary chalcopyrite semiconductors <i>Filippov Daniil Igorevich, Gordienko A.B.</i> .....	347
Numerical simulation of the TDS-spectrum in a nonlinear boundary-value problem of hydrogen thermal desorption <i>Kostikova Ekaterina Konstantinovna, Zaika Yu.V.</i> .....	348
Band structures of one-dimensional photonic crystal containing negative index materials <i>Pravdin Konstantin Vladimirovich, Popov I.Yu.</i> .....	348
A generalized mathematical model of piston acceleration by combustion products in axisymmetric channel <i>Bykov Nikita V., Nesterenko E.A., Vlasova N.S.</i> .....	348
Numerical modeling of an electrical wire explosion <i>Ryakhovskiy Alexey</i> .....	349

## Nano-structured and thin film materials 350

---

Proximity effect in ferromagnet-semiconductor hybrid structure <i>Kalitikha Inna, Korenev V. L., Akimov I.A.</i> .....	350
Magnetic linear dichroism in electron photoemission from ultrathin films of transition metal silicides <i>Grebnyuk Georgy Sergeevich, Gomoyunova M.V., Pronin I.I.</i> .....	350



Improving quantum efficiency of multijunction solar cells based on lattice-matched nanoheterostructures grown by MOCVD, due to photoeffect in InAs quantum dot array <i>Salii Roman Aleksandrovich, Mintairov S.A., Nadtochiy A.M., Pauysov A.S., Brunkov P.N., Nevedomsky V.N., Kalyuzhnyy N.A.</i> .....	351
Spectroscopic properties of superparamagnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub> nanoparticle colloidal solutions <i>Smerdov Rostislav, Bocharova T.V., Gareev K.G.</i> .....	351
Synthesis of composite structures on the basis of GaBO <sub>3</sub> and FeBO <sub>3</sub> trigonal crystals <i>Mustafaeva Sofie Mustafaevna, Matvienko M.P., Mogilenec U.A, Maksimova E.M., Nauhatsky I.A., Strugatsky M.B., Yagupov S.V.</i> .....	351
Energy spectrum of InSb/AlAs quantum dots <i>Rumynin Kirill Mikhailovich, Abramkin D.S., Bakarov A.K., Gutakovskiy A.K., Shamirzaev T.S.</i> .....	352
Structural and morphological features of ultrathin epitaxial InSb films in AlAs matrix <i>Kolotovkina Darya Alexandrovna</i> .....	352
Ion synthesis of InSb nanocrystals in the buried SiO <sub>2</sub> films implanted with ions In <sup>+</sup> and Sb <sup>+</sup> <i>Dzubina Lubov Leonidovna, Cherkov A.G., Volodin V.A., Tyshenko I.E.</i> .....	353
Multilayer neutron monochromator-polarizer on the basis of iron <i>Kyaw Zaw Lin, Syromyatnikov V.G.</i> .....	353
Chemical composition and early stages of graphitization of de-aggregated particles of detonation nanodiamond <i>Shestakov Mikhail Sergeevich, Alexenskiy A.E., Baidakova M.V., Dideikin A.T., Shvidchenko A.V., Shnitov V.V., Kidalov S.V., Vul' A.Ya.</i> .....	354
The role of diipation in spectral properties of plasmon resonances in metal-dielectric nanocomposites <i>Olekhno Nikita Andreevich, Beltukov Y.M., Parshin D.A.</i> .....	354
The detonation nanodiamond-based size standard for dynamic light scattering <i>Koniakhin Sergei, Shvidchenko A.V.</i> .....	355
Investigation of light-induced degradation of tandem photoconverters on a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H <i>Titov Aleksei Sergeevich, Abramov A.S., Andronikov D.A., Emtsev K.V., Semenov A.F., Terukova E.E., Yakovlev S.A.</i> .....	355
Structural transformations in liquid Ga-In eutectic alloy under nanoconfinement <i>Nefedov Denis Yurievich, Charnaya E.V., Haase J., Michel D., Kumzerov Y.A.</i> .....	355
Study of ZnO layers obtained by spray-pyrolysis <i>Semenova Anastasia Aleksandrovna, Lashkova N.A., Matyushkin L.B., Somov P.A., Maximov A.I.</i> .....	356
High-temperature sensors based on 4H-SiC Schottky diode structures <i>Demenskiy Aleksey Nikolayevich, Yerochin S. Yu., Krasnov V. A., Shutov S. V.</i> .....	356
Investigation of the structural features of CoFe - nanotubes obtained by template synthesis <i>Shlimas Dmitriy Igorevich, Kozlovskiy A.L., Aleshova N.E., Meirimova T.Yu., Kadyrzhанov K.K.</i> .....	356
NMR studies of the ferroelectric transition in bulk and nanostructured KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <i>Uskova Natalia, Baryshnikov S.V., Podorozhkin D.Yu., Charnaya E.V.</i> .....	357
Investigation of the effect of thermal annealing on the conducting properties of Zn - nanotubes <i>Meirimova Tatyana Yurevna, Kozlovskiy A.L., Aleshova N.E., Shlimas D.I., Kadyrzhанov K.K.</i> .....	357

