

Материалы секции
ФИЗИКА



17-23 апреля 2024
НОВОСИБИРСК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МНСК-2024

**АЭРОФИЗИКА • ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ • ФИЗИКА ПЛАЗМЫ • ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА •
ТЕПЛОФИЗИКА • ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ • ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ,
АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ • ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД •
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

Материалы
62-й Международной научной студенческой конференции

17–23 апреля 2024 г.

Новосибирск
2024

УДК 530/539+542+544+621
ББК В3я431
А992

А992 Аэрофизика. Фотоника и квантовые оптические технологии. Физика плазмы. Физика твердого тела. Теплофизика. Физические методы в естественных науках и материаловедении. Физика элементарных частиц, астрофизика и космология. Физика сплошных сред. Инструментальные методы и техника экспериментальной физики : Материалы 62-й Междунар. науч. студ. конф. 17–23 апреля 2024 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2024. — 350 с.

ISBN 978-5-4437-1620-6

Данное издание представляет собой публикации тезисов 62-й Международной научной студенческой конференции 2024 г. (МНСК-2024) по физике (аэрофизика; фотоника и квантовые оптические технологии; физика плазмы; физика твердого тела; теплофизика; физические методы в естественных науках и материаловедении; физика элементарных частиц, астрофизика и космология; физика сплошных сред; инструментальные методы и техника экспериментальной физики).

Материалы конференции представляют интерес для студентов, аспирантов, преподавателей, научных работников, сотрудников образовательных учреждений.

**УДК 530/539+542+544+62
ББК В3я431**

ISBN 978-5-4437-1620-6
DOI 10.25205/978-5-4437-1620-6

© СО РАН, 2024
© Новосибирский государственный
университет, 2024

SIBERIAN BRANCH OF RAS
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NOVOSIBIRSK STATE UNIVERSITY

ISSC-2024

**AEROPHYSICS • PHOTONICS AND QUANTUM OPTICAL TECHNOLOGIES
• PLASMA PHYSICS • SOLID STATE PHYSICS • THERMOPHYSICS •
PHYSICAL METHODS IN NATURAL SCIENCES • ELEMENTARY PARTICLE
PHYSICS, ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY • CONDENSED MATTER •
INSTRUMENTATION IN EXPERIMENTAL PHYSICS**

Proceedings
of the 62nd International Scientific Student Conference

April, 17–23, 2024

Novosibirsk
2024

УДК 530/539+542+544+621
ББК В3я431
А992

A992 Aerophysics. Photonics and quantum optical technologies. Plasma physics. Solid state physics. Thermophysics. Physical methods in natural sciences. Elementary particle physics, astrophysics and cosmology. Condensed matter. Instrumentation in experimental physics : Proceedings of the 62nd International Scientific Student Conference. April, 17–23, 2024 / Novosibirsk State University. — Novosibirsk : IPC NSU, 2024. — 350 p.

ISBN 978-5-4437-1620-6

This edition represents the publications of the 62nd International Scientific Student Conference 2024 (ISSC-2024) theses in physics (aerophysics; photonics and quantum optical technologies; plasma physics; solid state physics; thermophysics; physical methods in natural sciences; condensed matter; elementary particle physics, astrophysics and cosmology; instrumentation in experimental physics).

These Conference materials can be of interest for students, Ph.D. candidates, professors, scientists, and members of educational institutions.

**УДК 530/539+542+544+62
ББК В3я431**

ISBN 978-5-4437-1620-6
DOI 10.25205/978-5-4437-1620-6

© SB RAS, 2024
© Novosibirsk State University, 2024



АЭРОФИЗИКА

Научный руководитель секции — акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. *В. М. Фомин*

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, проф. *С. Г. Миронов*

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук *А. А. Яцких*

Экспертный совет секции

д-р физ.-мат. наук *А. Н. Кудрявцев*

д-р физ.-мат. наук *А. Е. Медведев*

д-р физ.-мат. наук *Г. А. Поздняков*

канд. физ.-мат. наук *А. С. Верещагин*

канд. физ.-мат. наук *Г. В. Шоев*

канд. физ.-мат. наук *А. А. Филиппов*

AEROPHYSICS

Section scientific supervisor — Acad. RAS, Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *V. M. Fomin*

Section Head — Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *S. G. Mironov*

Responsible Secretary — Cand. Phys.-Math. Sci. *A. A. Yatskikh*

Section scientific committee

Dr Phys.-Math. Sci. *A. N. Kudryavtsev*

Dr Phys.-Math. Sci. *A. E. Medvedev*

Dr Phys.-Math. Sci. *G. A. Pozdnyakov*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. S. Vereshchagin*

Cand. Phys.-Math. Sci. *G. V. Shoev*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. A. Filippov*

УДК 661.965

Формирование Pd-мембран на подложках Al_2O_3 , полученных из прекерамической бумаги методом ИПС

К. С. Гусев, Ж. Г. Забанов

Томский политехнический университет

Большая часть производимого водорода основана на использовании ископаемого топлива, соответственно, она подвержена загрязнению и требует очистки для дальнейшего применения [1]. Среди технологий очистки мембранная выделяется благодаря энергоэффективности, компактности и легкой интеграцией в промышленные процессы [2].

Работа посвящена формированию Pd-мембран на подложках Al_2O_3 , полученных из прекерамической бумаги методом искрового плазменного спекания, и исследованию их физико-механических характеристик. Поддержки спекались при $T = 1200-1400$ °C при $P = 10$ МПа в течение 5 мин. Методом рентгенофазного анализа установлено, что подложки содержат одну фазу $\alpha-Al_2O_3$. Сканирующей электронной микроскопией исследовалась микроструктура. Открытая пористость и кажущаяся плотность поддержек определялась методом гидростатического взвешивания. Прочность на изгиб поддержек определена методом трехточечного изгиба. Для измерения проницаемости водорода j и потока водорода F полученных поддержек и мембран использовался автоматизированный комплекс управления газовыми процессами (GRAM).

Формирование мембран осуществлялось химическим осаждением Pd на подложку. Анализ микроструктуры сформированных поддержек показал, что все подложки имеют пористую структуру вне зависимости от T спекания. Повышение T приводит к уплотнению поддержек и, как следствие, росту прочности на изгиб. Однако это способствует уменьшению j и F поддержек. $T = 1200$ °C является недостаточной ввиду разрушения подложки во время испытаний на газопроницаемость. Оптимальной T синтеза является 1300 °C, так как подложки демонстрируют высокие j и F , а также удовлетворительную прочность. Нанесение Pd приводит к росту проницаемости и потока водорода.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSWW-2024-0001).

1. Schorer L., Schmitz S., Weber A. Membrane based purification of hydrogen system (MEMPHYS) // Int. J. Hydr. Energy. 2019. Vol. 44. P. 12708–12714.
2. Pal N., Agarwal M., Maheshwari K., Solanki Y. S. A review on types, fabrication and support material of hydrogen separation membrane // Mater. Today Proc. 2020. Vol. 28. P. 1386–1391.

Научный руководитель — канд. техн. наук М. С. Сыртанов

Течение в пограничном слое с двумя областями неустойчивости

Н. В. Демиденко

Новосибирский государственный университет
Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Рассматривается устойчивость течений в пограничном слое на стреловидном крыле за линией минимума давления. В этом случае в предотрывной области возникают профили скорости с двумя точками перегиба. Ранее в работе [1] рассматривалась устойчивость подобных профилей в упрощенной постановке. Было найдено две неустойчивости. Расчет показал, что для таких профилей скорости существуют две пересекающиеся нейтральные кривые, ограничивающие область неустойчивости; значения фазовой скорости распространения возмущений вблизи критического числа Рейнольдса близки к значениям скорости в точке перегиба, расположенной ближе к твердой границе, минимальное число Re вдоль второй нейтральной кривой не является критическим. В работе [2] рассмотрены двухпараметрические профили скорости Гастера, моделирующие профили, наблюдаемые в предотрывной области в пограничном слое на стреловидном крыле. Были показаны существенные преимущества таких профилей: в области развитого трехмерного погранслоя отклонение этих профилей от расчетных на 1–2 порядка меньше отклонения классических автотельных профилей; в предотрывной области с положительным градиентом давления эти профили адекватно описывают S-образные профили поперечной скорости.

В данной работе рассмотрена устойчивость во времени профилей Гастера, имеющих две точки перегиба, при различных параметрах продольного и поперечного волновых чисел и конечных числах Рейнольдса. Показано, что такие эффективные профили (проекции скорости вдоль волнового вектора) наблюдаются в узкой области параметров при продольном волновом числе, близком к нулю. В исследуемой области параметров неустойчивость, связанная с появлением второй точки перегиба, лежит внутри первой области неустойчивости. Проведено сравнение других характеристик неустойчивостей. Сделаны некоторые предположения о роли обеих неустойчивостей в процессе перехода течения к турбулентности.

1. Лутовинов В. М. Пример течения в пограничном слое с двумя областями неустойчивости // Уч. зап. ЦАГИ. 1973. Т. 4, № 6. С. 88–93.
2. Бойко А. В., Демиденко Н. В. Использование двухпараметрических профилей скорости для трехмерных пограничных слоев // Прикл. механика и техн. физика. 2023. № 6. С. 144–154.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН А. В. Бойко

УДК 533.9

Исследование движения дугового разряда в самосогласованном магнитном поле

И. В. Дрижак

Новосибирский государственный университет

При разработке современных летательных аппаратов важно обеспечить высокое аэродинамическое качество планера, что может быть достигнуто путем снижения газодинамического сопротивления элементов конструкции. Одним из перспективных методов управления пристеночными течениями является магнитогидродинамический (МГД) способ, основанный на создании объемных управляющих сил в ионизованном потоке газа в присутствии электрических и магнитных полей [1]. Для реализации локализованного МГД-взаимодействия вблизи поверхности могут быть использованы различные электромагнитные актуаторы [2].

В данной работе рассматривается модель МГД-актуатора, принцип действия которого основан на движении дугового электрического разряда в самосогласованном магнитном поле. Модель актуатора представляет собой соленоид, последовательно соединенный с разрядным промежутком, расположенным на плоской поверхности на торце соленоида. Электрический пробой происходил при атмосферном давлении. Для инициации пробоя и последующего горения дуги на схему подавались одиночные импульсы напряжения длительностью от 10 до 40 мкс. Горение разряда совершалось при величине тока около 40 А. В результате МГД-взаимодействия происходило ускорение электрической дуги вдоль плоской диэлектрической поверхности, расположенной на торце катушки. Получены вольтамперные характеристики электрического разряда и изображения движения дуги с помощью высокоскоростной съемки. Динамические вольтамперные характеристики разряда позволили выделить основные стадии горения разряда при его движении в магнитном поле соленоида: фаза пробоя, основная стадия горения расширяющейся дуги, фаза угасания разряда. Результаты работы могут быть использованы для управления структурой пристеночных газовых течений и, в частности, для снижения сопротивления трения.

1. Фомичев В. П., Коротаева Т. А., Ядренкин М. А. Развитие методов магнитоплазменной аэродинамики в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН // Прикл. механика и техн. физика. 2020. Т. 61, № 5. С. 52–67.
2. Moralev I. et al. Gas dynamics of the pulsed electric arc in the transversal magnetic field // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53, No. 42. P. 425203.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. А. Ядренкин

Модель гемодинамики автономного комплекса «сердце + легкие»

А. Д. Ерохин

Новосибирский государственный университет
Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Заболевания, связанные с нарушением сердечно-сосудистой системы, являются лидирующей причиной смертности в мире. Чтобы уменьшить риски и повысить продолжительность жизни, важно учесть и предвидеть последствия воздействия внешних факторов на организм человека. В связи с этим решалась задача моделирования автономного комплекса «сердце + легкие».

В данной работе математическое моделирование биологических систем проводилось на основе квазиодномерного приближения [1]. Модель кровообращения, взятая за основу математической имитационной модели [2], была написана на языке программирования Modelica. Разработана принципиальная схема круга кровообращения, каждый элемент которой был описан математически по аналогии с законом Ома. Компоненты модели включают индуктор, клапаны, источник давления (компрессор) и эластичный компартмент с переменной податливостью. Объединение этих элементов в модели позволяет моделировать основные аспекты гемодинамики и сердечной деятельности.

На основе моделирования было проведено два численных эксперимента: малый круг кровообращения и большой круг кровообращения с заменой периферийных сосудов на резервуар объемом 3,5 л. Модель позволяет определить параметры кровообращения, такие как давление и расход, а также напряжение на стенках и деформацию сосудов в любой точке системы «сердце + легкие».

В результате моделирования был разработан цифровой двойник (численная математическая модель) транспортного кувеза [3] донорской системы «сердце + легкие». Проведено тестирование цифрового двойника на экспериментальных данных двух экспериментов и показано, что цифровая модель автономной системы «сердце + легкие» достаточно хорошо описывает гемодинамические параметры реальных экспериментов.

1. Kofránek J., Ježek F. Использование языка Моделика для моделирования физиологических систем на примере модели гемодинамики // Lab. Biocybernetics, Charles University. Prague, 2015.
2. Кошелев В. Б., Мухин С. И., Соснин Н. В., Фаворский А. П. Математические модели квази-одномерной гемодинамики: метод. пособие. М.: Макс Пресс, 2010. 114 с.
3. Патент на полезную модель № RU 221731 U1 / Жульков М. О., Сирота Д. А. и др. Приоритет полезной модели 25 сентября 2023 г.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. Е. Медведев

УДК 533.6:534.8

Изучение аэротермоакустического эффекта в резонирующей полости для биканальной системы Гартманского типа

О. А. Колбасова

Сибирский государственный университет
водного транспорта, Новосибирск

Интерес к исследованию газодинамических процессов в различных технических устройствах обусловлен их широким применением, начиная с очистки воды и заканчивая двигателями, основанными на эффекте Шпренгера [1]. Одним из таких устройств является газодинамический излучатель Гартмана [2]. Данное устройство состоит из сопла и соосно установленной резонансной полости. С помощью свистка Гартмана формируется высокоинтенсивный акусто-конвективный поток. Одним из приложений данного технического устройства в ИТПМ СО РАН является сушка пористых материалов при комнатной температуре [3].

Экспериментальные исследования выполнены на акустической установке ИТПМ СО РАН [2], состоящей из двух перпендикулярных каналов. Первый канал является классическим свистком Гартмана, на его резонаторе установлено 14 термопар. Первая термопара расположена внутри резонатора возле глухого торца для фиксации температуры потока газа, остальные измеряют температуру поверхности вдоль резонатора. После обработки полученных экспериментальных данных было выявлено, что самая высокая температура наблюдается возле закрытого торца, это обусловлено отражением набегающих волн от жесткой преграды. Для описывания полученных экспериментальных данных привлекается одномерное нестационарное уравнение теплопроводности, дополненное соответствующими эксперименту начальными и граничными условиями. Решение задачи осуществлялось методом разделения переменных. Проведенное тестирование начальных данных позволило определить оптимальное количество членов ряда. Выполнено параметрическое исследование коэффициента температуропроводности. Получено распределение температур на разные моменты времени. Проведена верификация аналитического решения с данными, полученными в натурных экспериментах.

1. Бочарова О. В., Лебедев М. Г. Аэроакустический эффект Гартмана — сто лет исследований и текущее состояние вопроса // Инженер. журн.: наука и инновации. 2018. № 9 (81).
2. Zhilin A. A., Golubev E. A. Experimental study of the amplitude-frequency characteristics in a two-channel system // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 1939. P. 020016.
3. Жилин А. А. Изучение процессов пропитки и сушки пористых материалов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (3). С. 777–778.

Научный руководитель — канд. физ.-мат наук, доц. А. А. Жилин

Разработка сильноточного низкоэрозионного термохимического катода

М. Е. Колпаков

Новосибирский государственный университет

В некоторых областях применения плазмотронов требуется создание высокоэнтальпийных струй воздушной плазмы с высокой степенью чистоты. Воздушная плазма в процессе работы плазмотрона загрязняется эродированным материалом электродов. Основной вклад в загрязнение плазменного потока продуктами эрозии электродов вносит катод. Минимальным уровнем эрозии в воздушной среде обладают термохимические катоды. Недостатком таких катодов является ограниченный диапазон рабочих токов, обусловленный резким ростом уровня эрозии электрода при токах свыше 250–300 А. Задачей работы является увеличение силы тока термохимического катода при сохранении низкого уровня эрозии.

Конструкция катода с лепестковым расположением термохимических вставок увеличивает площадь теплоотвода и площадь привязки дуги по сравнению с одиночной вставкой, что положительно сказывается на уровне эрозии. Вторым фактором повышения рабочего диапазона токов является уменьшение плотности тока в столбе дуги вследствие понижения ее теплотерь, вызванных обтеканием газовым потоком внутри стаканообразного канала плазмотрона. Для определения скоростей газового потока было проведено численное моделирование течения газа внутри канала плазмотрона в программном пакете ANSYS Fluent. Использовались модели полные и секторальные в виде одной девятой части стаканообразного канала плазмотрона. Диапазон массовых расходов составлял от 5 до 12 г/с на полноразмерную модель. Результаты расчетов показали, что скорость закрученного потока на границе «дуга — поток газа» составляет от 15 до 28 м/с, что почти в 5 раз меньше среднего значения в потоке газа. По данным расчета были определены расходы плазмообразующего газа для испытания на плазмотроне с торцевым медным катодом и запрессованными в него гафниевыми вставками. Проведены эксперименты с силой тока до 550 А. Получены фотоснимки следов привязки дуги.