Defect structure, mechanical properties and thermal stability of nanostructured titanium produced in different types of rollings <i>Narykova Mariia, Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Kolobov Yu.R., Sklenicka V. ....</i>	358
Technology of creation of superhard coatings based on AlMgB <sub>14</sub> thin films <i>Iuzviuk Maria Herardovna, Grishin A.M., Putrolaynen V.V. ....</i>	358
Deformation in BaTiO <sub>3</sub> and SrTiO <sub>3</sub> Single Crystals due to Converse Flexoelectric Effect <i>Rumyantseva Ekaterina Dmitrievna, Rumyantseva E.D., Zalekii V.G. ....</i>	359
Femtosecond laser pulse crystallization of hydrogenated amorphous silicon films <i>Petrov Mikhail, Belik V.P., Vasutinskiy O.S., Kukin A.V., Popov R.S., Terukov E.I. ....</i>	359
The development of the flow reactor system for semiconductor and metal nanoparticles synthesis <i>Ryzhov Oleg Alexandrovich, Matyushkin L.B., Mbvanche R.K. ....</i>	359
Fractal and multifractal analysis of nanostructured materials based on the system Zn-Sn-O <i>Abrashova Ekaterina Victorovna ....</i>	360
Temperature dependence of dielectric losses in composites based on polyethylene and barium titanate <i>Shatikhina Irina Vladimirovna, Shatikhina I.V., Castro R.A., Kononov A.A. ....</i>	360
Growing by laser molecular beam epitaxy heterostructures with layers of oxides and their study by X-ray magnetic circular dichroism <i>Petrova Julia, S.M. Sutorin ....</i>	360
Studying Spinodal Decomposition in the Sample of Gallium Arsenide Selenide Solid Solution via the Technique of Small-Angle X-Ray Scattering at Energies Close to the As and Se Absorption Edges <i>Sharkov Michael, Boiko M.E., Bobyl A.V., Boiko A.M., Konnikov S.G. ....</i>	361
Synthesis of zinc selenide colloidal nanocrystals doped with manganese <i>Nikiforova Angelina Valerjevna, Mazing D.S., Aleksandrova O.A., Moshnikov V.A. ....</i>	361
Effects of resistive switching in composite films based on polymer with graphene and graphene oxide nanosheets <i>Krylov Pavel Stanislavovich, Berestennikov A.S., Aleshin A.N. ....</i>	362
Optical visualisation of graphene films on transparent substrates <i>Rabchinskii Maxim Konstantinovich, Dideikin A.T. ....</i>	362
Structural studies of the carbon film graphene with inclusions <i>Mikhaylina Anna Arkadyevna ....</i>	363
The research of electric properties and defectoscopy of nanocomposites based on silicon dioxide and polymers reinforced with carbon nanotubes <i>Osokin Constantine Sergeevich, Eseev M.K., Goshev A.A., Kapustin S.N., Horodek P., Kobets A.G. ....</i>	363
Research zinc oxide nanowires grown on the sol-gel layers by hydrothermal method <i>Somov Pavel, Bobkov A.A. ....</i>	364
Synthesis of copper doped zinc selenide nanocrystals emitting in blue-green range of the spectrum <i>Mazing Dmitrii Sergeevich, Chernaguzov I.S., Aleksandrova O.A., Moshnikov V.A. ....</i>	364
Local enhancement of the magnetic field in a vacuum using dielectric nanostructures <i>Baryshnikova Kseniia, Shalin A.S., Ginzburg P.B. ....</i>	364

The charge carriers transport in composite films based on bacterial cellulose modified with conductive polymer PEDOT/PSS <i>Berestennikov Alexander Sergeevich, Krylov P.S., Aleshin A.N.</i> .....	365
Effect of superparamagnetic nanoparticles on the separation via electromigration analytical methods <i>Fedorov Aleksey Aleksandrovich, Bulyanitsa A.L., Osmolovskaya N.A., Krasovskiy A.N., Shmykov A.Yu.</i> .....	365
Magnetic properties of superconducting nanocomposites based on indium in porous dielectrics <i>Mikhailin Nikolai Yurievich, Kozub V.I., Kumzerov Yu.A., Parfeniev R.V., Syssoeva A.A., Fokin A.V., Shamshur D.V.</i> .....	366

## Optics and Spectroscopy

367

Optical study of metal nanoisland resonant <i>Babich Ekaterina Sergeevna, Scherbak S.A., Heisler F., Chervinskii S.D.</i> .....	367
Spectral luminescence and laser properties of $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Er_2O_3$ crystals <i>Chabushkin Alexey, Ryabochkina P.A., Lyapin A.A., Sydorova N.V.</i> .....	367
Peculiarities of Maxwell's equations solution for buried quantum well <i>Shapochkin Pavel Yur'evich, Kapitonov Yu.V., Lovtcius V.A., Eliseev S.A., Efimov Yu.P., Petrov V.V., Ovsyankin V.V.</i> .....	367
Investigation of the spectral-luminescent properties of $Er^{3+}$ -doped nanosized crystals $Y_{1-x}Yb_xPO_4$ and $Y_{1-x}Yb_xPO_4 \cdot 0.8H_2O$ ( $x = 0.25, 0.5, 0.75, 1$ ) <i>Khrushchalina Svetlana Aleksandrovna, Vanetsev A.S., Gaitko O.M., Kyashkin V.M., Ryabochkina P.A., Sildos I., Tabachkova N.Yu.</i> .....	368
Absorption cross section of two-particle clusters of homogeneous and layered conductive nanoparticles with the degenerate electron gas <i>Nalbandyan Viktor Meruzhanovich, Kucherenko M.G.</i> .....	368
On a theory of light scattering from a Bose-Einstein condensate <i>Ezhova Victoria Mikhailovna, Gerasimov L.V., Kupriyanov D.V.</i> .....	368
Optical Tamm states in a photonic crystal structure based on the cholesteric liquid crystal <i>Pyatnov Maxim (Vladimirovich), Vetrov S.Ya., Timofeev I.V.</i> .....	369
Radiative transitions under H+H- collisions <i>Dadonova Alla Vasil'evna</i> .....	369
Short-period grating for radiation input to planar total internal reflection waveguide <i>Lozhkina Olga, Lozhkin M.S., Kapitonov Yu.V., Manuhova A.D., Shapochkin P.Yu., Efimov Yu.P., Eliseev S.A., Lovtcius V.A., Petrov V.V., Kozlov G.G., Ovsyankin V.V.</i> .....	369
Temporal selfcompression of chirped converging beams in thin fused silica plate <i>Grudtsyn Iakov Viktorovich, Mikheev L.D., Koribut A.V., Trofimov V.A.</i> .....	370
Accounting of Breit and QED corrections for calculations of Mg-like ion spectra <i>Konovalova Elena Alexandrovna, Kozlov M.G.</i> .....	370
Spectrum of parametric radiation in resonance regime of photon generation <i>Levchenko Alexander, Trifanov A.</i> .....	370

Nonlinear dynamics of the exciton reflection spectrum <i>Beliaev Leonid Yurievich, Ovsyankin V.V., Stroganov B.V., Petrov V.V., Efimov Yu.P., Dolgikh Yu.K., Eliseev S.A., Kapitonov Yu.V.</i> .....	371
Methods for excitation and detection signals of ODMR in nitrogen-vacancy centers in diamond in the scheme of quantum micro-magnetometer <i>Dmitriev Alexander Konstantinovich, Vershovskii A.K.</i> .....	371
Inverse problem of laser correlation spectroscopy solution for the polydisperse solutions analysis <i>Nepomniashchaia Elina Konstantinovna, Velichko E.N., Aksenov E.T.</i> .....	371
Observation of spin-dependent effects in garnet crystals via $Ce^{3+}$ emission <i>Uspenskaya Yulia Alexandrovna, Gurin A.S., Tolmachev D.O., Asatryan H.R., Romanov N.G., Baranov P.G.</i> .....	372
Influence of the wavelength and dose of the exciting radiation on photosensitized generation of singlet oxygen <i>Irina Aleksandra Dmitrievna, Vasyutinskii O.S., Glazov A.L.</i> .....	372
Investigation by means of ECV technique of ion-implanted photosensitive structures for backside illuminated CCD's to optimize parameters of based on them devices <i>Yakovlev Georgii Evgenievich, Frolov D.S., Zubkov V.I.</i> .....	372
New method of liquid medium streams investigation on basis of nuclear - magnetic spectroscopy and laser radiation scattered <i>Vologdin Vasilij Aleksandrovich, Davydov V.V.</i> .....	373
Investigation of high density volume of particles based on of the correlation peak to background ratio <i>Vovk Tatiana Antonovna, Petrov N.V., Nikolaeva T.Yu.</i> .....	373
Kinetics of photosensitizer fluorescence and singlet oxygen phosphorescence as a function of oxygen concentration in water <i>Beltukova Dina Mihailovna, Vasyutinskii O.S., Glazov A.L., Semenova I.V.</i> .....	374
Spectroscopy and optical properties of rare-earth phosphors garnets synthesized under high pressure <i>Yusuf Alexey, Galashov E.N., Mandrik E.M.</i> .....	374
Features of forming of selective indicatrix photoinduced light scattering in the $LiNbO_3: Rh$ crystals <i>Maksimenko Vitaliy Aleksandrovich, Danilova E.V.</i> .....	374
Optical anisotropy of photonic crystals with cubic symmetry in the multimode regime of light propagation <i>Ukleev Timofei, Iurasova D.I., Shevchenko N.N., Sel'kin A.V.</i> .....	375
Effect of the silver nanoparticles shell on the rhodamin 6G fluorescence in the polyvinyl alcohol film <i>Konstantinova Elizaveta Ivanovna, Slezhkin V.A., Bryukhanov V.V.</i> .....	375
Method for in-situ measurement of the high temperature distribution in micron-size specimens based on acousto-optic spectral imaging <i>Machikhin Alexander</i> .....	375
Raman spectroscopy to assess dermal desensitization biomatrix <i>Pershutkina Svetlana Valer'evna, Shalkovskaya P.Yu., Timchenko E.V., Timchenko P.E., Volova L.T.</i> .....	376