Научный руководитель — С. П. Ващенко

УДК 533.2, 533.15, 542.7

Исследование водородно-гелиевой проницаемости кремнеземных микросфер

И. А. Майор

Новосибирский государственный университет
Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Данная работа является частью исследований по применению мембранно-сорбционного метода для разделения водородно-гелиевых смесей. Разделение данных смесей традиционными криогенными, адсорбционными и мембранными методами связано с целым рядом сложностей ввиду их физико-химических свойств: низкие температуры сжижения 4,22 и 20,28 К для гелия и водорода соответственно; низкая селективность известных полимерных мембран.

Мембранно-сорбционный метод выделения гелия из гелийсодержащих смесей, предложенный в ИТПМ СО РАН, основан на использовании в качестве мембранных элементов полых микросферических частиц из силикатных материалов и сорбентов на их основе. Вследствие этого такие частицы могут использоваться как микробаллоны, улавливающие гелий из смеси и удерживающие его. При этом, согласно литературным источникам, селективность силикатных материалов по отношению к гелию и водороду может значительно различаться (до 2 порядков в зависимости от химического состава стеклофазы, количества и природы присутствующих фаз включений [1, 2]), что может быть использовано при разделении водород-гелиевых смесей.

В работе проводится экспериментальное изучение водородно-гелиевой проницаемости кремнеземных микросфер. Исследуется влияние состава газовой смеси на процессы поглощения. Получены коэффициенты водородной и гелиевой проницаемости для исследуемых микрочастиц, проведено сравнение с ранее исследованными сорбентами [3].

1. Аппен А. А. Химия стекла. Л.: Химия, Ленинград. отд-е, 1970. 350 с.
2. Шелби Д. Структура, свойства и технология стекла / пер. с англ. М.: Мир, 2006. 288 с.
3. Зиновьев В. Н., Казанин И. В., Пак А. Ю. и др. Проницаемость полых микросферических мембран по отношению к гелию // Инженер.-физ. журн. 2016. Т. 89. С. 24–36.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Казанин

**Оценка возможности применения FlowVision
для численного моделирования процессов
сверхзвукового взаимодействия набегающего потока
и выдува с боковой поверхности твердого тела струи**

Н. А. Рябченко

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

На сегодняшний день с развитием численных методов в газовой динамике широкое распространение получили различные программные пакеты, позволяющие численно моделировать газодинамические задачи различной сложности. Разнообразие газодинамических задач требует различных подходов при их решении, а значит, и проверки возможностей методик численного моделирования на основе конкретных и хорошо известных случаев.

Основной задачей исследования являлся процесс отработки алгоритмов работы в программном пакете FlowVision для решения сложных газодинамических задач сверхзвукового взаимодействия набегающего потока и струи. Проверка возможности решения рассматриваемого класса задач проводилась путем верификации полученных результатов с данными, представленными в известной работе [1]. В указанной работе представлены как экспериментальные данные распределения коэффициента давления на поверхности обтекаемого тела при выдуве газовой струи с поверхности этого тела, так и результаты численного моделирования, полученные в различных программных продуктах.

На первом этапе была рассмотрена осесимметричная постановка задачи. Это позволило сократить время на анализ подхода численного моделирования в программном пакете FlowVision и оптимизацию сетки расчетной области. Рассмотрены различные параметры адаптации сетки: адаптация по градиенту давления, сгущение начальной сетки, а также адаптация пристеночного слоя.

После оптимизации подхода к численному моделированию, задача была рассмотрена в трехмерной постановке. Моделировалось обтекание осесимметричного тела с выдувом струи и без него.

По результатам исследования был проведен анализ возможности применения программного пакета FlowVision для решения сложных газодинамических задач сверхзвукового взаимодействия набегающего потока и струи. Определены и предложены рекомендации по использованию FlowVision для решения газоструйных задач в сверхзвуковом потоке.

Исследование выполнено в рамках проекта при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-79-01057).

1. Gnemmi P., Adeli R., Longo J. Computational Comparison of the Interaction of a Lateral Jet on a Supersonic Generic Missile // AIAA Atmos. Flight Mech. Conf. Exhibit Authors. 2008. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2008-6883> (дата обращения: 26.02.2024).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Кисловский

Особенности выбора энергоустановки для стратосферного летательного аппарата

Р. И. Семухин

Новосибирский государственный технический университет

В данный момент активно развивается рынок беспилотных стратосферных летательных аппаратов, также называемых псевдокосмическими аппаратами (ПКА).

Для изучения данной проблемы был проанализирован ряд ПКА [1, 2]. Выявлены их характерные особенности: малая масса, большая геометрическая размерность [2]. Это обусловлено особенностями полета в стратосфере. Добавляется проблема снижения удельной мощности [1, 3] любой воздухозависимой энергоустановки (ЭУ) ПКА при попадании в стратосферу.

Уменьшающаяся удельная мощность любой ЭУ ПКА при попадании в стратосферу приводит к необходимости анализа применимости других типов ЭУ для ПКА. Один из них — топливные элементы (ТЭ), которые за счет происходящей электрохимической реакции вырабатывают электроэнергию [2], используемую для работы систем ПКА. КПД ТЭ достигает 70 %. По удельной энергоемкости ТЭ превосходят аккумуляторы. Главный недостаток — невозможность их возобновления в стратосферном полете.

Технология фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) — способ, наиболее распространенный в ПКА по причине способности поддерживать длительный полет, забирая энергию из вне [3]. Есть и недостатки: КПД ФЭП — 22 %.

Особенности ЭУ ПКА требуют использовать нестандартные ЭУ. Сейчас хорошо изучены и применены только две схемы: ПКА с питанием от ФЭП и ПКА с питанием от ТЭ. Существуют типы маломощных ЭУ, которые могли бы обеспечить горизонтальный полет ПКА, например: машины Стирлинга; паровые ЭУ на низкокипящих жидкостях; электрические двигатели на термоэмиссионных элементах или на элементах Пельтье, но их увязка с конструкцией ПКА представляет собой непростую задачу. Предварительную оценку возможности применения альтернативных ЭУ в ПКА дает данная работа.

1. Житомирский Г. И. Конструкция самолетов: учеб. пособие для авиац. вузов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1995. 415 с.
2. Самойловский А. А. Методика формирования облика беспилотных летательных аппаратов с силовой установкой на солнечной энергии: дис. канд. техн. наук / Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов наук: 05.07.02. М., 2016. 148 с.
3. Клименко Н. Н. Предварительное проектирование псевдокосмических летательных аппаратов: базовые методы и критерии осуществимости // Вестн. НПО им. С. А. Лавочкина. 2015, № 1. С. 55–65.

Научный руководитель — Ю. В. Мохов



ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научные руководители секции — акад. РАН *С. Н. Багаев*, акад. РАН *А. М. Шалагин*

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, доц. *С. М. Кобцев*

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук *А. В. Иваненко*

Экспертный совет секции

академик РАН, проф. *М. П. Федорук*

чл.-корр. РАН *И. И. Рябцев*

д-р физ.-мат. наук, проф. *Е. В. Бакланов*

д-р физ.-мат. наук, проф. *П. Л. Чаповский*

д-р физ.-мат. наук *Д. В. Чуркин*

д-р техн. наук *В. П. Корольков*

канд. физ.-мат. наук *И. А. Лобач*

PHOTONICS AND QUANTUM OPTICAL TECHNOLOGIES

Section scientific supervisors — Acad. RAS *S. N. Bagaev*; Acad. RAS *A. M. Shalagin*

Section Head — Dr Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof. *S. M. Kobtsev*

Responsible Secretary — Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Ivanenko*

Section scientific committee

Acad. RAS, Prof. *M. P. Fedoruk*

Corr. Member RAS *I. I. Ryabtsev*

Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *E. V. Baklanov*

Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *P. L. Chapovsky*

Dr Phys.-Math. Sci. *D. V. Churkin*

Dr Techn. Sci. *V. P. Korolkov*

Cand. Phys.-Math. Sci. *I. A. Lobach*

УДК 530.145

Quantum Supremacy with NISQ quantum processors and simulators

Manuel Alejandro Quispe Torres

Novosibirsk State University

The classical foundation of computing based on method M for achieving any desired result R is called ‘effective’ just in case if M produces R in a finite number of steps (exact instructions). This is the base of Church-Turing thesis written as “for some algorithm that runs on some computer there is an algorithm that does the same on a Turing machine”. In a strong form it is written as “Any algorithm running on any computer can be efficiently simulated on a Turing machine” [1]. Nowadays, this is not completely true, as there are problems which could be solved efficiently in quantum computing while in classic computing the efficient solution is unknown. For quantum computing D.P. DiVincenzo [2] listed physical hardware requirements to make the quantum computing possible.

The era of quantum supremacy began when it became possible to solve the challenging problems for classical computers using already existing noisy intermediate scale quantum (NISQ) technologies [3]. Google reports the first calculation performed by a quantum computer achieving quantum supremacy in 2019 [4].

We study the problem of quantum supremacy using a mathematical model for quantum processors to measure the process fidelity and entanglement fidelity, by measuring the distance from ideal output. Holistic characterizations let us measure overall performance of the whole processor in some way that either implies supremacy.

Cross-entropy benchmarking (XEB) is a technique for assessing fidelity of a wide variety of quantum circuits with many qubits by leveraging the properties of random quantum programs. Cross entropy is a measure of dissimilarity between two probability distributions and XEB uses it, as a metric for comparing ideal and experimental circuit outcomes. The process involves (1) generation a set of random programs that act as a benchmark to assess the performance of the target quantum circuit; (2) applying the generated random programs to the quantum circuit under evaluation and then collecting the resulting measurement outcomes for each program; (3) comparison of outcomes with the expected in this step is necessary to calculate the cross entropy; (4) using cross entropy as fidelity metric. These steps were followed to propose a technique for component level fidelities to accurately predict the performance of the system, showing that quantum information behaves as expected scaling to large systems.

1. Church A. Review of Turing 1936 // J. Symbolic Logic. 1932. Vol. 2. P. 42–43.
2. DiVincenzo D.P. The Physical Implementation of Quantum Computation // Fortschritte der Physik. 2000. Vol. 48 (9–11). P. 771–783.
3. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond // Quantum. 2018. Vol. 2. P. 79.
4. Arute F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature. 2019. V. 574. P. 505–510.

Scientific supervisor — Cand. Phys.-Math. Sci. I. I. Beterov

УДК 535.341.6:621.373.826

Спектроскопия поглощения аммиака методом дисперсионного преобразования Фурье

Н. А. Апрелов

Новосибирский государственный университет

Одной из актуальных задач спектроскопии поглощения для анализа газовой смеси является упрощение измерительной схемы с одновременным увеличением количества детектируемых газов и повышением чувствительности прибора. Для детектирования нескольких различных газов необходим широкополосный источник инфракрасного излучения, для спектрального анализа которого следует применять громоздкие анализаторы спектра, требующие длительного накопления данных. В то же время существует метод, позволяющий устранить необходимость в оптическом спектральном анализаторе благодаря преобразованию спектра оптического сигнала во временную область с помощью дисперсионного элемента (например, оптического волокна). Данный метод получил название «Дисперсионное преобразование Фурье» (ДПФ).

Настоящая работа направлена на создание ДПФ-спектрометра с использованием импульсного лазера с пассивной синхронизацией мод. Центральная длина волны лазера 1531,6 нм и частота 25 МГц позволяют проводить измерения спектра поглощения аммиака с временным разрешением 40 нс и спектральным разрешением 0,2 нм. В рамках работы была собрана установка для газового анализа методом ДПФ, проведен анализ концентрации примесного аммиака в воздухе, также определены практические ограничения метода, выведены оценки для минимальной измеряемой концентрации. Кроме того, обсуждены возможности повышения чувствительности прибора и его спектрального разрешения с целью дальнейшего увеличения точности измерений.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. Д. Ватник

УДК 535.3, 535.4

**Формирование и исследование терагерцевых вихревых
бесселевых пучков, полученных с помощью отражающих аксиконов**

Н. А. Баздырев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В настоящее время наблюдается спрос на увеличение скорости беспроводной передачи данных. Требуется модернизация старых технологий и поиск новых подходов для решения данной задачи. Одним из таких подходов является применение бесселевых пучков [1] с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Бесселевы пучки с ОУМ имеют ряд замечательных свойств, такие как «бездифракционность» и «самовосстановление», что делает их устойчивыми к оптическим флуктуациям среды (тепловых, конвекционных, мелкодисперсных аэрозолей и др.). Наличие ОУМ позволяет осуществлять мультиплексирование, что, в свою очередь, можно использовать для повышения плотности каналов передачи данных. Переход из микроволнового в терагерцевый (ТГц) диапазон частот приведет к увеличению скорости передачи информации и пропускной способности каналов связи, а также к уменьшению по сравнению с видимым диапазоном рассеяния пучка в пространстве из-за большой длины волны ТГц-волн.

В данной работе вихревые бесселевы пучки формировались с помощью бинарных спиральных фазовых отражающих аксиконов, изготовленных на кремниевой подложке методами фемтосекундной лазерной абляции и реактивно-ионного травления с последующим напылением меди. В качестве источника ТГц-излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах (НЛСЭ). Пучки гауссовой моды НЛСЭ, отражаясь от аксиконов, трансформировались в бесселевы пучки с топологическими зарядами $l = -3$ и $l = -9$. Величина топологического заряда l соответствовала количеству спиралей у аксикона. Бесселевы распределения интенсивностей пучков формировались и сохранялись на расстояниях от аксиконов для $l = -3$: $z = 60 \div 170$ мм и $z = 70 \div 100$ мм при $\lambda = 141$ мкм и $\lambda = 203$ мкм; $l = -9$: $z = 80 \div 150$ мм и $z = 70 \div 120$ мм при $\lambda = 141$ мкм и $\lambda = 203$ мкм соответственно. Согласно численным расчетам, в рамках скалярной теории дифракции аналогичные расстояния составили при $l = -3$: $z = 30 \div 190$ мм и $z = 20 \div 130$ мм; $l = -9$: $z = 70 \div 150$ мм и $z = 50 \div 100$ мм соответственно. Энергетическая эффективность преобразования гауссовой моды в бесселеву в области формирования составила около 42 %, что является максимально возможной.

1. Durnin J., Miceli Jr. J. J., Eberly J. H. Diffraction-free beams // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, No. 15. P. 1499.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Герасимов

УДК 543.4

Дисперсия оптических характеристик кристалла GUHP в видимом, ближнем инфракрасном и терагерцевом диапазонах

С. А. Бычкова

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

В рамках активного развития терагерцевого диапазона излучения поиск компактных и эффективных источников с высокой спектральной яркостью остается актуальной проблемой. Один из методов генерации терагерцевого излучения — использование нелинейных кристаллов для преобразования частот лазерного излучения. В настоящем исследовании представлено изучение оптических свойств полуорганического кристалла гидрофосфита гуанилмочевины (GUHP) [1] в терагерцевом (ТГц) и оптическом диапазонах с целью оценки его потенциала как узкополосного терагерцевого источника.

Исследование выявило относительную дисперсию угла между диэлектрическими и кристаллографическими осями на субтерагерцевых частотах, характеризуемую пространственной группой S_6 кристалла, оцененную в $2,3^\circ$ на 100 ГГц, и показало, что в диапазоне 420–1064 нм дисперсия отсутствует. Мы также провели измерения показателя преломления и коэффициента поглощения в диапазоне частот 0,2–2,2 ТГц, используя импульсный широкополосный терагерцевый спектрометр (THz-TDS).

Измерен спектр пропускания кристалла в диапазоне от 300 до 850 нм в поляризованном свете для осей x и z . Показано, что кристалл обладает высокой прозрачностью для длин волн Ti:Sa-лазера. Также была измерена дисперсия трех компонент показателя преломления кристалла GUHP в диапазоне 517–1538 нм.

Полученные данные будут использованы для расчетов нелинейных преобразований частот лазерных источников в терагерцевый диапазон спектра, а также для поиска срезов кристаллов, обладающих фазовым согласованием для процесса генерации разностной частоты в ТГц-области спектра.

В работе использовалось оборудование, предоставленное ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

1. Anton Sinko et al. A monoclinic semiorganic molecular crystal GUHP for terahertz photonics and optoelectronics // Sci. Rep. 2021. Vol. 11 (1).

Научный руководитель — канд. техн. наук Н. А. Николаев

УДК 535.016

Исследование оптических характеристик металлических поверхностей методом терагерцевой плазмонной интерферометрии

В. С. Ванда

Новосибирский государственный университет

Для увеличения частоты передачи сигналов в электронных устройствах, ограниченных гигагерцевым диапазоном, возможен переход в терагерцевую (ТГц) область частот с применением поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). При разработке плазмонных компонент важно знать оптические константы реальных поверхностей. Оптические константы, определенные по спектрам пропускания и поглощения, значительно отличаются от констант, измеренных по характеристикам ППП. Поскольку ППП распространяются вдоль границы «проводник — диэлектрик» и поле ППП проникает в глубь проводника на толщину скин-слоя, необходимо учитывать эффективную диэлектрическую проницаемость поверхностного слоя проводника [1]. Эффективные оптические константы проводящих поверхностей зависят от материала, метода и условий изготовления, шероховатости.

В данной работе сделана попытка применить модель эффективной среды Бруггемана для вычисления диэлектрической проницаемости поверхности золота, нанесенного на полированную стеклянную пластину с помощью магнетронного распыления. Фактор заполнения золота, используемый в модели, был измерен по изображениям экспериментальных образцов, полученным на атомно-силовом микроскопе. Применимость теоретической модели была оценена посредством сравнения численных расчетов с экспериментами, выполненными на плазмонном интерферометре Майкельсона. В качестве источника излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах с длиной волны 195 мкм.