Application of the method Raman spectroscopy for diagnosis of dental tissues <i>Kulabuhova Arina Yuryevna, Timchenko P.E., Timchenko E.V., Zherdev L.A., Volova L.T.</i> .....	376
Investigation of coherent population trapping signals in $^{87}\text{Rb}$ cells with buffer gas <i>Fedorov Maksim Igorevich, Ermak S.V., Petrenko M.V., Pyatyshev E.N., Semenov V.V.</i> .....	377
Quantum magnetometers as a base for atomic clock <i>Sagitov Eduard Anvarovich, Ermak S.V., Petrenko M.V., Semenov V.V.</i> .....	377
Intracellular detection of singlet oxygen in biological objects by simultaneous recording of its radiative and nonradiative relaxation <i>Belashov Andrey Vladimirovich, Semenova I.V., Petrov N.V., Vasyutinskii O.S.</i> .....	378
Dielectric spectroscopy of sillenite crystals $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ <i>Nabiullina Lilia Ansafovna, Castro R.A., Shadrin E.B.</i> .....	378
Broadband conversion of CO-laser radiation in nonlinear crystal $\text{AgGaSe}_2$ <i>Budilova Oksana, Ionin A.A., Kinyayevskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A.</i> .....	378
Ultrafast dynamics of the phonon modes induced by femtosecond laser pulses in a ferroelectric-semiconductor $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ <i>Grishunin Kirill, Brekhov K.A., Sherstuyk N.E., Mishina E.D.</i> .....	379
The influence of sulfide surface passivation on the radiative recombination in double quantum wells $\text{CdSe/ZnSe}$ with self-assembled quantum dots <i>Eremenko Maxim Viktorovich, Berkovits V.L., L'vova T.V., Reznitsky A.N., Ulin V.P.</i> ..	379
Investigation of quantum efficiency of $\text{A}^3\text{B}^5$ heterostructures after FIB milling <i>Mitrofanov Maksim Igorevich, Evtikhiev V.P., Smirnov A.N.</i> .....	379
Modelling of polar optical phonons spectra in multiple quantum wells and superlattices $\text{GaN/AlN}$ <i>Pankin Dmitrii Vasilevich, Smirnov M.B.</i> .....	380
Investigation of cascade of the phase transitions in the multiferroic $\text{CuB}_2\text{O}_4$ by polarization spectroscopy <i>Molchanova Anastasiia Dmitrievna, Boldyrev K.N., Popova M.N., Pisarev R.V.</i> .....	380
Far IR spectroscopy of like-huntite samarium chromium borate <i>Dobretsova Elena Anatoljevna, Boldyrev K.N., Gavrilkin S.Yu., Mukhin A.A., Ivanov V.Yu., Maljtshev V.V., Leonyuk N.I.</i> .....	381

## Optoelectronic devices 382

---

The study of encoding and decoding information transfer using the stochastic ultrawideband light flow <i>Glukhov Vladimir, Kulikov I., Tolmachev Yu.</i> .....	382
Selective photosensitive structures $\text{Au-AlGaN}$ for the 350 - 370 nm wavelength range <i>Lamkin Ivan Anatolevich, Tarasov S.A., Solomonov A.V., Kurin S. Yu.</i> .....	382
Optical feedback and control efficiency of high-power laser-thyristors emitting at 905 nm <i>Soboleva Olga Sergeevna, Podoskin A.A., Zakharov M.S., Zolotarev V.V., Bakhvalov K.V., Rozhkov A.V., Veselov D.A., Sokolova Z.N., Romanovich D.N., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Slipchenko S.O.</i> .....	382

Charge neutrality and band diagram in the QD lasers with modulation doping <i>Konoplev Sergey Sergeevich, Savelyev A.V.</i> .....	383
Mode selection control in ring microresonators <i>Levitskii Iaroslav, Evtikhiev V.P.</i> .....	383
Light-emitting structures based on colloidal quantum dots of cadmium sulfide having a high color rendering index <i>Stepanov Evgeniy Mikhailovich, Mikhailov I.I., Tarasov S.A., Solomonov A.V.</i> .....	383
Three-coordinate interferometer for subnanometer-resolved displacement measurements <i>Kazieva Tatiana, Kuznetsov A.P., Gubskiy K.L., Reshetov V.N., Ponarina M.V.</i> .....	384
Photoelectrical Properties of Hydrogen Sensing Pd-Oxide-InP Schottky Diodes <i>Shutaev Vadim Arkadievich, Imenkov A.N., Grebenshchikova E.A., Yakovlev Yu.P.</i> .....	384
Optical tweezers based on the laboratory microscope <i>Chstyakov Dmitry, Losev S. N., Dudelev V.V., Kognovitskaya E.A., Sokolovskii G.S.</i> .....	385
High-temperature lasing in a injection microdisk laser with an active region based on InAs/InGaAs quantum dots <i>Moiseev Eduard Ilmirovich, Kryzhanovskaya N.V., Kudashova Yu.V., Zhukov A.E., Maximov M.V., Kulagina M.M., Troshkov S.I., Zadiranov Yu.M., Lipovskii A.A., Blokhin S.A., Bobrov M.A.</i> .....	385
Printable multibit resistive memory based on polymer admixtures <i>Kotova Maria, Dronov M.A., Dubinina T.V.</i> .....	385
The research of the UV LEDs interfaces structure properties influencing on the emission output coefficient <i>Evseenkov Anton, Tarasov S.A., Solomonov A.V., Kurin S.Yu.</i> .....	386
The research of the temperature characteristics of the ultraviolet light-emitting diodes based on nitride solid solutions <i>Evseenkov Anton, Tarasov S.A., Solomonov A.V., Kurin S.Yu.</i> .....	386
Study of stress in AlN buffer layers grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy on different substrates <i>Zolotukhin Dmitry Sergeevich</i> .....	387
<b>Surface phenomena</b>	<b>388</b>
A shape of the equilibrium surface of the meniscus in a cylindrical capillary with the size dependence of the surface tension <i>Sokurov Aslan Arturovich</i> .....	388
Electron energy distribution of field emission of SiC <i>Trofimov Vasily Valerevich, Nikiforov K.A., Egorov N.V.</i> .....	388
NMR study of the topological insulator Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> <i>Antonenko Anastasiya Olegovna, Charnaya E.V., Podorozhkin D.Yu., Mukhamadiarov R.I., Marchenkov V.V., Naumov S.V., Huang J.C.A., Weber H.W., Bugaev A.S.</i> .....	388
Determination of surface free energy of superfine raw components in composite materials <i>Drozdyuk Tatyana, Morozova M., Frolova M., Aizenshtadt A.</i> .....	389

CLSM investigation of paper surface <i>Soboleva Ekaterina, Ovasko S.-S., Backfolk K., Lyytikainen J.</i> .....	390
Spin relaxation length in Palladium thin films <i>Pavlov Alexandr Valerievich, Ustinov A.B., Petrov V.N.</i> .....	390
The accumulation of charge on cleaved GaAs heterostructures in the p-n junction <i>Mikhaylov Alexander Olegovich, Alekseev P.A., Sharov V.A., Dunaevski M.S.</i> .....	390
Detecting of semiconductor laser radiation using a scanning probe microscope <i>Sharov Vladislav Andreevich, Alekseev P.A., Dunaevski M.S., Mikhailov A.O.</i> .....	391

## Devices and materials of the THz and microwave ranges 392

Synthesis of Cu - Diamond/MoC composites by hot isostatic preing <i>Yusuf Alexey, Galashov E.N., Mandrik E.M.</i> .....	392
Magnetic field simulation of wiggler on LUCX accelerator facility using Radia <i>Sutygina Yana Nikolaevna, Harisova A.E, Shkitov D.A</i> .....	392
Development of semiconductor metamorphic buffer for the manufacture of microwave transistors <i>Lazarenko Aleksandra Anatol'evna, Sobolev M.S., Pirogov E.V., Nikitina E.V., Egorov A.Yu.</i> .....	393
Phase noise management of spin-wave delay-line oscillators <i>Drozdovskii Andrey, Ustinov A.B.</i> .....	393
The microstrip diplexer based on two-dimensional photonic crystal <i>Khodenkov Sergey Aleksandrovich</i> .....	393
Investigation of the microstrip filters with wide stop band <i>Khodenkov Sergey Aleksandrovich</i> .....	393
New scheme of microwave – excitation signal for caesium atomic clock <i>Petrov Aleksandr Anatolevich, Davydov V.V.</i> .....	394
Investigation of wave procees in multiferroic structures based on a slot-line with width modulation <i>Nikitin Aleksei Alexandrovich, Vitko V.V., Nikitin A.A., Ustinov A.B.</i> .....	394
Multifactor response of the dispersed soft matter precursors under microwave-induced self-organization <i>Gradov Oleg, Gradova M.A.</i> .....	394
Microwave dynamical chaos of hybrid spin-electromagnetic waves in multiferroic active rings <i>Kondrashov Alexandr, Ustinov A.B.</i> .....	395
The microwave filter based on the ring resonator <i>Khodenkov Sergey Aleksandrovich</i> .....	395
Spin-wave matched filter on active ring <i>Martynov Michail, Nikitin A.A., Kalinikos B.A., Ustinov A.B.</i> .....	395
Measurement cell for investigation of microwave parameters of delta-doped diamond samples <i>Vitko Vitalii, Kondrashov A.V., Nikitin A.A., Belavsky P.Yu., Ustinov A.B., Butler J.E.</i> .....	395

Investigation of planar ferroelectric capacitors based on ferrite substrates for the dual-tunable MW filter <i>Vitko Vitalii, Belavsky P.Yu., Mylnikov I.L.</i> .....	396
--	-----