Результаты продемонстрировали лучшее соответствие эксперимента с моделью Бруггемана, чем с моделью Друде для объемного металла, не учитывающей шероховатости поверхности. Проведены эксперименты на золотых пленках толщиной 300 нм с диэлектрическим покрытием сульфида цинка, нанесенных на два типа подложек, отличающихся шероховатостью. Наблюдаемые энергетические потери ППП зависели от степени шероховатости подложки, на которую наносился слой металла, а также от толщины диэлектрического покрытия. При определенной толщине покрытия наблюдался минимум энергетических потерь ППП.

1. Gerasimov V. V. et al. Obtaining the Effective Dielectric Permittivity of a Conducting Surface in the Terahertz Range via the Characteristics of Surface Plasmon Polaritons // Appl. Sci. 2023. Vol. 13. P. 7898.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Герасимов

УДК 535-15

Исследование нелинейно-оптических характеристик кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ при воздействии излучением с длиной волны 1053 нм

М. В. Вострикова, Е. Ю. Ерушин

Новосибирский государственный университет

В настоящее время особый интерес представляет выращивание новых нелинейных кристаллов бариевых халькогенидов. Указанные кристаллы имеют широкий диапазон пропускания, высокую лучевую стойкость и относительно высокий коэффициент эффективной нелинейности [1], благодаря чему они применяются в создании перестраиваемых в среднем инфракрасном диапазоне источников излучения, а именно параметрических генераторов света (ПГС). Такие источники используются во многих областях науки, медицины и промышленности, в частности активно применяются для газоанализа.

В данной работе исследовались нелинейно-оптические характеристики нового нелинейного кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$, а именно нелинейный показатель преломления n_2 и нелинейное поглощение β . При создании оптических схем очень важно учитывать данные характеристики, так как они влияют на поперечное распределение интенсивности в пучке в резонаторе ПГС и могут вызвать эффект самофокусировки. Нелинейно-оптические свойства кристалла были измерены методом Z-сканирования. Он заключается в фокусировке луча в образце и перемещении образца вдоль направления распространения луча, за счет чего меняется интенсивность внутри кристалла. Далее луч проходит через диафрагму в случае метода с закрытой диафрагмой, и при помощи детектора регистрируется его мощность.

В ходе работы был измерен коэффициент нелинейного поглощения и преломления на длине волны 1053 нм. Показано, что при увеличении частоты следования импульсов в 10 раз коэффициент поглощения увеличивается почти в два раза, а нелинейный показатель преломления изменяется почти в 7 раз. Поэтому для достижения высокой эффективности преобразования ПГС важно учитывать нелинейно-оптические характеристики кристалла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00368).

1. Petrov V., Badikov V. V., Badikov D. V. et al. Barium nonlinear optical crystals for the mid-IR: characterization and some applications // J. Opt. Soc. Am. B. 2021. Vol. 38 (8). B46-B58.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Н. Ю. Костюкова

УДК 535-14

**Измерение плотности электронно-дырочной плазмы
в полупроводнике и диэлектрических свойств планарных
проводников методом импульсной терагерцевой спектроскопии**

Д. С. Грибанов

Новосибирский государственный университет
Институт автоматике и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Растущий интерес к терагерцевому (ТГц) электромагнитному диапазону обусловлен в том числе развитием систем беспроводной связи. Например, считается, что будущие поколения связи (6G и т. д.) будут работать в субтерагерцевой области. Кремний и золото являются важнейшими материалами для современной электроники. В частности, они входят в состав большинства микросхем и полупроводниковых приборов. И хотя их свойства в СВЧ-диапазоне хорошо изучены, на настоящий момент в литературе недостаточно информации об их свойствах в ТГц-диапазоне частот электромагнитного спектра. Для дальнейшего развития подобных систем передачи данных важно иметь представление о диэлектрических свойствах золота и кремния в ТГц-диапазоне частот.

В работе показана зависимость диэлектрических свойств тонких золотых пленок, напыленных на кварцевую подложку, от толщины напыления. В экспериментах наблюдался рост проводимости при увеличении толщины от 38 до 160 нм. При этом более тонкие образцы не аппроксимируются предложенной моделью, что может быть объяснено островковой структурой исследуемых пленок. Также удалось реализовать метод измерения плотности фотоиндуцированной электронно-дырочной плазмы в образце кремния. Образец кремния облучался лазерным излучением (532 нм), затем методом импульсной терагерцевой спектроскопии измерялось пропускание ТГц-излучения образца. С помощью модели Друде по измеренному пропусканию делались выводы о плотности индуцированных зарядов в образце. Зависимость плотности плазмы от мощности накачки оказалась корневой, как и предсказывала теория.

Полученные результаты позиционируют терагерцевую спектроскопию как универсальный инструмент анализа материалов различного класса, используемых для создания оптоэлектроники телекоммуникационных систем будущих поколений.

В работе использовалось оборудование, предоставленное ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

Научный руководитель — канд. техн. наук Н. А. Николаев

УДК 539.1

Исследование свойств резонансов КПН в поле встречных волн

И. В. Громов, П. В. Козьмина

Новосибирский государственный университет

Эффект когерентного пленения населенностей (КПН) в парах щелочных металлов в настоящее время активно используется в создании миниатюрных атомных стандартов частоты. Основной характеристикой таких устройств является кратковременная стабильность, которая пропорциональна контрасту КПН-резонанса. Поэтому одной из актуальных тем исследований в данной области является разработка методов, которые бы позволяли увеличить контраст резонанса.

Одним из таких методов является возбуждение резонанса КПН в поле встречных волн с ортогональными циркулярными поляризациями [1]. Увеличение контраста в такой схеме достигается за счет интерференции [2] когерентных состояний, возбуждаемых встречными волнами, а также подавления эффекта оптической накачки, при котором часть атомов под действием резонансного излучения попадает на крайние магнитные подуровни основного состояния и перестает взаимодействовать с полем.

Одним из способов создания встречной волны является установка частично пропускающего зеркала между ячейкой и фотоприемником. При такой конфигурации интенсивность света, падающего на фотоприемник, определяется коэффициентом отражения зеркала. Увеличение коэффициента приводит к уменьшению количества света, падающего на фотоприемник, но увеличивает амплитуду обратной волны, что позволяет увеличить контраст резонанса. Уменьшение, наоборот, увеличивает сигнал, но снижает интенсивность обратной волны, подавляющей эффект оптической накачки. Таким образом возникает необходимость поиска оптимального значения коэффициента пропускающего зеркала для такой конфигурации.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования свойств резонанса КПН в схеме с зеркалом с изменяемым коэффициентом отражения. Продемонстрирован эффект интерференции КПН-состояний, возбуждаемых разнонаправленными волнами в импульсном и непрерывном режиме возбуждения КПН-резонанса. Показано увеличение контраста резонанса в 2–4 раза в зависимости от мощности излучения по сравнению со стандартной однопроходной схемой.

1. Taichenachev A. V. et. al. High-contrast dark resonances on the D1 line of alkali metals in the field of counterpropagating waves // J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2024. Vol. 80 (4). P. 236–240.
2. Liu Yan et. al. High-speed single-shot optical focusing through dynamic scattering media with full-phase wavefront shaping // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 111 (22). P. 1–6.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Раднатаров

УДК 535.4

Измерение дисперсии оптических волокон с использованием волоконного фемтосекундного синтезатора частот

Я. Г. Исаева

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

Дисперсионный параметр D оптических волокон является одной из важнейших характеристик для импульсных волоконных лазерных систем. Он оказывает значительное влияние на временной профиль лазерного излучения. Для определения параметра D в оптических волокнах длиной 0,5–5 м используются различные интерферометрические методы [1, 2]. В данной работе реализована схема одноплечевого трехволнового интерферометра, характеризующегося меньшей чувствительностью к внешним возмущениям и более простотой реализацией по сравнению с традиционными подходами.

В качестве источника излучения используется волоконный фемтосекундный синтезатор частот (ВФСЧ), стабилизированный по стандарту частоты на одиночном ионе иттербия [3]. Высококогерентное излучение ВФСЧ, перекрывающее широкий спектральный диапазон, позволяет мгновенно регистрировать интерферограммы. Схема интерферометра является двухпроходной. Формирование интерференционной картины происходит путем сложения трех волн, отраженных от торцов одномодового тестового волокна SMF-28 и от металлического зеркала, расположенного после него. Для достижения максимальной контрастности интерферограмм и повышения точности измерений в схему внесены волоконный поляризационный светоделитель и четвертьволновая фазовая пластинка.

Для длины волны 1555 нм получено значение параметра $D = 18,45$ пс/(нм·км). Среднеквадратическое отклонение составило 0,46 пс/(нм·км), что на порядок лучше стандартных значений — 5 пс/(нм·км).

Исследование выполнено при поддержке государственного задания с регистрационным номером НИОКР 121033100064-9 с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Фемтосекундный лазерный комплекс» на базе Института лазерной физики СО РАН.

1. Galle M.A. et al. Single-arm three-wave interferometer for measuring dispersion of short lengths of fiber // Opt. Express. 2007. Vol. 15. P. 16896–16908.
2. Cohen L. G. Comparison of single-mode fiber dispersion measurement techniques // J. Light. Technol. 1985. Vol. LT-3. P. 958–966.
3. Koliada N.A. et al. Er: fiber — based femtosecond frequency comb stabilized to an Yb⁺ single-ion optical frequency standard // Laser Phys. Lett. 2022. Vol. 19. P. 015102.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Н. А. Коляда

УДК 535.8

**Исследование двойной структуры резонанса
насыщенного поглощения на открытом дипольном переходе
в атомах цезия для стабилизации частоты лазерного излучения**

К. В. Козенко

Новосибирский государственный университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Стабильные лазерные источники с узкой шириной линии и высокой долговременной стабильностью имеют большое значение для экспериментов во многих областях физики, в частности для приложений, требующих резонансного возбуждения атомного перехода. Например, в магнитометрии, которая применяется в медицине для поиска полезных ископаемых, навигации и т. д. Такой источник создается с помощью активной стабилизации лазерной частоты по атомарному эталону.

Основными параметрами системы стабилизации, использующей резонансы насыщенного поглощения (РНП) с двойной структурой [1] в качестве частотного репера, являются контраст сигнала и его ширина. Получены зависимости контраста и ширины РНП от мощности встречных пучков и температуры ячейки.

Для исследования структуры резонансов была собрана экспериментальная установка, реализующая конфигурацию встречных волны накачки и пробной волны. Исследование проводилось с ячейкой длиной 8 мм, наполненной чистым ^{133}Cs , находящейся в магнитных экранах.

В результате работы были определены оптимальные параметры установки для РНП. Также была зарегистрирована зависимость знака РНП на переходе $4 \rightarrow 3'$ от поляризации излучения [2].

1. Сивак А. В. и др. Двойная структура резонанса насыщенного поглощения на открытом атомном переходе // Науч. сессия НИЯУ МИФИ-2011. Науч.-техн. конф.-семинар по фотонике и информац. оптике. 2011. С. 102–102.
2. Бражников Д. В. и др. О новых поляризационных эффектах в спектроскопии насыщенного поглощения в поле встречных световых волн // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 5. С. 453–463.

Научный руководитель — А. О. Макаров

УДК 535.8

Магнито-индуцированная прецессия атомного спина в поле эллиптически поляризованной световой волны для приложений к атомной магнитометрии

К. С. Козлова

Новосибирский государственный университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Магнитометры имеют широкое применение во многих областях науки и технологий. До недавнего времени одним из самых чувствительных типов магнитометров являлся СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный девайс). Однако в последнее время оптические магнитометры достигли больших чувствительностей. Кроме того, оптические магнитометры имеют ряд преимуществ при измерении малых магнитных полей: небольшой размер, работа при комнатной температуре, высокая чувствительность, низкая цена по сравнению со СКВИД. Также некоторые разновидности оптических магнитометров измеряют абсолютное значение магнитного поля.

В данной работе была собрана экспериментальная установка, работающая по классической схеме Белла — Блума. В установке использовалась ячейка размерами 5 мм с щелочным металлом ^{87}Rb , буферным газом N_2 300 Торр, а также синусоидальная термостабилизация с нагревательными шлейфами. При амплитудной модуляции лазерного излучения с круговой поляризацией, направленного в ячейку, наблюдался магнитооптический резонанс, регистрируемый на частоте Лармора, соответствующей ортогональной относительно распространения излучения компоненте магнитного поля. Для улучшения чувствительности магнитометра установка была модифицирована, в ячейку направлялось излучение с эллиптической поляризацией, компоненты которой можно рассматривать как пробную волну и волну накачки [1]. Для регистрации резонансов использовалась поляриметрическая методика [2]. Для обеих схем были получены зависимости контраста резонанса и чувствительности установки, в зависимости от параметров: температуры ячейки, мощности излучения, эллиптичности поляризации. Проведены эксперименты по наблюдению магнитооптических резонансов в земном магнитном поле.

Определены оптимальные параметры для получения наибольшей чувствительности магнитометра в обеих схемах. Выявлена лучшая чувствительность модернизированной схемы Белла — Блума перед классической.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-00195).

1. Brazhnikov D. V. et al. Ultrahigh-quality electromagnetically induced absorption resonances in a cesium vapor cell // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2019. Vol. 52 (21).
2. Makarov A. O. et al. Observation of the Strong Magneto-Optical Rotation of the Polarization of Light in Rubidium Vapor for Applications in Atomic Magnetometry // JEPT Letters. 2023. Vol. 117, No. 7. P. 509–516.

Научный руководитель — А. О. Макаров

Разработка методов по преобразованию лазерных пучков

П. В. Козьмина, И. В. Громов

Новосибирский государственный университет

Формирование лазерных пучков с заданным профилем интенсивности и волновым фронтом является одной из важных задач оптики и находит применение в таких областях, как оптическая микроскопия, биофотоника, нанофотоника, лазерная обработка материалов, оптические пинцеты. В последнее время для решения данной задачи часто применяются оптические схемы на основе фазовых пространственных модуляторов света [1], которые позволяют практически произвольным образом изменять волновой фронт падающего излучения и таким образом преобразовывать лазерные пучки. Для расчета фазовых масок обычно используют методы на основе итерационного алгоритма Герхберга — Сакстона (Г-С) [2]. Одним из недостатков данного подхода является то, что получаемые решения для фазовой маски обычно имеют дифракционный характер и их использование приводит к большому уровню оптических потерь.

В данной работе предлагается новый подход к реализации алгоритма Г-С с использованием метода морфинга целевого распределения интенсивности на основе решения уравнения теплопроводности. С помощью данного подхода, в отличие от классической реализации алгоритма Г-С, можно получать решения для волнового фронта в виде гладкой поверхности, что позволяет формировать пучки с гладким профилем интенсивности, и использовать найденные решения для создания рефракционных оптических элементов со свободной поверхностью (линз или зеркал) с помощью таких методов, как 3D-печать или литография (например, литография в градациях серого).

В работе приводится детальное описание алгоритма, результаты по расчету фазовых масок для преобразования лазерных пучков в пучки с различными равномерными профилями интенсивности, а также результаты экспериментальной проверки фазовых масок, выполненных с помощью пространственного модулятора света. В работе обсуждается возможность создания оптических элементов на основе вычисленных фазовых масок, а также возможность использования результатов исследования для коррекции выходных пучков диодных лазеров.

1. Huang D. et al. A low-cost spatial light modulator for use in undergraduate and graduate optics labs // Am. J. Phys. 2012. Vol. 80, No. 3. P. 211–215.
2. Zhao T., Chi Y. Modified Gerchberg — Saxton (GS) algorithm and its application // Entropy. 2020. Vol. 22, No. 12. P. 1354.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Раднатаров

УДК 621.373.826

Исследование воздействия мощного излучения накачки на активные элементы лазерного усилителя при криогенных температурах

А. О. Купцова

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В настоящее время достижение рекордных параметров излучения в высокомоощных лазерных системах сопровождается усложнением устройства лазерных установок. В частности, создаются активные элементы с новыми геометриями или концентрационными профилями [1]. Сложная структура современных лазерных систем требует новых методов для исследования процессов взаимодействия излучения накачки, активной среды и усиливаемого излучения. Актуальным направлением исследований является разработка простых и точных методик, применимых в случае криогенного охлаждения, для исследования распределения температуры в активных элементах и искажений волнового фронта усиливаемого излучения [2].

Данная работа посвящена развитию метода для исследования распределения температуры в активных элементах лазерных усилителей, представленного ранее [2] для одновременного исследования также и распределения инверсной населенности в активной среде и деполяризации излучения. Показано, что на основе разработанного метода возможно определение искажений волнового фронта усиливаемого излучения и области взаимодействия усиливаемого излучения и излучения накачки в активном элементе. Апробация метода была проведена на базе усилителя с мощной диодной накачкой и криогенно охлаждаемыми активными элементами из кристаллов Yb:YAG [3]. По результатам исследования были определены условия применимости метода, факторы, влияющие на точность определения измеряемых величин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWGU-2021-0005).

1. Petrov V. A., Kuptsov G. V., Kuptsova A. O. et al. Enhanced Yb:YAG active mirrors for high power laser amplifiers // Photonics. 2023. Vol. 10, No. 7. P. 849.
2. Kuptsov G. V., Konovalova A. O., Petrov V. A. et al. Laser method for studying temperature distribution within Yb:YAG active elements // Photonics. 2022. Vol. 9. No. 11. P. 805.
3. Kuptsov G. V., Kuptsova A. O., Petrov V. A., Petrov V. V. High power laser amplifier with cryogenic closed-loop cooling // Proc. SPIE. 2023. Vol. 12920. P. 129200R.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Петров

УДК 535.337

Спектроскопия квадрупольного часового перехода иона иттербия-171

Н.С. Лапин

Лаборатория оптических часов
Института лазерной физики СО РАН, Новосибирск

В настоящее время высокоточные стандарты частоты используются повсеместно, например в глобальных коммуникационных сетях, спутниковой навигации и т. д. Оптические стандарты частоты, которые основаны на одиночном лазерно-охлажденном ионе иттербия-171, локализованном в радиочастотной ловушке, являются одними из самых перспективных в достижении относительной неопределенности частоты менее 10^{-17} [1]. Это обусловлено следующими факторами: возможностью использовать компактные диодные лазеры для реализации стандарта; ввиду особенности строения энергетических уровней иона иттербия-171 имеется возможность реализовать стандарт частоты на двух различных переходах; ион находится в хорошо контролируемой среде и изолирован от внешних воздействий. В нашей лаборатории реализован оптический стандарт частоты на квадрупольном переходе иона иттербия-171 с доплеровским лазерным охлаждением. Спектроскопия данного оптического перехода позволяет получить информацию о состоянии иона, его движении внутри ловушки и взаимодействии с окружением.

Одним из основных факторов, ограничивающих точность стандарта частоты, являются систематические сдвиги частоты часового перехода, связанные с тепловым движением иона. В ИЛФ СО РАН впервые разработан новый метод лазерного охлаждения, основанный на эффекте ЭИП [2], который позволит реализовать субдоплеровское охлаждение иона иттербия-171. В связи с этим существует необходимость в оценке температуры иона в радиочастотной ловушке во время проведения спектроскопических исследований. Для проведения данной оценки был детектирован спектр возбуждения квадрупольного перехода иона иттербия-171 вместе с частотами его тепловых колебаний. На основе анализа резонансных компонент полученного спектра показано, что в результате доплеровского охлаждения ион локализован в режиме Лэмба — Дике (смещение меньше, чем длина волны охлаждающего излучения). В дальнейшем полученные результаты позволят оценить качество охлаждения иона при переходе к субдоплеровскому охлаждению.

1. Чепуров С. В., Луговой А. А., Прудников О. Н. и др. Спектроскопия квадрупольного часового перехода иона иттербия-171 для создания оптического стандарта частоты // Квантовая электроника. 2019. Т. 49 (5). С. 412–417.
2. Krysenko D. S., Prudnikov O. N. et al. Ground-state electromagnetically-induced-transparency cooling of $^{171}\text{Yb}^+$ ions in a polychromatic field // Phys. Rev. A. 2023. Vol. 108. 043114.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Чепуров

УДК 535.4

Моделирование формирования вихревых пучков при дифракции на полигональных спиралях

В. И. Логачев

Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева

Многие исследователи, проводящие эксперименты в области оптического захвата и манипуляции, сталкиваются с проблемой формирования лазерного пучка с определенным распределением плотности потока энергии (ППЭ) [1]. Часто за основу берется пучок Бесселя, однако специфические задачи требуют более сложных распределений ППЭ [2]. В таком случае на основе амплитудной или фазовой аподизации можно внести искажения в пучок Бесселя, в его распределение плотности орбитального углового момента (ОУМ) и, соответственно, порождаемое пучком распределение ППЭ.

В данной работе рассматривается способ формирования вихревых пучков при дифракции лазерного пучка на тонкой спиральной апертуре, формируемой n -угольниками, с наложением и без наложения спиральной фазовой пластинки (СФП) на входе. Круговая щель формирует пучок Бесселя нулевого порядка, в то время как спиралевидная щель — пучок Бесселя с ненулевым ОУМ, который убывает вдоль оси распространения [3]. В данной работе исследована зависимость распределения ОУМ от расстояния от входной плоскости при распространении вихревого пучка, формируемого при дифракции гауссова пучка на различных спиральных апертурах. Анализ показал, что полигональные спирали порождают вихревые пучки с ненулевым ОУМ. Хотя ОУМ таких пучков довольно мал, но его величина также уменьшается с ростом расстояния от входной плоскости, причем динамика зависит от типа световой спирали. Отмечено, что увеличение числа углов у полигональных апертур приводит к повышению значения ОУМ и что для неполных спиралей ОУМ несколько выше, чем для полных.

Полученные результаты могут быть полезны в области оптического захвата и манипулирования.

1. Bekshaev A. Y., Soskin M. S. Transverse energy flows in vectorial fields of paraxial beams with singularities // *Opt. Commun.* 2007. Vol. 271. P. 332–348.
2. Khonina S. N., Porfirev A. P., Ustinov A. V. et al. Generation of complex transverse energy flow distributions with autofocusing optical vortex beams // *Micromachines*. 2021. Vol. 12 (3). P. 297.
3. Yang Y., Zhu X., Zeng J. et al. Anomalous Bessel vortex beam: modulating orbital angular momentum with propagation // *Nanophotonics*. 2018. Vol. 7 (3). P. 677–682.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. Н. Хонина

УДК 535.34

Теория нелинейных высококонтрастных резонансов в парах цезия под действием встречных бихроматических лазерных пучков

А. М. Михайлов

Новосибирский государственный университет

В работе [1] 2016 г. группой французских исследователей был продемонстрирован новый метод субдоплеровской спектроскопии, основанный на использовании встречных двухчастотных пучков с ортогональными линейными поляризациями в парах атомов цезия. В данной конфигурации наблюдаются субдоплеровские резонансы с необычно высокими контрастом и отношением амплитуда/ширина, что может быть использовано для разработки высокостабильного миниатюрного стандарта частоты оптического диапазона.

Несмотря на успешную экспериментальную реализацию субдоплеровской спектроскопии в бихроматических пучках, теория самих резонансов ограничивалась либо численными расчетами [2], либо аналитическими расчетами для упрощенной трехуровневой модели атома (Λ -схема) [3].

Настоящая работа посвящена теоретическому анализу наблюдаемых резонансов для полноценной структуры уровней энергии D_1 -линии атома цезия как с учетом различных процессов релаксации в атоме, так и с учетом произвольных эллиптических поляризаций встречных пучков. С помощью формализма поляризационных моментов (неприводимых тензорных операторов) и теории возмущений получено аналитическое выражение для показателя поглощения пробного пучка. Помимо этого, были выделены и исследованы выражения, описывающие вклады, связанные с различными физическими эффектами, такими как когерентное пленение населенностей, оптическая накачка, самонасыщение и насыщенное поглощение.

Полученные результаты позволяют дополнить знания о наблюдаемом эффекте высокого контраста субдоплеровских резонансов в бихроматических пучках и определить наилучшие условия для их применения в квантовой метрологии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-12-00279).

1. Abdel Hafiz M. et al. Doppler-free spectroscopy on the Cs D_1 line with a dual-frequency laser // Opt. Lett. 2016. Vol. 41, No. 13. P. 2982.
2. Brazhnikov D. V. et al. Dual-frequency sub-Doppler spectroscopy: Extended theoretical model and microcell-based experiments // Phys. Rev. A. 2019. Vol. 99, No. 6. P. 062508.
3. Михайлов А. М., Будю Р., Бражников Д. В. Форма линии субдоплеровских резонансов в газе атомов щелочных металлов в поле встречных бихроматических лазерных пучков // ЖЭТФ. 2021. № 160. С. 818.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Бражников

УДК 535.1

Оптимизация выходных параметров диссипативных солитонов в усилителе на основе тейперированного иттербиевого волокна

А. В. Папченко

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Ультракороткие импульсы мегаваттной мощности имеют широкое применение в различных областях: модификации поверхностных слоев материала толщиной в несколько сотен нанометров, лазерной коррекции зрения, обработке биоматериалов и многих других. В волоконных лазерах изучение с аналогичными параметрами можно получить, используя технику генерации сильночирпованных диссипативных солитонов (СЧДС). В предыдущих исследованиях была представлена кольцевая схема задающего генератора СЧДС, в котором происходит синхронизация мод за счет эффекта нелинейного вращения поляризации света. Данная схема генерировала импульсы с шириной спектра до 60 нм (по уровню -10 дБ), а численное моделирование прогнозировало их сжатие до длительности менее 100 фс [1]. Увеличение мощности сигнала производилось при помощи усилителя из тейперированного волокна с сохранением поляризации, легированного ионами иттербия, с диаметром поля моды от 8,7 мкм на входе и до 27 мкм на выходе. После сжатия импульса с помощью дифракционных решеток его длительность была 300 фс, а в автокорреляционной функции наблюдалась широкая подложка из-за влияния дисперсии высших порядков [2]. В настоящей работе предлагается использовать схему с компенсацией дисперсии третьего порядка импульса на основе W-Shape-волокна для его эффективного сжатия.

Схема установки состоит из задающего генератора, участка с компенсацией дисперсии, тейперированного усилителя и компрессора для сжатия выходного импульса. В эксперименте удалось достичь эффективности усиления 0,45, а именно увеличения мощности сигнала с 30 мВт (ширина спектра 50 нм) до 4,63 Вт при незначительном изменении спектра. Также был измерен M^2 выходного пучка. На конференции будут представлены данные по оптимизации значения дисперсии третьего порядка перед усилением для достижения минимальной длительности импульсов на выходе.

1. Abdrakhmanov S. I. et al. Ultra-Broadband NPE-Based Femtosecond Fiber Laser // Photonics. MDPI. 2023. Vol. 10, No. 1. P. 85.
2. Kuznetsov A. G., Kharenko D. S., Babin S. A. Amplification of dissipative solitons with a polarisation-maintaining tapered fibre amplifier // Quantum Electron. 2018. Vol. 48, No. 12. P. 1105.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. А. Евменова

УДК 535.14

**Стабилизация частоты полупроводникового лазера
для экспериментов с одиночными атомами
в оптических дипольных ловушках**

А. А. Прилуцкая

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Трехфотонное лазерное возбуждение $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2} \rightarrow 3P$ одиночных атомов рубидия, захваченных в оптическую дипольную ловушку, представляет интерес для исследования взаимодействия атомов в nP -состояниях, что невозможно при реализации широко используемой по всему миру двухфотонной схемы лазерного возбуждения ридберговских состояний, позволяющей возбуждать nS - и nD -состояния атомов [1].

На второй ступени $5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$ трехфотонного лазерного возбуждения используется полупроводниковый лазер с внешним резонатором Sacher Lasertechnik с длиной волны 1367 нм. Для реализации данного атомного перехода необходимо, чтобы полупроводниковый лазер обладал долговременной стабильностью частоты и узкой шириной линии лазерного излучения. Однако в полупроводниковых лазерах имеется ряд источников шумов — токовый шум (мерцательный шум), акустические шумы, шумы источников питания. Это приводит к уширению линии лазера, а тепловые явления — к долговременным дрейфам частоты.

В нашей работе была реализована стабилизация частоты полупроводникового лазера методом Паунда — Дривера — Холла, где частота лазерного излучения привязывается к одному из пиков пропускания высокостабильного интерферометра Фабри — Перо. После стабилизации частоты с использованием ПИД-регулятора Vescent Photonics D2-125 ширина линии лазера, оцененная по остаточному сигналу ошибки, составила 25 кГц. Для уточнения значения ширины линии был проведен эксперимент по оценке ширины спектра биений при самогетеродинировании лазерного излучения [2] с использованием акустооптического модулятора для смещения частоты излучения на 80 МГц, оптоволоконной линии задержки длиной 25 км и спектроанализатора Rigol DSA815. Полученная оценка ширины линии по спектру биений составила менее 8 кГц.

1. Бетеров И. И и др. Трехфотонное лазерное возбуждение одиночных ридберговских атомов рубидия в оптической дипольной ловушке // ЖЭТФ. 2023. Т. 164, вып. 2 (8). С. 282–290.
2. Ludvigsen H., Tossavainen M., Kaivola M. Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay // Opt. Commun. 1998. Vol. 155. P. 180–186.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

УДК 535.42

Дифракция света на чирпированных многослойных неоднородных голографических ФПМ-ЖК дифракционных структурах

Д. С. Растрыгин, В. О. Долгирев

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В настоящее время широко исследуются процессы по увеличению угловой и спектральной селективности голографических дифракционных структур (ГДС), сформированных в фотополимерных материалах с нематическими жидкими кристаллами (ФПМ-ЖК) [1–3].

Ранее в работах [1–3] была продемонстрирована возможность увеличения ширины избирательного отклика с использованием мультиплексированных ГДС и ГДС с изменяющимся периодом, сформированных в ФПМ-ЖК [2].

В данной работе в результате численного моделирования показан процесс дифракции света на чирпированных многослойных ГДС в ФПМ-ЖК. Результат численного моделирования показал, что формированием чирпированной многослойной ГДС потенциально можно добиться увеличения ширины угловой селективности стандартной двухслойной ГДС при варьировании отклонения модуля вектора K до 5 раз.

Представленные результаты позволяют применить полученные ГДС в дальнейшем для разработки оптических устройств связи, таких как спектральные оптические фильтры, мультиплексоры/демультиплексоры [1–3].

1. Bykov D. et al. Optical properties of guided-mode resonant gratings with linearly varying period // Phys. Rev. A. 2022. Vol. 106, No. 5. P. 05524.
2. Dolgirev V. O., Sharangovich S. N., Rastrygin D. S. Study of light diffraction on electrically controlled multiplexed multilayer inhomogeneous holographic PPM-LC diffraction structures // Proc. School-seminar “Waves-2023”. Nanophotonics, Metamaterials Photonic Crystals. 2023. P. 47–50.
3. Dovolnov E., Sharangovich S., Sheridan J. T. Theoretical and experimental investigation of photopolymer chirped gratings formation // Photorefractive Effects, Materials, Devices 2005 (PR05), OSA Trends Optics Photonics Series. 2005. Vol. 99. P. 337–342.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, проф. С. Н. Шарангович

УДК 535.21

Исследование влияния гибридного анапольного состояния на оптические силы

С. Р. Розенталь¹, Н. С. Бабиц²¹Московский физико-технический институт²Университет ИТМО, Санкт-Петербург

В настоящее время большой интерес представляют нерассеивающие состояния наночастиц, которые характеризуются значительным снижением сечения рассеяния в сравнении с обычными состояниями. Такие состояния называются гибридными анаполями [1]. Условием возникновения анапольного состояния является деструктивная интерференция базовых мультипольных компонент поляризационных токов в частице и тороидальных поправок к ним [2].

Цель данной работы — изучить влияние гибридного анапольного состояния (ГАС) на оптические силы, действующие на цилиндрическую наночастицу кремния ($R = 190$ нм, $H = 545$ нм) со стороны Гауссова пучка ($\lambda = 1064$ нм). При взаимодействии света с частицей можно выделить две компоненты сил. Сила давления вызвана передачей импульса волны объекту и толкает его вдоль направления распространения света [3], а градиентная составляющая втягивает частицу в область максимальной интенсивности [4].

С помощью моделирования показано, что если частица находится в перетяжке Гауссова пучка, то при изменении длины волны сила давления изменяется пропорционально падению сечению рассеяния и достигает минимума в гибридном анапольном состоянии. При этом смещение частицы перпендикулярно пучку приводит к «разрушению ГАС» и увеличению давления вплоть до значений, характерных для рассеивающего состояния.

Также была рассмотрена градиентная сила. В обычном состоянии она всегда направлена так, что стремится втянуть частицу в перетяжку Гауссова пучка. В ГАС же градиентная сила меняет направление и начинает выталкивать частицу из перетяжки. Такое явление может быть связано с изменением направления поляризации частицы в анапольном состоянии и подлежит дальнейшему изучению.

1. Luk'yanchuk B. et al. Hybrid anapole modes of high-index dielectric nanoparticles // *Phys. Rev. A*. 2017. Vol. 95, No. 6. P. 1–8.
2. Gurvitz E. A. et al. The High-Order Toroidal Moments and Anapole States in All-Dielectric Photonics // *Laser Photonics Rev.* 2019. Vol. 13, No. 5. P. 1–13.
3. Ashkin A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure // *Phys. Rev. Lett.* 1970. Vol. 24, No. 4.
4. Ashkin A., Dziedzic J. M., Chu S. Observation of a single-beam gradient-force optical trap for dielectric particles in air // *Opt. Lett.* 1986. Vol. 22, No. 11.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Кислов

УДК 535.375

Исследование оптических свойств кластеров азотно-вакансионных центров в искусственных алмазах

Син Цихуэй

Новосибирский государственный университет

Отрицательно заряженные NV^- центры в алмазах многими исследовательскими коллективами рассматриваются в качестве прецизионных детекторов магнитного поля с высоким пространственным разрешением [1]. Люминесценция этих атомно-подобных квантовых объектов возможна благодаря спин-орбитальным и спин-спиновым взаимодействиям, чувствительным к магнитным, электрическим, а также к внутрикристаллическим деформационным полям. Регистрация подобных электронных парамагнитных резонансов выполняется оптическими методами, что особенно важно для обнаружения локальных полей в нанобъектах [2].

В представленной работе методом оптического детектирования магнитных резонансов исследуются оптические свойства азот-вакансионных отрицательно заряженных центров в объемных, тонкопленочных и наноструктурированных алмазных пластинах ориентации $\langle 111 \rangle$ после имплантации ионов азота и последующего отжига при высоком давлении и температуре. Наноструктурированные алмазные пластины создавались путем травления сфокусированным ионным пучком ионов Ga^+ поверхностных слоев, обогащенных NV^- центрами. Вытравленная наноструктура представляла собой заглубленный на 500 нм в поверхность 3×3 массив столбцов диаметром около 250 нм, высотой 400 нм и расстоянием между ними около 2 мкм. Каждый столбец оценочно содержал в себе несколько десятков активированных отрицательно заряженных азот-вакансионных центров.