## Impurities and defects in solids 397

---

Synthesis and research GaBO <sub>3</sub> :Ni single crystals <i>Skutkyavichute Kristina Rimantasovna, Mogilenec U.A, Seleznyova K.A., Strugatsky M.B., Yagupov S.V.</i> .....	397
Effect of replacement of iron by the elements of group IV (Ge, Sn, Pb) in the structure , electrical and magnetic properties of superconducting iron chalcogenides <i>Rusakov Vsevolod Aleksandrovich, Volkov M.P., Melekh B.A-T., Kartenko N.F.</i> .....	397
Research vacancy spin centers in the orthorhombic silicon carbide ENDOR and ODMR techniques <i>Anisimov Andrey Nikolaevich, Baranov P.G., Babunts R.A., Badalyan A.G., Ilyin I.V., Romanov N.G., Muzafarova M.V., Soltamov V.A., Tolmachev D.O., Yavkin B.V.</i> .....	398
Second-harmonic generation on the edges in nanoscale layers of transition metal dicalcogenides <i>Shestakova Anastasiya Pavlovna, Lavrov S.D., Mishina E.D.</i> .....	398
Peak of ultrasonic absorption in ZnSe:Cr in weak magnetic fields <i>Baryshnikov Kirill Alexandrovich</i> .....	398
Mass-spectrometer investigation of substances at the small energy ionising electrons <i>Romanov Pavel Alexandrovich, Fedichkin I.L., Popov E.O., Filippov S.V., Kolosko A.G.</i> .....	399

## Physics and technology of energy conversion 400

---

Photocleavage of water into hydrogen by using thioxanthene dyes <i>Glukhova Yana Sergeeva, Ponyaev A.I.</i> .....	400
Physical and technical aspects of the effective application of ferroelectrics to increase the power density and energy density of alternative energy devices <i>Zubtsov Vladimir Ivanovith, Zubtsova E.V.</i> .....	400
Investigation of electrocaloric effect in ceramic ferroelectrics <i>Belyavskiy Pavel Yur`evich, Eskov A.V., Anokhin A.S., Pakhomov O.V., Semenov A.A.</i> .....	401
Photoelectric and photomagnetic response of indium tin oxide films <i>Plyastsov Semyon Alekseevich, Meshkovskiy I.K.</i> .....	401
Additional contribution to the thermopower in Cr-Si nanocrystalline films <i>Novikov Sergey, Burkov A.T.</i> .....	401
Effect of surface chemical nitridation on characteristics of GaAs photodiodes <i>Kontrosh Evgeny Vladimirovich, Lebedeva N.M., Kalinovskiy V.S., Soldatenkov F.Y., Ulin V.P.</i> .....	402



## Physics of quantum structures

403

Angular dependence of quantum oscillations of magnetoresistance in strongly anisotropic quasi-two-dimensional metals <i>Mogilyuk Taras Igorevich, Grigoriev P.D.</i> .....	403
Study of negative circular polarization dynamics of InP/InGaP quantum dots luminescence in transverse magnetic field <i>Nekrasov Sergei Vasilievich, Kusraev U.G.</i> .....	403
Measurements of spin-wave stiffness in helimagnets by small-angle neutron scattering <i>Sukhanov Aleksandr Sergeevich, Grigoriev S.V., Altynbaev E.V., Siegfried S.-A.</i> .....	404
Valley splitting in lead selenide nanowires <i>Avdeev Ivan Dmitrievich, Nestoklon M.O.</i> .....	404
Microwave radiation absorption and Shubnikov-de Haas oscillations in InAs/GaSb/AlSb composite quantum wells based on the broken-gap type II heterojunction <i>Kochman Igor Vladimirovich, Veinger A.I., Mikhailova M.P., Semenikhin P.V., Kalinina K.V., Pangrac J., Hospodkova A., Hulcius E.</i> .....	405
Electron-Electron Interactions In The Highly Doped Heterojunctions <i>Safoshkin Aleksei Sergeevich, Dubois A.B., Bukhenskii K.V., Kucheryavyy S.I.</i> .....	405
Electroreflectance of periodic heterostructures with triple InAs/GaAs quantum wells <i>Bolshakov Andrey Sergeevich, Chaldyshev V.V., Babichev A.V., Kudryashov D.A., Gudovskikh A.S., Morozov I.A., Sobolev M.S., Nikitina E.V.</i> .....	405
Resonant electronic excitation energy transfer by Dexter mechanism in the quantum dot system <i>Samosvat Dmitriy Mikhailovich, Chikalova-Luzina O.P., Vyatkin V.M., Zegrya G.G.</i> .....	406
Exchange-coupled complexes Mn ions - localized holes in (CdMn)Te/(CdMg)Te quantum wells with 2D hole gas <i>Gurin Aleksandr Sergeevich, Tolmachev D.O., Romanov N.G.</i> .....	406
The plasmonic enhancement of quantum dots luminescence <i>Matyushkin Lev Borisovich</i> .....	406
Ferromagnetic properties of (Ga,Mn)As and (In,Mn)As nanowires <i>Reznik Rodion Romanovich</i> .....	407
Silicon nanocrystal: deformation effect <i>Gert Anton Vladimirovich</i> .....	407
Interband light absorption by holes in deep quantum wells <i>Pavlov Nikolay Vladimirovich</i> .....	407
Influence of As nano-inclusions on the photo luminescence of InAs quantum dots in GaAs <i>Kosarev Alexander Nikolaevich, Chaldyshev V.V., Nevedomskii V.N., Bert N.A., Preobrazhenskii V.V., Putyato M.A., Semyagin B.R.</i> .....	407