Сравнивая по амплитуде магнитных резонансов ОДМР-спектры, записанные при одинаковых магнитных полях, в обработанных и необработанных образцах обнаружили преимущественное направление ориентации образующихся NV^- центров в тонких пленках и наноструктурах после имплантации и отжига.

1. Pelliccione M., Jenkins A., Ovarthaiyapong P. et al. Scanned probe imaging of nanoscale magnetism at cryogenic temperatures with a single-spin quantum sensor // Nature Nanotech. 2016. Vol. 11, iss. 8. P. 700–705.
2. Phone D., Punto D., Kim G., et al. All-optical and microwave-free detection of Meissner screening using nitrogen-vacancy centers in diamond featured // J. Appl. Phys. 2021. Vol. 129. 024306.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук, доц. М. И. Захаров,
канд. физ.-мат. наук И. А. Карташев

УДК 535.3

Измерение добротности цилиндрических микрорезонаторов мод шепчущей галереи на поверхности стандартного оптоволокна

С. А. Спири́н

Новосибирский государственный университет

Моды шепчущей галереи, возбуждаемые вблизи поверхности цилиндрического волоконного микрорезонатора, имеют большое прикладное и исследовательское значение. За счет малости объема мод и высокой добротности в такой системе могут наблюдаться нелинейные эффекты Керра и, в частности, нелинейная генерация мод, что дает возможность использовать микрорезонатор как генератор оптических частотных гребенок [1]. В системах, где накачка излучения в резонатор осуществляется за счет вытянутого волокна — тейпера, полная добротность складывается из собственной добротности микрорезонатора, определяющейся качеством его поверхности и нагруженной, обусловленной связью между тейпером и микрорезонатором. Увеличивая значение добротности, можно существенно снизить порог мощности накачки для наблюдения нелинейности, что значительно упростит дальнейшие эксперименты и позволит использовать лазеры с меньшей мощностью.

Данная работа посвящена исследованию добротности различных микрорезонаторов, выполненных на основе волокон с радиусами 62,5 и 200 мкм. Цель работы — разработать методику измерения добротности микрорезонатора с наилучшей точностью, а также оптимизировать процессы изготовления тейперов и микрорезонаторов для увеличения текущих значений добротности и уменьшения порога мощности.

В ходе выполнения работы был предложен метод, позволяющий определять добротность с высоким разрешением. Получена критическая связь между тейпером и резонатором, уменьшающая порог накачки. Измерены значения добротности различных резонаторов на волокне с радиусами 62,5 и 200 мкм, лучшие из которых составили $9 \cdot 10^6$ и $6 \cdot 10^7$ соответственно. Порог накачки при таких значениях добротности достигает значения 3,5 Вт и 300 мВт соответственно. Следовательно, волокно с радиусом 200 мкм предпочтительнее использовать для наблюдения керровских эффектов.

1. Kolesnikova A. Y., Vatnik I. D. Theory of nonlinear whispering-gallery-mode dynamics in surface nanoscale axial photonics microresonators // Phys. Rev. A. 2023. Vol. 108, No. 3. P. 033506.

Научный руководитель — А. Ю. Колесникова

УДК 535.14

Трехфотонное лазерное возбуждение одиночных ридберговских атомов в оптической дипольной ловушке

Г. Сулиман

Новосибирский государственный университет

В последнее время успешно продемонстрировано квантовое превосходство квантовых компьютеров над классическими в сверхпроводящих квантовых системах [1]. Значительный интерес представляют альтернативные физические платформы для квантовых вычислений, например ультрахолодные нейтральные атомы. Такие платформы имеют потенциал практически неограниченного масштабирования.

Для выполнения квантовых вентилей с нейтральными атомами, позволяющих получить их квантово-перепутанные состояния, необходим захват атомов в оптические пинцеты и их лазерное возбуждение в ридберговские состояния. В нашей работе мы продемонстрировали захват одиночных атомов рубидия-87 в оптический пинцет [2] и исследовали трехфотонное возбуждение захваченного атома в ридберговское состояние $37p_{3/2}$, которое представляет интерес для реализации квантовых вентилей, основанных на резонансном диполь-дипольном взаимодействии [3].

В наших экспериментах были записаны спектры трехфотонного лазерного возбуждения, в том числе с использованием оптической накачки во внешнем магнитном поле, а также наблюдались когерентные осцилляции населенностей в двухуровневой системе, состоящей из основного и ридберговского состояний.

1. Arute F., Arya K., Babbush R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // Nature. 2019. Vol. 574. P. 505–510.
2. Beterov I. I., Yakshina E. A., Tret'yakov D. B. et al. Trapping and detection of single rubidium atoms in an optical dipole trap using a long-focus objective lens // Kvantovaya Elektronika. 2020. Vol. 50 (6). P. 543–550.
3. Beterov I. I., Yakshina E. A., Tret'yakov D. B. et al. Three-Photon Laser Excitation of Single Rydberg Rubidium Atoms in an Optical Dipole Trap // J. Exp. Theor. Phys. 2023. Vol. 137. P. 246–253.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. И. Бетеров

УДК 621.315.592.2

Механическая эксфолиация двумерных галогенидных перовскитов

П.П. Теслина

Санкт-Петербургский государственный университет

Галогенидные перовскиты в последние годы представляют значительный научный интерес. Особенности этого материала можно назвать экситонное излучение, возможность перестраивать запрещенную зону, а также простоту изготовления. Согласно исследованиям, галогенидные перовскиты могут улучшить эффективность многих оптоэлектронных устройств: солнечных элементов, светодиодов, фотодетекторов и т. д. [1]

В данной работе исследовались двумерные галогенидные перовскиты из семейства Раддлесден — Поппера BA_2PbBr_4 и BA_2PbI_4 . Кристаллическая структура перовскитов этого семейства представляет собой слои анионных октаэдров с расположенными между ними катионами бутиламмония. Возникающие между органическими катионами силы Ван-дер-Ваальса можно преодолеть внешним воздействием, что позволяет применять метод механической эксфолиации для получения объемных тонких кристаллов большой площади.

Методом механической эксфолиации были получены микропластины BA_2PbI_4 толщиной от 17 до 148 нм и BA_2PbBr_4 толщиной от 15 до 407 нм. Помимо этого, на эксфолированных образцах был обнаружен перепад высот, соответствующий толщине одного монослоя (1,6 нм).

Вследствие реорганизации органических катионов вокруг неорганического слоя поведение эксфолированных микропластин перовскитов толщиной в несколько монослоев отличается от поведения объемного материала — наблюдается синий сдвиг фотолюминесценции и уширение экситонного резонанса [2]. Разработанный в данной исследовательской работе метод получения и характеристики микропластин двумерных перовскитов толщиной в несколько монослоев открывает возможности для конструирования на их основе оптоэлектронных устройств с заданными свойствами.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (мегагрант № 075-15-2022-1112). Работа проведена на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника».

1. Lixiu Zhan et al. Advances in the Application of Perovskite Materials // Nano-Micro Letters. 2023. Vol. 15, No. 177.
2. Niu W., Eiden A., Prakash G. V., Baumberg J. J. Exfoliation of self-assembled 2D organic-inorganic perovskite semiconductors // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104, No. 17.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. В. Капитонов

УДК 53.08, 535.24

Исследование чувствительности и быстродействия пироэлектрического детектора МГ-32

Г. Р. Туркия

Новосибирский государственный университет

В настоящее время пироэлектрические детекторы используются во многих сферах жизни человека. С их помощью работают пожарные сигнализации, автоматические двери в супермаркетах, приборы для дистанционного измерения температуры, инфракрасные и терагерцевые спектрометры, военные комплексы и др. Как правило, пироэлектрические детекторы используются в инфракрасном диапазоне, а в последнее время, в связи с развитием терагерцевых (ТГц) технологий, его адаптируют и к ТГц-диапазону частот. Расширение частотного диапазона работы приемника также на видимый и ультрафиолетовый диапазоны является перспективным во многих приложениях, а работ по изучению его характеристик в данной спектральной области крайне мало [1]. При этом необходимо учитывать быстродействие приемника, которое зависит как от материала и технологии изготовления пироэлектрического кристалла, так и от его электрической схемы. Поэтому с точки зрения подбора оптимальных параметров детектора для разных практических и исследовательских задач необходимы исследования его спектральной чувствительности и быстродействия.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию чувствительности и быстродействия пироэлектрического приемника МГ-32 (НЗПП «Восток») в видимом диапазоне (длина волны 637 нм). Тестируемый приемник вместо стандартного германиевого входного окна имел собирающую полипропиленовую линзу, прозрачную в видимом диапазоне.

Измерены времена отклика приемника при подключении внешних емкостей от 2,2 нФ до 1,5 мкФ, которые составили от 0,035 до 2,87 мс соответственно. Вольтовая чувствительность при частоте модуляции 250 Гц составила от 10 до 2550 В/Вт, а эквивалентная мощность шума — от $2,6 \cdot 10^{-10}$ до 10^{-9} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что сопоставимо с данными параметрами приемника в ИК- и ТГц-диапазонах. Обнаружено, что максимальное отношение чувствительности к времени отклика у приемника МГ-32 реализуется при использовании внешней емкости 220–470 нФ.

1. Paulish A. G. et al. Sensitivity of the tetraaminodiphenyl based pyroelectric sensor from visible to sub-THz range // Sensor Rev. 2020. Vol. 40, No. 3. P. 291–296.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Герасимов

УДК 535.1

Создание антиотражающих структур на поверхности нелинейных кристаллов методом фемтосекундной лазерной абляции

В. Е. Федяй

Новосибирский государственный университет
Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Кристалл BaGa_4Se_7 является перспективным материалом для применений в нелинейной оптике среднего ИК-диапазона (2–16 мкм), так как обладает высокой нелинейной восприимчивостью, химической стойкостью, широким спектральным диапазоном прозрачности и крайне высоким для халькогенидов порогом разрушения по интенсивности. Однако из-за высокого показателя преломления (2,5 при длине волны 10,6 мкм) возникают потери, связанные с отражением излучения от границы раздела сред (френелевское отражение).

Антиотражающие микроструктуры (АОМ) являются привлекательной альтернативой многослойным просветляющим покрытиям, поскольку обладают большим порогом разрушения и эффективно работают в больших диапазонах изменения длин волн и углов падения [1]. Данные микроструктуры формируются за счет процесса лазерной абляции на оптической поверхности, и из-за созданного рельефа эффективный показатель преломления плавно увеличивается от поверхности вглубь материала, тем самым уменьшая френелевское отражение.

В работе представлены результаты по созданию просветляющих покрытий на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на поверхности кристаллов BaGa_4Se_7 фемтосекундным лазерным излучением. Исследовано воздействие фемтосекундного лазерного излучения на поверхность кристаллов BaGa_4Se_7 и режимы формирования ЛИППС при вариации основных экспериментальных параметров (энергия импульса в диапазоне 4,2–7 мкДж, скорость сканирования 50–800 мкм/с, частота следования импульсов, длина волны излучения, давление внешней атмосферы). Найдены оптимальные параметры для создания антиотражающих микроструктур на поверхности кристаллов BaGa_4Se_7 фемтосекундным/пикосекундным лазерным излучением в воздушной и разреженной атмосфере при слабой фокусировке излучения. Полученные структуры обладают увеличенным оптическим пропусканием (увеличение на 9 % при обработке с одной стороны) по сравнению с исходной необработанной поверхностью.

1. Yelissev A. et al. Femtosecond Laser Direct Writing of Antireflection Microstructures on the Front and Back Sides of a GaSe Crystal // Photonics. MDPI. 2022. Vol. 9, No. 10. P. 774.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Достовалов

УДК 539.184

Исследование прецессии оптически наведенного спинового выстраивания

А. А. Фомин

Лаборатория оптики спина имени И. Н. Уральцева
Санкт-Петербургского государственного университета

Оптическая ориентация, основанная на передаче углового момента от циркулярно поляризованного света спиновой системе, осуществляется обычно в магнитном поле, коллинеарном распространению луча. В поперечном магнитном поле оптическую ориентацию можно создать циркулярно поляризованной оптической накачкой, модулированной на частоте прецессии спина [1]. Это называют оптической ориентацией во вращающейся системе координат или оптически детектируемым магнитным резонансом [2]. Модулированный свет накачки воздействует на спиновую систему как эффективное переменное магнитное поле, вызывающее прецессию спина в традиционной спектроскопии ЭПР.

Однако возможно оптическое упорядочение парамагнитных частиц, не предполагающее намагничивания среды. Такое упорядочение, называемое спиновым выстраиванием, создается линейно поляризованным светом и проявляется в линейной анизотропии парамагнетика [3]. По аналогии с возбуждением прецессии спиновой ориентации модулированный линейно поляризованный свет может возбуждать прецессию выстраивания спина в резонансных условиях. В отличие от сигнала ориентации, сигнал выстраивания может наблюдаться на двойной ларморовой частоте.

В работе представлено экспериментальное исследование прецессии спинового выстраивания, наведенного в парах цезия резонансным линейно поляризованным светом. Рассмотрены поляризационные свойства эффекта, описаны оптимальные условия его наблюдения на основной гармонике ларморовой частоты. Обнаруженный эффект подавления прецессии оптически наведенного спинового выстраивания при наличии буферного газа объяснен спиновым перемешиванием в возбужденном состоянии.

Полагается, что результаты данной работы будут способствовать использованию прецессии спинового выстраивания в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10021).

1. Bell W. E., Bloom A. L. Optically driven spin precession // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 6, No. 6. P. 280.
2. Zielonkowski M. et al. Optically induced spin precession and echo in an atomic beam // Phys. Rev. A. 1998. Vol. 58, No. 5. P. 3993.
3. Happer W. Optical pumping // Rev. Modern Phys. 1972. Vol. 44, No. 2. P. 169.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. С. Запаский

УДК 535.1

Исследование параметров ультракоротких импульсов в области существования режима синхронизации мод в волоконном лазере на эффекте нелинейной эволюции поляризации

С. В. Чирков

Новосибирский государственный университет
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Лазеры с синхронизацией мод являются привлекательным источником ультракоротких импульсов, длительность которых достигает пико- и даже фемтосекунд. Они находят применение в нелинейной микроскопии, прецизионной хирургии, а также для высокоскоростной передачи данных. Одним из используемых типов лазеров являются волоконные лазеры, обладающие такими преимуществами, как эффективный теплоотвод, отсутствие объемной оптики, высокое качество выходного сигнала. Для достижения синхронизации мод могут применяться различные методы: модуляторы (амплитудные, частотные), насыщающиеся поглотители, эффект Керра и т. д. Несмотря на то что параметры полностью волоконного насыщающегося поглотителя могут варьироваться в широких пределах, они чувствительны к внешним физическим воздействиям и, в частности, к изменению температуры. Вследствие этого возникает необходимость непрерывного контроля параметров излучения для стабильной, долговременной и возобновляемой работы лазера.

В данной работе представлен полностью волоконный лазер с синхронизацией мод, достигающейся с помощью эффекта нелинейной эволюции поляризации. Генерация излучения происходит на длине волны 1030 нм, что определяется параметрами используемой брегговской решетки. Активной средой лазера является волокно, легированное иттербием. Управление поведением излучения осуществляется с помощью изменения тока диода накачки и состояния трехканального электронного контроллера поляризации, имитирующего воздействие двух четверть- и одной полуволновой пластинки. Выходное излучение имеет линейную поляризацию. В ходе экспериментов было исследовано поведение оптического спектра в области существования режима синхронизации мод. Составлена карта существования и возникновения стабильной импульсной генерации. Показана эволюция полученной карты с течением времени при незначительном изменении температуры резонатора лазера.

Научный руководитель — Н. Н. Смолянинов

УДК 53.06

Исследование методов построения ультрафиолетовых люминесцентных устройств для связи и ориентации БПЛА

Н. В. Шахов

Новосибирский государственный технический университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Лазерная связь является альтернативой радиосвязи. Важной задачей является прием лазерного излучения (сигнала) на БПЛА. В текущей работе рассматривается использование вместо классических линзовых систем планарно-волоконные антенны (ПВА), систему из волокон и планарного волновода с инжектированными молекулами люминофора, способными поглощать падающее излучение и переизлучать его на большей длине волны. В работе представлен образец подобной ПВА, в котором полимерная сердцевина закрыта стеклами полиметилметакрилата (ПММА), с меньшим показателем преломления для защиты и выполнения волноводного эффекта. Излучение люминесценции будет собираться на волокнах, расположенных на одном из торцов ПВА. Остальные торцы покрыты фольгой для устранения потери излучения люминесценции.

Энергетическая эффективность K для ПВА при облучении мощностью $P_{\text{вх}}$ участка антенны площадью S при излучении люминесценции $P_{\text{вых}}$ находится из следующего соотношения:

$$K = P_{\text{вых}} / (P_{\text{вх}} \cdot S).$$

Рядом с волоконным выходом ПВА расположены две трапециевидные планарные пластины из ПММА, с которых также можно фиксировать сигнал люминесценции, в 6 раз меньший (излучение потерь). В дальнейшем планируется усилить выходное излучение за счет одновременного облучения ПВА с трапециевидных пластин и прямого облучения рабочей поверхности.

Научный руководитель — д-р техн. наук Б. В. Поллер

УДК 53.03

Построение модели люминесценции ансамбля перовскитных квантовых точек в приближении одиночного возбуждения

В. В. Щербак

Новосибирский государственный университет

Перовскитные квантовые точки (КТ) имеют обширные перспективы применения в оптоэлектронике. Применение КТ в технике требует разработки теории их люминесценции. Модель люминесценции одиночной КТ предложена в работе [1].

В первом приближении можно считать, что КТ в ансамбле не взаимодействуют друг с другом, и использовать при расчетах результаты, полученные для одиночной точки. Испускание фотонов квантовыми точками происходит в результате рекомбинации электронно-дырочных пар, образованных в КТ под действием накачивающего излучения. Эти процессы можно представить как марковскую цепь из трех состояний: основного, возбужденного и захваченного (когда происходит захват электрона на дефектный энергетический уровень — ловушку — в запрещенной зоне). В приближении одиночного возбуждения такая пара в КТ возникает одна. Тогда вероятностям переходов между состояниями будут соответствовать константы скоростей соответствующих процессов, происходящих в КТ: образования пары, излучательных и безызлучательных рекомбинаций из возбужденного и дефектного состояний, захват электрона в ловушку и выход из нее. Для построенной марковской цепи можно записать систему прямых уравнений Колмогорова и условие нормировки вероятностей. Решением полученной системы является сумма двух экспонент с разными характерными временами и постоянного слагаемого, соответствующего шуму. Это решение имеет четыре параметра, которые находятся методом максимального правдоподобия из имеющихся экспериментальных данных по затуханию люминесценции ансамбля квантовых точек CsPbBr₃.

Выбранный метод позволяет определить погрешности расчета, которые в данном случае составляют меньше 5 %. Полученные параметры позволяют построить теоретические кривые затухания люминесценции. Расчет повторен для точек, синтезированных при разных температурах. Во всех случаях теоретические кривые соответствуют экспериментальным данным. Таким образом, люминесценция ансамбля КТ хорошо описывается найденным решением в виде двух экспонент и шума. В дальнейшем разработанную модель можно модифицировать для описания лазерной генерации на исследуемом ансамбле КТ.

1. Podshivaylov E. A. et al. A quantitative model of multi-scale single quantum dot blinking // J. Mater. Chem. 2023.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. А. Французов



ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук *А. А. Шошин*

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук *Е. С. Сандалов*

Экспертный совет секции

д-р физ.-мат. наук *А. В. Бурдаков*

д-р физ.-мат. наук *П. А. Багрянский*

канд. физ.-мат. наук *Д. И. Сквородин*

канд. физ.-мат. наук *А. В. Судников*

PLASMA PHYSICS

Section Head — Cand. Phys.-Math. Sci. *A. A. Shoshin*

Responsible Secretary — *E. S. Sandalov*

Section scientific committee

Dr Phys.-Math. Sci. *A. V. Burdakov*

Dr Phys.-Math. Sci. *P. A. Bagryanskij*

Cand. Phys.-Math. Sci. *D. I. Skovorodin*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Sudnikov*

УДК 533.9.07

Исследование ВЧ-драйвера стационарного источника отрицательных ионов для тандемного ускорителя

У.Д. Булатова

Новосибирский государственный технический университет

В ИЯФ СО РАН работает ускорительный источник эпитепловых нейтронов для проведения бор-нейтронозахватной терапии в условиях онкологической клиники на основе 2 МэВ ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией [1]. Существующий инжектор позволяет получать пучок отрицательных ионов водорода с током до 15 мА [2]. Для увеличения ионного тока и стабилизации работы ионного источника в условиях клиники разрабатывается новый стационарный источник отрицательных ионов водорода на основе ВЧ-разряда. ВЧ-источник отрицательных ионов будет работать в новой схеме инжекции пучка. Для нового инжектора будет применена схема с поворотным магнитом и ускоряющей трубкой, которая предназначена для предварительного ускорения ионного пучка до 150 кВ, что облегчит его транспортировку через тандем. С помощью поворотного магнита будет проводиться фильтрация пучка из источника отрицательных ионов водорода от сопутствующих и второстепенных частиц.

ВЧ-драйвер является одним из основных элементов источника отрицательных ионов водорода. В цилиндрической камере драйвера с помощью индукционного ВЧ-разряда при напуске водорода и импульсного искрового разряда зажигается плазма. Для защиты керамики драйвера от эрозии плазмой внутри драйвера устанавливается щелевой молибденовый экран Фарадея. Экран состоит из правого и левого коллектора, к которым по всей окружности припаяны металлические трубки $\varnothing 6$ мм. К трубкам с двух сторон припаяны молибденовые пластины толщиной 0,5 мм и шириной 14 мм со смещением по углу, образующие Z-образные щели.

В работе будут представлены результаты моделирования тепловых нагрузок на экран Фарадея, где было получено, что температуры отдельных частей экрана Фарадея не достигают критических температур, и моделирования магнитного поля драйвера, создаваемого ВЧ-антенной, где было получено, что магнитное поле внутри драйвера однородно.

1. Таскаев С. Ю. Ускорительный источник эпитепловых нейтронов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. Вып. 6. С. 1770–1830.
2. Belchenko Y. I. et al. Upgrade of CW negative hydrogen ion source // AIP Conf. Proc. AIP. 2013. Vol. 1515. No. 1. P. 448–455.

Научный руководитель — А. А. Гмыря

УДК 533.9.03

Разработка высокочастотного плазменного драйвера для инжекторов с многосекундным режимом работы

Д. Ю. Гаврисенко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Одним из основных способов нагрева плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием является атомарная инжекция. Пучок атомов создается путем ускорения ионов и их последующей нейтрализации. В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработана серия нагревных инжекторов [1]. В качестве генератора плазмы в ионном источнике перспективно использовать высокочастотный (ВЧ) плазменный драйвер, который имеет вакуумный объем с керамической стенкой. Индукционный газовый разряд поддерживается электромагнитным полем внешней антенны [2]. Плазма, генерируемая в ионном источнике, влияет на основные параметры пучка: ток, состав, однородность. Ионные источники на основе ВЧ-драйверов не имеют электродов в газоразрядной камере и поэтому обладают стабильными эмиссионными параметрами в многосекундных импульсах. В данной работе представлен сравнительный анализ разных конфигураций ВЧ-драйвера, разработанного для нагревного инжектора на основе отрицательных ионов [3], и ВЧ-драйвера ионного источника для диагностического инжектора.

Достигнута стабильная работа ВЧ-драйверов в многосекундном режиме работы. Получены основные эмиссионные зависимости от ВЧ-мощности. Для анализа тепловых нагрузок проведены эксперименты, в которых были измерены мощности, отводимые водяным охлаждением от элементов ВЧ-драйверов.

В докладе представлены результаты экспериментов и рекомендации для создания более оптимальной конструкции ВЧ-драйвера.

1. Belchenko Y.I. et al. Studies of ion and neutral beam physics and technology at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS // *Physics-Uspekhi*. 2018. Vol. 61 (6). P. 531–581.
2. Гаврисенко Д. Ю. и др., Сравнительный анализ высокочастотных плазменных драйверов с различными защитными экранами для атомарных инжекторов с многосекундной длительностью импульса // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. С. 964–974.
3. Ivanov A.A. et al. Development of a negative ion-based neutral beam injector in Novosibirsk // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. Vol. 85. 02B102.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Шиховцев

УДК 538,9

Инжекторы нейтральных атомов установки КОТ

В. В. Гамов¹, К. С. Колесниченко^{1,2}¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск²Новосибирский государственный университет

В настоящее время в ИЯФ СО РАН построена и введена в эксплуатацию установка КОТ — компактный осесимметричный тороид. Установка КОТ представляет собой осесимметричный пробкотрон с двухкомпонентной плазмой — относительно холодной и плотной мишенной плазмой и плазмоидом с термоядерными параметрами. Научная программа работы на КОТ состоит в оптимизации параметров стартовой мишенной плазмы, отработке методов удержания и стабилизации плазоида с высоким относительным давлением $\beta \approx 1^*$ (диамагнитное удержание). Ключевым моментом для успешного выполнения этой задачи является создание популяции быстрых ионов. В установке КОТ популяция быстрых ионов создается мощными инжекторами нейтральных атомов, пучки которых захватываются мишенной плазмой пробкотрона и превращаются в быстрые ионы.

Благодаря достигнутому в ИЯФ СО РАН прогрессу в строительстве мощных нагревных инжекторов [1] планируется получить плотность тока 2 экв.А/см² на поверхности плазмы (для сравнения — 1,6 экв.А/см² на 2ХИВ [2]). Система атомарной инжекции установки КОТ состоит из двух мощных инжекторов с баллистической фокусировкой пучков, установленных в центральной плоскости перпендикулярно оси установки под углом 90° друг относительно друга. Энергия инжектируемых частиц — 15 кэВ, ток в ионах — 140 А, длительность инжекции — 4 мс.

Цель данной работы — демонстрация работы системы атомарной инжекции и результатов измерений основных параметров пучков: инжектируемой мощности, плотности тока на поверхности плазмы и угловой расходимости.

1. Deichuli P., Davydenko V., Ivanov A. et al. Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating // Rev. Sci. Instrum. 2015. Vol. 86. 113509.

2. Munan Lin, Ming Liu, Guanghui Zhu et al. Field-reversal experiments in a neutral-beam-injected mirror machine // Rev. Sci. Instrum. 2017. Vol. 88.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Мурахтин

* $\beta = 8\pi P_{\perp}/B^2$ — отношение поперечной составляющей давления плазмы к давлению магнитного поля.

УДК 533.9

Исследование электромагнитных характеристик индуктора ВЧИ-плазмотрона

Ф. А. Захаров

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана

Практические эксперименты на индукционных высокочастотных плазмотронах (ВЧ-плазмотронах) позволяют исследовать теплофизические и прочностные свойства материалов при помощи набегающего на них высокоэнтальпийного потока плазмы. Однако многие важные характеристики теплообмена не могут быть измерены напрямую, а должны вычисляться на основе сопутствующего моделирования. Это позволяет точнее рассчитывать эффективный коэффициент рекомбинации и более точно интерпретировать экспериментальные значения теплового потока, разделяя локальные и интегральные величины. В свою очередь, как показала практика, применение классических осесимметричных моделей при расчетах не всегда позволяет добиться нужной сходимости моделируемых и практических значений, таких как распределения полей температур и значений энтальпии потока. Предполагается, что данное несоответствие является результатом вводимых упрощений, например симметрия потока и замена индуктора вида спирали на набор колец.

Цель данной работы — разработать модель трехмерного индуктора, позволяющего получить подобие осесимметричной постановки задачи, для реализации подобия между расчетным двумерным решением и реальной задачей.

В ходе работы была получена трехмерная модель индуктора ВЧ-плазмотрона, которая с относительно высокой точностью позволяет добиться подобия трехмерной и осесимметричной двумерной постановки задачи. Таким образом, возможно значительное снижение расчетной мощности при решении разнообразных задач на индукционных ВЧ-плазмотронах.

Научный руководитель — С. Е. Маланичев

УДК 533.9

Пространственно-угловое рассеяние лазерного излучения плазмой при облучении мишеней из алюминия и вольфрама

М. М. Захарчук

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

При взаимодействии лазерного излучения с плазмой в зависимости от рассеяния и отражения уменьшается доля лазерного излучения, которое нагревает плазму и увеличивает эффективность взаимодействия [1]. Исследование рассеянного плазмой излучения позволяет оценивать эффективность энергоклада лазерного излучения в плазму. Кроме того, по диаграмме можно судить об изотропности распространения плазменной короны, от которой в основном и происходит рассеяние излучения.

Проведена серия экспериментов по исследованию рассеяния излучения лазерной плазмой, которая возникает при облучении сплошных твердотельных мишеней из вольфрама и алюминия мощным лазерным излучением. При длительности лазерного импульса по поперечному сечению в 2,7 нс плотность мощности излучения в пятне фокусировки на мишени варьировалась в пределах от $0,3 \times 10^{14}$ до $1,1 \times 10^{14}$ Вт/см². Для регистрации рассеянного плазмой лазерного излучения применена разработанная и ранее уже использованная диагностическая система, основанная на волоконной передаче излучения [2]. При регистрации изображения на цифровой фотоаппарат использовался специальный оптический светофильтр для спектрального выделения длины волны лазерного излучения, который отсекал излучение видимого диапазона. Для мишеней из алюминия также были получены результаты без использования светофильтра, включающие как рассеянное излучение, так и собственное свечение плазмы.

Зафиксировано, что при увеличении энергии лазерного импульса повышается интенсивность всего рассеянного излучения для каждого из материалов мишеней. Однако с увеличением энергии лазерного импульса относительная доля рассеянного излучения уменьшается, что означает, что большая часть лазерного излучения участвует во взаимодействии с плазмой. Суммарная интенсивность рассеянного и собственного излучений плазмы оказывается в несколько раз больше, чем в случае только рассеянного излучения.

1. Sheffield J. et al. Plasma scattering of electromagnetic radiation: theory and measurement techniques. Academic press, 2010.
2. Sahakyan A., Puzyrev V. The diagnostics to study the spatial-angular distribution of radiation scattered by plasma at the “Kanal-2” facility // Optik. 2021. Vol. 246. P. 167807.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Т. Саакян

УДК 533.9

Модернизация ионно-оптической системы источника отрицательных ионов водорода с большой площадью эмиссии

Н.С. Ильенко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

Инжекторы высокоэнергетичных нейтралов являются одним из основных методов нагрева термоядерной плазмы. В ИЯФ СО РАН разработан и исследуется прототип инжектора нейтралов, в котором зона получения пучка отрицательных ионов (ОИ) с током до 1,5 А и энергией до 120 кэВ отделена от области ускорения пучка до энергии 500 кэВ в однопертурном ускорителе [1].

Исследуемый источник использует классическую схему поверхностно-плазменных источников ОИ с высокочастотным генератором плазмы. Формирование пучка отрицательных ионов проходит в трехэлектродной ионно-оптической системе (ИОС) источника, состоящей из плазменного, вытягивающего и ускоряющего электродов. Плазменный электрод ограничивает плазму и является эмиттером ОИ с большой площадью поверхности. На вытягивающий электрод подано вытягивающее напряжение, служащее для вытягивания ОИ из плазмы при оптимальном положении плазменной границы и для перехвата сопутствующих электронов до их ускорения до полной энергии. Ускоряющий электрод используется для ускорения пучка до полной энергии 120 кэВ.

В работе представлены результаты численного моделирования формирования пучка ОИ в ионно-оптической системе источника с помощью программного кода IBSIMU [2]. Код позволяет производить трехмерное моделирование формирования пучка с учетом геометрии электродов, карты магнитного поля и эмиссионного ионного тока. Рассчитанный в IBSIMU фазовый портрет ионного пучка позволяет произвести оценку транспортировки пучка на вход удаленного ускорителя и оптимизировать параметры ионно-оптической системы источника. Код IBSIMU также позволяет произвести расчет траекторий сопутствующих пучку электронов.

В результате моделирования был предложен и изготовлен новый вытягивающий электрод ионного источника, который улучшает формирование пучка ОИ. Ток пучка на выходе из ИОС I_b был увеличен с 1,2 до 1,5 А.

1. Sotnikov O., Ivanov A., Belchenko Y. et al. Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices // Nucl. Fusion. 2021. Vol. 61, No. 11. P. 116017.
2. Kalvas T. et. al. IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. 02B703.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О.З. Сотников

УДК 533.9

Исследование диамагнетизма и колебаний магнитного поля плазмы на установке СМОЛА

А. В. Кожевников

Новосибирский государственный университет
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В настоящий момент в ИЯФ СО РАН ведутся исследования плазмы для термоядерного синтеза на базе открытых магнитных ловушек линейного типа. Одним из способов подавления продольных потерь из открытой ловушки является метод многопробочного удержания, который обеспечивает увеличение времени удержания пропорционально квадрату длины многопробочной секции в силу ненулевой вероятности для частицы рассеяться в произвольном направлении на каждой из пробок. Динамическое многопробочное удержание плазмы в стационарном винтовом магнитном поле [1], идея которого была разработана в ИЯФ СО РАН и проверяется на установке СМОЛА [2], потенциально может обеспечить экспоненциальный рост качества удержания с увеличением длины многопробочной секции.

Эффективность подавления потерь влияет на энергосодержание плазмы в области удержания. Для измерения энергосодержания плазмы в установке СМОЛА была сконструирована и включена в измерительный комплекс диамагнитная петля, позволяющая получить диамагнетизм плазмы, связанный с поперечным давлением плазмы, в каждом режиме работы установки.

Любая возникающая в плазме волна рассеивает частицы. В отличие от других магнитных ловушек, для многопробочных систем это приводит к улучшению удержания: длина свободного пробега частиц за счет рассеяния приближается к расстоянию между пробками. Для исследования колебаний локального магнитного поля были сконструированы и установлены в нескольких точках по длине установки магнитные зонды.

В докладе будут представлены результаты измерения диамагнетизма в различных режимах работы установки. Варьировались средняя по сечению глубина гофрировки, а также пробочное отношение между областью удержания и максимальным полем в транспортной секции. Помимо этого, будут представлены временные и пространственные спектры волн, возникающих на границе плазмы.