## Plasma physics, hydrodynamics and aerodynamics

409

Angular-energy spectra of nonlinear Thomson scattering for an intense tightly focused laser pulse up to the diffraction limit <i>Vais Olga Evgen'evna, Bochkarev S.G., Bychenkov V.Yu., Andriyash I.A.</i> .....	409
---	-----

Optimized Doppler reflectometry on L-2M stellarator to study plasma turbulence <i>Kharchevskii Anton Aleksandrovich, Malakhov D.V., Skvortsova N.N</i> .....	410
Study of the structure of natural convection over heated horizontal disc <i>Khrapunov Evgenii Fedorovich</i> .....	410
Experimental investigation of nonlinear oscillations of gas in the tube in the transition to shock waves near resonances <i>Shaydullin Linar Radikovich</i> .....	410
Using DDES and IDDES with shear layer adapted subgrid length scale for separated flows computations <i>Guseva Ekaterina, Garbaruk A., Strelets M.</i> .....	411
Approximate semi-empirical method for determining friction axisymmetric bodies <i>Nesterenko Ekaterina Anatolyevna, Bondarev A.E.</i> .....	411
Adjustment of the $k-\omega$ SST turbulence model for the prediction of airfoil characteristics near the stall <i>Matyushenko Aleksey Alekseevich, Garbaruk A.V.</i> .....	411
Relative particle densities of the $H_2$ , HD, $D_2$ molecules in glow and arc discharges in the low preure hydrogen-deuterium mixtures <i>Zhukov Alexey Sergeevich, Lavrov B.P.</i> .....	412
Investigation of interaction between the supersonic airflow and the pulsed gas discharge <i>Monakhov Nikolai Alexandrovich, Bobashev S.V., Belik V.P., Petrenko M.V., Popov P.A., Sakharov V.A.</i> .....	413
Comparison of curvature-rotation corrections for $k-\omega$ SST model <i>Stabnikov Andrey Sergeevich, Garbaruk A.V.</i> .....	413
Simulation of laser plasma generation procees of Alfvén and collisionle shock waves in the space plasma <i>Prokopov Pavel Anatolyevich, Boyarintsev E.L., Zakharov Y.P., Melekhov A.V., Ponomarenko A.G., Posukh V.G., Tishchenko V.N., Shaikhislamov I.F., Terekhin V.A.</i> .....	413
Investigation of the transition between the LES and RANS subzones for simulations of wall-bounded turbulent flows within zonal RANS-LES approaches <i>Gritskovich Mikhail Sergeevich</i> .....	414
Relativistic plasma resonance in inhomogeneous laser-produced plasma <i>Metelskii Igor Igorevich, Kovalev V.F., Bychenkov V.Yu.</i> .....	414
Effect of conjugated heat transfer in the heat flow in the shock tube <i>Kuznetsov Egor, Poniaev S.A.</i> .....	415
Waves on a Relativistic Electron Beam in Plasma under Ion Focusing Conditions <i>Chernenco Julia Sergeevna, Sheinman I.L.</i> .....	415
The principle of maximum randomne in the theory of developed turbulence: A model with maximum parity violation <i>Kulikov Anatoly</i> .....	415
Investigation of the effect of acoustic streaming in a gas chamber on the parameters of a glow discharge <i>Fadeev Sergey Alekseevich, Saifutdinov A.I.</i> .....	416
Plasma rail accelerator for conducting coatings synthesis <i>Tverdokhlebov Konstantin Valer'evich, Poniaev S.A., Zhukov B.G., Bobashev S.V., Kurakin R.O.</i> .....	416