1. Beklemishev A. D. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Sci. Technol. 2013. Vol. 63, No. 1T. P. 355–357.
2. Sudnikov A. V., Beklemishev A. D., Postupaev V. V. et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Eng. Design. 2017. Vol. 122. P. 83–93.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Судников

Создание мишенной плазмы в эксперименте на установке КОТ

К. С. Колесниченко^{1,2}, В. В. Гамов¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

Одной из ключевых проблем создания термоядерного реактора на базе открытой магнитной ловушки является большая величина продольных потерь. Одно из возможных решений — использование диамагнитного удержания. Этот метод основан на том, что вытеснение внешнего магнитного поля плазмой увеличивает эффективное пробочное отношение, что, в свою очередь, снижает продольные потери [1]. Для получения и изучения свойств полученной плазменной конфигурации введена в эксплуатацию установка КОТ (компактный осесимметричный тороид). Для создания плазмы с величиной вытесненного магнитного поля, почти равной внешнему, будут использованы два атомарных инжектора с суммарной мощностью более 2 МВт и средним значением энергии частиц 15 кэВ.

Для оценки параметров мишенной плазмы, необходимой для эффективного захвата и накопления ионов, были проведены численные расчеты [2]. С одной стороны, мишенная плазма должна быть достаточно плотной ($n_e > 10^{15} \text{ см}^{-3}$) для того, чтобы значительная часть нейтралов ионизовалась, с другой, температура электронов должна быть достаточно высокой ($T_e > 30 \text{ эВ}$) для того, чтобы уменьшить потери энергии высокоэнергетических ионов за счет столкновений с электронами ($v_{ie} \sim T_e^{-3/2}$). На установке КОТ используется газоразрядный источник плазмы с кольцевой конфигурацией разрядного канала, принцип работы которого изучался на установках типа АМБАЛ [3]. Вследствие неоднородного радиального электрического поля развивается неустойчивость Кельвина — Гельмгольца, которая приводит к нагреву ионов, образованию термобарьера и повышению температуры электронов в центральном пробкотроне.

В докладе будут представлены результаты измерения электронной температуры и плотности плазмы, полученные при помощи тройных ленгмюровских зондов. Также будет описан поиск оптимальных характеристик мишени в зависимости от параметров газового разряда и конфигурации магнитного поля.

1. Beklemishev A. D. Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps // Phys. Plasmas. 2016. Vol. 23, No. 8. P. 082506.
2. Tsidulko Yu. A., Chernoshtanov I. S. Particle-in-cell simulation of field reversal in mirror trap with neutral beam injection // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1771. 040005.
3. Akhmetov T. D. et al. Production and study of a high-temperature plasma in the central solenoid of the AMBAL-M device // Plasma Phys. Rep. 2002. Vol. 28. P. 750–755.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Мурахтин

УДК 533.9.082.79

Измерение интенсивности D-D-реакции на установке ГДЛ с измененной магнитной конфигурацией

В. А. Корж

Новосибирский государственный университет

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) — линейная осесимметричная магнитная ловушка с двухкомпонентной плазмой. Первая компонента (мишенная плазма) — дейтериевая или водородная плазма, удерживаемая в газодинамическом режиме. Вторая компонента (быстрые ионы) — инжестируемые под углом 45° атомы водорода или дейтерия с энергией 25 кэВ, захваченные мишенной плазмой. Данная компонента удерживается в адиабатическом режиме. Концентрация быстрых ионов имеет пикированный профиль с максимальной плотностью около точек останова (пробочное отношение равно двум). Переключение недавно установленных магнитных катушек позволяет существенно изменить положение точек останова. При инжекции дейтерия в результате столкновения быстрых ионов с быстрыми ионами и дейтронами мишенной плазмы происходят термоядерные D-D-реакции, в результате которых появляются с равной вероятностью 3,02 МэВ протоны или 2,45 МэВ нейтроны.

Задача данной работы измерить полное число реакций в единицу времени для всех трех возможных магнитных конфигураций. В работе используется сцинтилляционный детектор (для регистрации 2,45 МэВ нейтронов в потоковом режиме) и набор полупроводниковых детекторов (для регистрации 3,02 МэВ протонов в счетном режиме). Сцинтилляционный детектор, размещенный в центральной плоскости на расстоянии 170 см, показывает обзорный поток нейтронов. Полупроводниковые детекторы позволяют получить число реакций в единицу времени из единицы длины в нескольких точках вдоль оси установки в абсолютных величинах.

Для калибровки сцинтилляционного детектора, сигнал с которого пропорционален интенсивности реакций, используется набор полупроводниковых детекторов и модельный профиль, построенный на основе парных кулоновских столкновений [1] (до момента образования неустойчивости в плазме, в дальнейшем профиль значительно изменяется). В результате данной работы был определен коэффициент пропорциональности между сигналом со сцинтилляционного детектора и нейтронным выходом D-D-реакций $(1,1 \pm 0,6) \cdot 10^{11} \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, в стандартной и средней конфигурации полное число реакций равно $3,4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ (относительная ошибка 20 %), для короткой ямы результат на 20 % меньше.

1. Котельников И. А. и др. Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловушки: препринт ИЯФ. Новосибирск, 1990.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Максимов

Плазменные равновесия с $\beta > 1$

В. А. Куршаков

Новосибирский государственный университет

Уравнение равновесия для плазмы в магнитном поле может быть записано в общем виде как равенство дивергенции тензора потока импульса и силы Ампера, действующей на плазму. Для цилиндрической плазмы в однородном магнитном поле, где эти величины зависят только от радиальной координаты, поперечное равновесие выглядит следующим образом:

$$\Pi_{rr}(r) - \int_r^{\infty} \frac{\Pi_{rr}(r') - \Pi_{\phi\phi}(r')}{r'} dr' = \frac{B_v^2 - B_z^2(r)}{8\pi}.$$

В классическом случае, когда давление плазмы изотропно и $\Pi_{rr} = \Pi_{\phi\phi} = p$, плазменное бета ограничено значением $\beta = 1$, однако оно может быть и больше, если плазма будет анизотропна и компоненты тензора потока импульса будут различны. Впервые обратил на это внимание И. А. Котельников [1] при описании равновесия типа диамагнитного пузыря для цилиндрической плазмы. Отмечено, что в переходном слое такого равновесия все три компоненты Π_{rr} , $\Pi_{\phi\phi}$ и Π_{zz} различны и $\Pi_{rr} > \Pi_{\phi\phi}$.

В данной работе будут представлены результаты численного моделирования инъекции плазмы в бесконечно протяженную цилиндрическую область, расположенную в изначально однородном магнитном поле. Будет показана динамика вытеснения магнитного поля на двух стадиях: в процессе насыщения давления плазмы, когда плазменное $\beta < 1$ и соотношение плазменных давлений оказывается обратным ($\Pi_{rr} < \Pi_{\phi\phi}$), и после насыщения, когда равновесие выполнено, но $\beta > 1$ и соотношение давлений соответствует предсказанному в работе [1]. Также будет представлена теоретическая модель, описывающая динамику вытеснения магнитного поля в такой системе.

1. Kotelnikov I. On the structure of the boundary layer in a Beklemishev diamagnetic bubble // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. Vol. 62. 075002.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук И. В. Тимофеев

УДК 533.9

Моделирование захвата нейтральных пучков и последующей столкновительной релаксации быстрых ионов в плазме методом частиц в ячейках

О. П. Морозов

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН на установке КОТ (компактный осесимметричный тороид) начаты эксперименты по обращению магнитного поля за счет инжекции в предварительно созданную плазму нейтральных пучков. Для понимания процессов захвата этих пучков и столкновительной релаксации образующихся быстрых ионов в *Particle-In-Cell* (PIC) модели были реализованы алгоритм парных кулоновских столкновений Такизуки — Абэ [1, 2] и алгоритм ударной ионизации [3]. При этом на первом этапе для тестирования этих алгоритмов, а также для изучения столкновительных процессов при текущих параметрах эксперимента КОТ (плотность тепловой плазмы $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и температура электронов 30–50 эВ, энергия быстрых ионов 15 кэВ, время инжекции 1–5 мс) была построена упрощенная численная модель, в которой пренебрегается пространственной динамикой частиц и рассматриваются только процессы их взаимодействия в пространстве скоростей.

В докладе будут представлены результаты тестирования модели, а также изложены результаты моделирования захвата нейтрального пучка и последующей релаксации захваченных быстрых ионов для различных параметров как мишенной плазмы, так и самого пучка. Будет приведена динамика функций распределения и их основных моментов для всех компонент плазмы. Это поможет определить уровень столкновительных потерь быстрых ионов и предсказать динамику роста относительного давления плазмы как ключевого параметра в процессе вытеснения/обращения магнитного поля.

1. Takizuka T., Abe H. A binary collision model for plasma simulation with a particle code // J. Comput. Phys. 1977. Vol. 25, No. 3. P. 205–219.
2. Sentoku Y., Kemp A. J. Numerical methods for particle simulations at extreme densities and temperatures: Weighted particles, relativistic collisions and reduced currents // J. Comput. Phys. 2008. Vol. 227, No. 14. P. 6846–6861.
3. P'erez F. et al. Improved modeling of relativistic collisions and collisional ionization in particle-in-cell codes // Phys. Plasmas. 2012. Vol. 19, No. 8. P. 083104.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук И. В. Тимофеев

УДК 533.9

**Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния
для исследования периферийных локализованных мод
на токамаке «Глобус-М2»**

А. М. Пономаренко, А. Ю. Токарев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В современных установках магнитного удержания плазмы, в частности токамаках, наблюдается большое количество разнообразных плазменных неустойчивостей. Они могут быть следствием совершенно разных причин. Особое внимание заслуживают магнитогидродинамические (МГД) явления ввиду их разнообразия и сильного влияния на удержание [1]. Причины возникновения этих неустойчивостей можно получить из решения уравнений магнитной гидродинамики, т. е. уравнений движения проводящей жидкости в магнитном поле, из чего и следует их название. Развитие некоторых из них, например периферийных локализованных мод (ELMs), может привести к повреждению установки [2]. Из-за этого исследование МГД-неустойчивостей является важной задачей. В установках с термоядерными параметрами плазмы для ее решения следует использовать бесконтактные методы. Благодаря возмущению магнитного поля, всегда сопровождающему данные неустойчивости, их появление возможно обнаруживать с помощью магнитных зондов. Однако они обладают плохим пространственным разрешением и не позволяют определять амплитуду возмущения. В случае плотной и неоднородной плазмы сложно сопоставить сигнал магнитного зонда с реальным расположением и амплитудой неустойчивости из-за эффектов затухания и экранирования магнитного поля. Необходимы более локальные методы, использующие зондирование плазмы СВЧ- или лазерным излучением.

Одним из мощных способов, позволяющих изучать магнитогидродинамические неустойчивости, является диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), которая также установлена на токамаке «Глобус-М2» в ФТИ им. А. Ф. Иоффе в Санкт-Петербурге [3]. Система ДОР состоит из двух многочастотных рефлектометров с наклонными антеннами для зондирования плазмы. Диагностика ДОР позволяет оценивать флуктуации плотности плазмы и измерять скорость ее вращения перпендикулярно магнитному полю [4]. Благодаря применению многочастотного зондирования возможно построение радиальных профилей электрического поля и флуктуаций плотности. В данной работе приведено применение диагностики ДОР для исследования различных МГД-неустойчивостей в токамаке «Глобус-М2». Результаты диагностики ДОР сравниваются с сигналами магнитных зондов, также установленных на токамаке «Глобус-М2». Также продемонстрирована возможность определения относительной амплитуды флуктуаций по сигналу ДОР.

1. Hender T. C., Wesley J. C., Bialek J. et al. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions // Nucl. Fusion. 2007. Vol. 47. P. S128.

2. Leonard A.W. Edge-localized-modes in tokamaks // Phys. Plasmas. 2014. Vol. 21. P. 090501.
3. Yashin A. Y., Bulanin V. V., Gusev V. K. et al. Doppler backscattering systems on the Globus-M2 tokamak // JINST. 2022. Vol. 17. P. C01023.
4. Conway G. D., Schirmer J., Kluge S. et al. Plasma rotation profile measurements using Doppler reflectometry // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. Vol. 46. P. 951.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Ю. Яшин

УДК 533.9

Поддержание материального баланса плазмы в ГДЛ с помощью коаксиального плазменного ускорителя

М. А. Прокопьев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) — осесимметричная открытая ловушка с двухкомпонентной плазмой, состоящей из быстрых ионов с энергией порядка 20 кэВ, генерируемых атомарными инжекторами, и холодной тепловой компоненты с ионной температурой порядка 100 эВ, служащей мишенью для инжекции быстрых ионов и выполняющей функцию стабилизации неустойчивостей. Режим удержания холодной плазмы характеризуется высокими потерями, преимущественно через магнитные пробки, с суммарным эквивалентным током порядка 1 кА. Таким образом, для перехода к квазистационарным режимам эксперимента требуются средства для поддержания количества вещества холодной плазмы непосредственно в ходе работы установки.

Для решения данной задачи был избран метод инжекции вещества в плазму с помощью коаксиального плазменного ускорителя («пушки Маршалла»). Ускоритель представляет собой два коаксиальных электрода, между которыми создается газовый разряд, порождающий магнитное поле, ускоряющее плазму газового разряда. Данный метод позволяет получить плотность инжектируемого вещества 10^{15} – 10^{16} см⁻³.

Цель данной работы — исследовать влияние коаксиального плазменного ускорителя на параметры плазмы ГДЛ. В работе представлены предварительные экспериментальные данные по инжекции вещества в плазму установки, результаты по оптимизации параметров инжектируемого вещества путем создания разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, а также анализ влияния инжекции на содержание примесей в плазме установки по данным оптической диагностики.

Научный руководитель — Е. Ю. Колесников

УДК-537.5231

Повышение качества паяных соединений печатных плат неравновесной плазмой атмосферного давления

А. О. Простодушев

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана

Повышение качества паяных соединений между печатной платой и SMD-компонентами является актуальным направлением развития технологии производства современной электроники. В последнее время особый интерес вызывает технология обработки плазмой атмосферного давления взамен, ставшей уже традиционной, обработки вакуумной плазмой [1, 2]. В перспективе это позволит значительно повысить технологичность и экологичность производства и снизить энергетические затраты.

В данной работе рассматривается возможность применения неравновесной атмосферной плазмы высокочастотного коронного и барьерного разряда для обработки контактных поверхностей печатной платы перед пайкой.

В ходе работы была сконструирована экспериментальная установка, состоящая из высоковольтного высокочастотного источника напряжения с импульсным возбуждением и двух электродных узлов: коронного с геометрией «игла — плоскость» и барьерного «плоскость — барьер — плоскость». На установке рассматривалось влияние обработки этих разрядов на контактные площадки печатных плат с покрытием HASL, ENIG и медной подложки. Обработка коронным разрядом происходила при атмосферном давлении с подачей воздуха и азота в разрядный промежуток. Мощность, вкладываемая в разряд, составляла 50 Вт, а частота — 4 кГц. Обработка барьерным разрядом происходила на воздухе с аналогичной мощностью и частотой 3 и 5 кГц. Время обработки образцов составляло от 0,5 до 6 мин. В результате были получены зависимости изменения угла смачивания от времени и режима обработки образцов.

По итогам эксперимента на всех образцах наблюдалось значительное уменьшение угла смачивания. На некоторых образцах обработка позволила достичь 4-кратного уменьшения угла при существенно меньшей мощности разряда по сравнению с [2]. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения данных типов разряда в производстве.

1. Kencana S. D. et al. The roles of plasma science towards plasma-activated reflow soldering on Cu substrate with organic solderability preservatives surface finish // Surf. Interfaces. 2022. Vol. 34. P. 102284.
2. Kencana S. D. et al. Improving the solder wettability via atmospheric plasma technology // 2019 IEEE 69th Electron. Components Technol. Conf. IEEE, 2019. P. 2067–2071.

Научный руководитель — С. Е. Маланичев

УДК 533.9+ 621.3

Исследование спаренного согласующего устройства, используемого в двухплечевом генераторе для питания ВЧ-плазменного эмиттера

В.М. Романенко

Новосибирский государственный университет

Нагрев плазмы в крупных плазменных установках осуществляется за счет пучка атомов водорода, создаваемого нагревным инжектором. Система питания ионного источника представлена полупроводниковым ВЧ-генератором. Выходной сигнал генератора подается через фидер в согласующую цепь, которая преобразует последующее сопротивление цепи в характеристический импеданс фидера. Затем сигнал через высоковольтный разделительный трансформатор подается на плазменный эмиттер. Разделительный трансформатор имеет среднюю точку и используется, чтобы изолировать ВЧ-генератор от высоковольтной части установки.

Важной задачей физики плазмы является улучшение механизма нагрева плазмы, т. е. уменьшение потерь и отраженной мощности. Благодаря тому что трансформатор имеет среднюю точку и две первичные обмотки, появляется возможность использовать двухплечевой генератор. Его работу необходимо обеспечить через согласование с оставшейся частью установки.

В данной работе было разработано и исследовано спаренное согласующее устройство, используемое в двухплечевом генераторе для питания высокочастотного плазменного эмиттера. Для достижения данной цели были рассмотрены виды схем согласования цепей, изучены характеристики генератора и взаимодействие его портов, рассчитаны численные значения емкостей для конденсаторного экрана, который необходим для упрощения задачи согласования и уменьшения потерь мощности. Опытным путем проведено уточнение значений, необходимость в котором возникла в связи с неучтенной погонной емкостью и индуктивностью проводов. Так же методом прямого подбора емкостей были рассчитаны значения номиналов конденсаторов и катушек в согласующем устройстве. На основании полученных данных было собрано и подключено согласующее устройство.