## Physics of ferroics

417

Magnetolectric effect in layered structures in the region of electromechanical resonance <i>Galichyan Tigran, Filippov D.A.</i> .....	417
Inverse magnetolectric effect in polarized and magnetized piezoferrite hollow structures <i>Radchenko Grigoriy Sergeevich, Filippov D.A.</i> .....	417
Peculiarities of critical scattering in uniaxial relaxor $\text{Sr}_{0.6}\text{Ba}_{0.4}\text{Nb}_2\text{O}_6$ <i>Vanina Polina Yur'evna, Borisov S.A., Naberezhnov A.A.</i> .....	417
Effect of $\text{BaTiO}_2$ admixture on incommensurate phase in the $0,9\text{NaNO}_2+0,1\text{BaTiO}_3$ composite and on the $\text{KNO}_3$ ferroelectric phase in the $(1-x)\text{KNO}_3+(x)\text{BaTiO}_3$ composites <i>Alekseeva Olga, Naberezhnov A.A., Stukova E.V., Borisov S.A., Simkin V.G.</i> .....	418
Optical second harmonic generation study of hexagonal orthoferrites $\text{h-RFeO}_3$ ( $R = \text{Ho, Er and Lu}$ ) <i>Nefedov Sergei Gennadievich, Pavlov V.V., Pisarev R.V.</i> .....	418
Linear and nonlinear magnetolectric effect in bilayer structures based on lead zirconate titanate-nickel <i>Firsova Tatyana Olegovna</i> .....	419
The role of absorption in the laser-induced excitation of the magnetization precession in yttrium iron garnet films <i>Shamray Pavel Yuriyevich, Shelukhin L.A., Pavlov V.V., Kalashnikova A.M.</i> .....	419
Ultrafast laser-induced demagnetization in the $\text{CoFeB/MgO/CoFeB}$ magnetic tunnel junction <i>Maximov Kirill Andreevich, Shelukhin L.A., Kalashnikova A.M., Gareev R.R., Zbarsky V., Münzenberg M., Pertsev N.A.</i> .....	419
Magnetodielectric effect in perovskite-type antiferromagnets $\text{KCoF}_3$ and $\text{KNiF}_3$ <i>Dubrovin Roman, Kizhaev S.A., Pisarev R.V.</i> .....	420
Spin excitations and spin-phonon coupling in antiferromagnetic $\text{PbFeBO}_4$ <i>Prosnikov Mikhail, Pisarev R.V., Davydov V. Yu., Smirnov A.N., Sablina K.A.</i> .....	420
Features of lattice dynamics in single crystal lead zirconate -titanate with Ti concentration 0.7% <i>Andronikova Daria, Baron A., Bosak A.A., Bronwald Y., Burkovsky R., Vakhrushev S., Leontjev N., Leontjev I., Filimonov A.</i> .....	421
Study the effect of the finite width of the ferromagnetic thin film waveguide on the spectrum and the transverse distribution of the dipole-exchange spin waves <i>Popov Dmitry</i> .....	421

## Other problems of physics

422

Reduction of longitudinal ultrasonic oscillations in $\text{NaClO}_3$ crystals <i>Igisheva Alena Leonidovna, Soboleva Elvira Gomerovna</i> .....	422
Simulation of laser ablation of metals by femtosecond pulses <i>Davydov Roman Vadimovich, Antonov V.I.</i> .....	422
Aspects of symmetry of the longitudinal piezoelectric effect in crystals <i>Zamkovskaya Anastasia Igorevna, Maksimova E.M.</i> .....	423
Modeling coalescence bubbles in disperse systems with regard fractal media <i>Kumykov Tembulat Sarabievich</i> .....	423

The accelerator neutron source for boron neutron capture therapy <i>Ostreinov Yury Mihajlovic, Shchudlo I.M., Zaidi L., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Kuznetsov A.S., Makarov A.N., Sorokin I.N., Sycheva T.V, Taskaev S.Yu.</i> .....	423
Application of Strongly Focused Pulsed Electron Beam for the Gyroscope Flywheel Balancing <i>Alena O. Borduleva, Solovev V.V., Bleykher G.A., Krivobokov V.P.</i> .....	424
The study of dielectric properties of the terbium-based lanthanidomesogen <i>Sakhatskii Aleksandr Sergeevich, Dobrun L.A.</i> .....	424
The study of molecular association in the air by ma-spectrometric technique <i>Titov Yuriy Alekseevich, Kuzmin A.G.</i> .....	425
Melt-spun metallic glaes based on Fe-Co-P-B: structure, solidification, magnetic properties <i>Prahova Darja Alexandrovna, Grishin A.M., Ignahin V.S., Lugovskaya L.A., Osaulenko R.N.</i> .....	425
Structure of the cellulose received by method of mechanical destruction <i>Latuga Anastasiya Alekseevna, Loginova S.V.</i> .....	425
Heat oscillations in a one-dimension crystal <i>Simonov Maksim Valdimirovich, Krivtsov A.M.</i> .....	426
Normal-state Nernst coefficient in high-temperature superconductors of the Y-Ba-Cu-O system <i>Martynova Olga, Gasumyants V.</i> .....	426
Dynamic ferrite-ferroelectric magnonic crystal <i>Ustinova Irina, Nikitin A.A.</i> .....	428
The sol-gel transition in aqueous colloidal solutions of deagglomerated particles of detonation nanodiamond <i>Shvidchenko Aleksandr Valerievich, Aleksenskii A.E., Dideikin A.T., Eidelman E.D., Kirilenko D.A, Vul' A.Ya., Zhukov A.N.</i> .....	428
Obtaining and study of the properties of composite materials based on chitosan and chitin's nanofibrils for cellular technologies <i>Yudenko Aleksandra, Dresvyanina E.N., Smirnova N.V., Ivan'kova E.M., Yudin V.E.</i> .....	429
Study of nanomechanical oscillators based on amorphous C whiskers in vacuum and at atmospheric pressure <i>Lukashenko Stanislav Yurievich, Golubok A.O.</i> .....	429
Elasticity of InP nanowires studied by AFM <i>Geydt Pavel, Dunaevskiy M., Haggren T., Kakko J.-P., Alekseev P.</i> .....	430



---

Подписано в печать 08.10.2015. Формат 170x240. Печать цифровая.  
Тираж 250. Заказ 27-38.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
ЛИТЕО