В результате проведенного эксперимента была найдена разность фаз тока и напряжения сигналов с измерительных трансформаторов на выходе плеч генератора, малость которой показала эффективность разработанного устройства. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования двухплечевого генератора с разработанным согласующим устройством для питания плазменных установок с повышением мощности, передаваемой от генератора.

Научный руководитель — И. Д. Маслаков

УДК 533.9

Измерение параметров плазмы в установке ГОЛ-NB

М. А. Федоров

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

На установке ГОЛ-NB в ИЯФ СО РАН ведутся работы по исследованию удержания плазмы в магнитном поле многопробочной конфигурации. В этих экспериментах плазма удерживается в линейной открытой ловушке, состоящей из центральной секции и пристыкованных к ней многопробочных секций. Плазма в центральной секции нагревается с помощью инжекции быстрых атомов.

Механизмы удержания в многопробочной ловушке зависят от длины свободного пробега ионов, которая, в свою очередь, определяется плотностью и температурой плазмы, поэтому измерение этих параметров принципиально важно для интерпретации результатов экспериментов.

Для определения линейной плотности плазмы в работе использовались данные вторично-эмиссионного детектора, измеряющего ослабление пучка быстрых атомов при прохождении через плазму. Написана программа для чтения экспериментальных сигналов и вычисления плотности плазмы с учетом массового состава пучка быстрых атомов.

Для определения температуры плазмы спроектирован диамагнитный зонд, который предполагается установить в центральной плоскости установки. Оценки уровня сигналов показывают, что чувствительность диамагнитного зонда достаточна для измерения давления (nkT) как основной компоненты плазмы, так и популяции быстрых ионов, формирующейся в плазме при инжекции быстрых атомов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Полосаткин

УДК 533.9

Моделирование процесса подпитки плазмы веществом в установке ГДМЛ

Н. С. Шаров

Новосибирский государственный университет

В ИЯФ СО РАН ведется работа по проектированию установки ГДМЛ [1] — открытой ловушки нового поколения для удержания горячей плазмы. Отличительной особенностью установки ГДМЛ является большая длительность рабочего импульса (несколько секунд), позволяющая исследовать плазму в стационарном режиме, в условиях равенства потоков вводимого в плазму и теряемого из ловушки вещества и энергии.

Важным элементом установки ГДМЛ является система подпитки плазмы веществом, обеспечивающая поддержание постоянной плотности плазмы в ловушке. Предполагается, что подпитка веществом будет производиться путем напуска газа в области вблизи магнитной пробки, где плазма имеет наименьший диаметр. При этом все равно тепловые молекулы, вследствие их малой скорости, не могут проникнуть в приосевые области плазмы, и процесс подпитки связан с образованием быстрых вторичных частиц.

Цель работы — определить эффективность подпитки плазмы веществом. Для решения этой задачи разработана программа Монте-Карло моделирования проникновения молекул водорода в плазму, учитывающая основные молекулярные процессы с первичными молекулами водорода и быстрыми атомами, образующимися при перезарядке и диссоциации молекул. С помощью разработанной программы получено пространственное распределение возникающих ионов и произведен анализ эффективности подпитки плазмы веществом.

1. Сковородин Д. И. и др. Газодинамическая многопробочная ловушка ГДМЛ // Физика плазмы. 2023. Т. 49, № 9. С. 831–884.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Полосаткин

УДК 533.922

Изменения ускоряющего поля при разделении плазменной секции в эксперименте AWAKE

В. М. Ярыгова

Институт ядерной физики им Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Кильватерное ускорение — метод ускорения заряженных частиц, позволяющий получить высокий ускоряющий градиент. Плазма, возмущенная прохождением драйвера, создает поля, которые на несколько порядков превышают поля в традиционных ускорителях. Это позволяет ускорять пучки заряженных частиц до высоких энергий при меньших размерах установки.

Эксперимент AWAKE в ЦЕРНе демонстрирует кильватерное ускорение с протонным пучком из кольца SPS в качестве драйвера. В плазме драйвер самомодулируется, после чего создает поле постоянной амплитуды. Одна из актуальных задач этого проекта — инжекция ускоряемого электронного пучка, витнеса. Если инжектировать его за драйвером, во время самомодуляции протонного пучка качество витнеса ухудшается, увеличивается его эмиттанс. Один из вариантов решения этой проблемы — разделение плазменной секции на две, с вакуумным промежутком между ними. Таким образом, в первой плазменной секции будет самомодулироваться длинный протонный пучок, далее произойдет инжекция электронного сгустка, а во второй плазменной секции — его ускорение.

Проблема такого решения заключается в радиальном разлете драйвера в вакууме и, как следствие, уменьшении амплитуды поля в ускоряющей секции. Поэтому возникает задача — изучить, как изменяется ускоряющее поле, а также набор энергии электронным витнесом в зависимости от длины вакуумного промежутка.

При решении этой задачи были рассмотрены два предельных случая по плотности плазмы, соответствующие двум режимам работы установки AWAKE. В работе проведено моделирование эксперимента с помощью программы LCODE, а также получены аналитические приближения для описания обоих случаев. Полученные аналитические значения итоговой энергии витнеса с хорошей точностью совпадают со значениями, полученными моделированием.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. К. В. Лотов



ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук, доц. *Д. Р. Исламов*

Ответственный секретарь секции — *Т. М. Залялов*

Экспертный совет секции

канд. физ.-мат. наук, доц. *Д. Р. Исламов*

д-р физ.-мат. наук, проф. *В. Л. Альперович*

канд. физ.-мат. наук *Т. В. Перевалов*

SOLID STATE PHYSICS

Section Head — Cand. Phys.-Math. Sci. *D. R. Islamov*

Responsible Secretary — *T. M. Zalyalov*

Section scientific committee

Cand. Phys.-Math. Sci. *D. R. Islamov*

Dr Phys.-Math. Sci. *V. L. Alperovich*

Cand. Phys.-Math. Sci. *T. V. Perevalov*

УДК 535.015

Microphotoluminescence characterization of crystalline defects in MAPbCl₃ single crystals

M. A. Maksimov

Saint Petersburg University

As of today, halide perovskites and their low-dimensional counterparts are promising semiconductor materials for the development of solar cells, LEDs, lasers, radiation detectors [1], and other optical devices [2].

The current study investigates microphotoluminescence as a method of defect spectroscopy in the single crystals of MAPbCl₃ halide perovskites ($MA^+ = CH_3NH_3^+$) at a constant temperature of $T = 4K$ with picosecond pulsed laser induced optical excitation. Crystals of MAPbCl₃ are grown by the Antisolvent Vapor-assisted Crystallization (AVC) method using standard proportions of 1 : 1 (MACl : PbCl₂). To compare acquired photoluminescence spectra, another sample is grown with addition of concentrated HCl acid to incorporate excess Cl⁻ ions into the crystals.

X-ray powder diffraction analysis (PXRD) is performed to provide information about basic structural properties of the samples. Lattice constants and crystallographic structures are confirmed.

Obtained experimental results show a potential to identify and characterize crystalline defects in MAPbCl₃ structures by observing changes in the characteristic features of the corresponding microphotoluminescence spectra.

This research has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Megagrant No. 075-15-2022-1112) and carried out on the equipment of the SPbU Resource Center “Nanophotonics”, and “X-ray Diffraction Studies” SPbU Resource Center.

1. Fangze L. et al. Recent Progress in Halide Perovskite Radiation Detectors for Gamma-Ray Spectroscopy // ACS Energy Lett. 2022. Vol. 7 (3). P. 1066–1085.
2. Murzin A. O. et al. Diffuse Reflectance Spectroscopy with Dilution: A Powerful Method for Halide Perovskites Study // Molecules. 2023. Vol. 28. P. 350.

Scientific supervisor — Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof. Y. V. Kapitonov

Annealing effect on Pt/InAlAs Schottky contacts electrophysical characteristics

M. A. Paramonova

Novosibirsk State University

Pt/InAlAs Schottky barrier diodes (SBDs) can be used for the creation of MOSFET transistors [1] and photodetectors [2]. The most important parameters of Schottky barriers are energy barrier height (ϕ_b) and ideality factor (n). These parameters depend on chemical preparation of semiconductor surface as well as thermal annealing conditions.

According to literature data, values of ϕ_b for Pt/InAlAs SBDs lie in the range of 0.72–0.85 eV. Time dependencies of the SBDs parameters at different annealing temperatures are not studied. Moreover, it has been shown that Pt diffuses over ~ 10 nm within InAlAs while annealing at 250 °C with PtAs₂ formation [1]. There is a lack of information about diffusion at higher temperatures.

In this work current-voltage characteristics of Pt/InAlAs SBDs with chemical and Ar⁺-ion treatment were investigated. Time dependences of ϕ_b and n values for the annealing temperatures of 300, 350 and 400 °C within the framework of thermionic emission theory were obtained. The highest ϕ_b and the lowest n values were 0.83 eV and 1.08 (4 min, 300 °C) for ion treatment and 0.79 eV and 1.16 (16 min, 400 °C) for chemical treatment, respectively. Abrupt step changes in ϕ_b for chemically prepared SBDs were observed after 1, 9 and 16 min at the temperatures of 400, 350 and 300 °C, respectively. These changes are probably related to formation of a continuous PtAs₂ layer [1]. Based on these data, the activation energy $E_a = 0.73 \pm 0.14$ eV of a solid-state reaction with PtAs₂ formation was calculated according to Arrhenius equation. Also, Pt diffusion depth was estimated using capacitance-voltage characteristics at reversed voltage bias for SBDs annealed at 400 °C for 1, 9 and 16 minutes. Significant changes in capacitance were observed only after 1 minute of annealing, which is correlated with ϕ_b changes for chemically prepared SBDs. According to calculations, the Pt diffusion depth is 16–21 nm.

1. Kim S. et al. Measurements of thermally induced nanometer-scale diffusion depth of Pt/Ti/Pt/Au gate metallization on InAlAs/InGaAs high-electron mobility transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87. P. 232102.
2. Aksenov M. S. et al. Annealing effect on the barrier characteristics and interface properties of Au/Pt/Ti/n-InAlAs Schottky contacts // *Surf. Interfaces.* 2023. Vol. 39. P. 102920.

Scientific supervisor — M. S. Aksenov

УДК 538.9

**Особенности магнетосопротивления и эффекта Холла
в пленках трехмерного топологического изолятора
на основе халькогенидов висмута и сурьмы**

А. О. Баженов

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Проявление уникальных свойств трехмерных топологических изоляторов (ТИ) привлекает большое внимание научного сообщества в силу перспективности их использования в качестве основы для спин-зависимых устройств. Сочетание симметрии обращения времени и сильного спин-орбитального взаимодействия в данных материалах приводит к образованию поверхностных состояний на границе топологического и тривиального изолятора, которые описываются нечетным числом конусов Дирака с направлением спина, ортогональным волновому вектору и однозначно с ним связанным. Данные состояния устойчивы к обратному рассеянию на немагнитных примесях и дефектах. Однако несмотря на активное исследование пленок ТИ, выявление вклада поверхностных состояний в магнето-транспортные свойства остается непростой задачей из-за шунтирования поверхностных состояний проводимостью объема.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование магнето-транспортных свойств пленок четырехкомпонентного топологического изолятора на основе халькогенидов висмута и сурьмы (BSTS), выращенных с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si(111). Обнаружено положительное магнетосопротивление (МС). При его описании в области малых полей функцией Хиками наблюдаются необычно высокие значения префактора α , не характерные для модели слабой антилокализации. Высоко-полевая часть МС слабо чувствительна к направлению магнитного поля и может быть описана с учетом электрон-электронного взаимодействия в условиях Зеемановского расщепления, которое в BSTS-системе может быть достаточно большим из-за большого значения g -фактора ($\sim 50-100$).

Детальный анализ эффекта Холла показал, что коэффициент Холла немонотонен и сильно изменяется в слабых магнитных полях вплоть до 10 %. Для совместного описания МС и эффекта Холла предложена модель, основанная на открытии щели в дираковском спектре поверхностных состояний за счет эффекта Зеемана и соответствующем перераспределении транспортных потоков. Этот механизм, совместно с эффектом слабой антилокализации и электрон-электронного взаимодействия, позволяет качественно объяснить наблюдаемые экспериментальные эффекты.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Н. П. Степина

Формирование нанокластеров кремния в пленках монооксида кремния

А. В. Барнаков

Новосибирский государственный университет

Диэлектрические пленки, содержащие аморфные нанокластеры кремния, интересны с фундаментальной точки зрения, а также перспективны для нано- и оптоэлектроники. Пленки монооксида кремния (SiO — монокс) используются как просветляющее покрытие и как рабочие слои в новых элементах памяти — мемристорах. Известно, что при нагреве пленок монокса идет реакция диспропорционирования $2\text{SiO} \rightarrow \text{Si} + \text{SiO}_2$ с образованием кластеров аморфного кремния. Однако детально кинетика этой реакции не исследована.

Исходными образцами были пленки SiO , осажденные методом электронно-пучкового испарения в вакууме и осаждения на подложки из монокристаллического Si и кварца при комнатной температуре. Наличие и фазовый состав нанокластеров кремния в пленках были исследованы с применением методов спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), ИК-спектроскопии и эллипсометрии.

Для формирования аморфных нанокластеров кремния в пленках SiO были использованы печные отжиги. В процессе отжигов по данным ИК-спектроскопии наблюдалось изменение частоты валентных колебаний Si-O связей, связанное с изменением стехиометрического состава матрицы, окружающей нанокластеры аморфного кремния. По данным эллипсометрии контролировались толщина и оптические константы пленок. По данным КРС обнаружено, что при отжиге 600°C происходило некоторое увеличение количества связей Si-Si , однако заметного роста аморфных нанокластеров кремния не наблюдалось. Такая температура низка для диффузионно-лимитируемого роста нанокластеров кремния. Для такого типа роста кластеров проводились отжиги при температуре 850°C и выше.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. А. Володин

УДК 535.3

Изучение областей размерного квантования в квантовых точках GaAs/AlGaAs

Е. А. Башегурова, Е. И. Дерибина

Санкт-Петербургский государственный университет

В данной работе были изучены квантовые точки (КТ) на основе GaAs/AlGaAs, спектр фотолюминесценции (ФЛ) образца с такими КТ содержит несколько полос излучения, связанных с различными областями квантования внутри полупроводника. В работе по магнитоФЛ [1] была выдвинута гипотеза о том, что наблюдаемые полосы излучения относятся к КТ внутри наноотверстия и дополнительной КТ, сформировавшейся на границе наноотверстия. Данное предположение может быть проверено при подробном изучении спектра микроФЛ образца, что и сделано в данном исследовании.

На спектре излучения ФЛ были выделены следующие полосы (от меньшей энергии к большей): излучение от углеродного загрязнения GaAs:C, излучение от трехмерного слоя GaAs, полосы, относящиеся к КТ А, КТ Б1 и КТ Б2, тяжелодырочные экситоны в квантовой яме (КЯ), излучение от рекомбинирующих экситонов в трехмерном слое AlGaAs. Полосы излучения всех трех КТ состоят из отдельных пиков, что замечено при исследовании спектра микроФЛ образца.

После сканирования образца в направлении оси x кристалла пятном лазера (диаметр 1 мкм) была вычислена пространственная производная для карты микроФЛ, на которой видно, что излучение трех ансамблей КТ антикоррелирует с излучением от КЯ, а каждый из ансамблей КТ коррелирует с другими двумя ансамблями.

В результате была определена природа полос излучения ФЛ полупроводника GaAs/AlGaAs с КТ, проведенный анализ показал наличие участка отделения КЯ от КТ, результирующего в антикорреляцию излучения от этих нанобъектов. Имеющие наименьшую энергию излучения КТ А были определены как заполненные GaAs наноотверстия. КТ Б1 и КТ Б2 являются меньшими квантово-размерными структурами внутри наноотверстия или на его границе.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (мегагрант № 075-15-2022-1112) на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника».

1. Ulhaq A., Duan Q., Zallo E. et al. Vanishing electron g factor and long-lived nuclear spin polarization in weakly strained nanohole-filled GaAs/AlGaAs quantum dots // Phys. Rev. B. 2016. Vol. 93. 165306.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. В. Капитонов

Химическая стабильность сверхтонких пленок Bi/InAs(111)A

И. А. Бетке

Новосибирский государственный университет

Висмут — самый тяжелый из нерадиоактивных элементов, и для него характерно сильное спин-орбитальное взаимодействие. Это перспективно для создания приборов, основанных на спиновой степени свободы. Тонкие пленки висмута могут обладать разнообразной кристаллической и электронной структурой. Так, в работе [1] был изучен рост тонких пленок Bi/InAs(111)A. Показано, что на поверхности InAs формируются квазиодномерные цепочки из димеров висмута с ненулевой спиновой поляризацией их электронных состояний.

Так как ранее пленки исследовались *in situ*, то для дальнейшей разработки приборов необходимо изучить стабильность синтезированных структур в атмосфере. Помимо этого, для последующего создания МДП структур на данные пленки необходимо нанести диэлектрический слой. Обычно в процессе напыления образцы нагреваются до 200–300 °С, поэтому нужно также изучить термическую стабильность пленок.

Цель работы — экспериментально изучить химическую и термическую стабильность тонких пленок Bi/InAs(111)A в атмосфере азота и воздуха.

Висмут напылялся из эффузионной ячейки Кнудсена на поверхность InAs(111)A(2 × 2). Анализ химического состава и структуры пленок проводился *in situ* методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Качество выращенных пленок оценивалось методом дифракции медленных электронов.

Выращено два образца толщиной 4 и 14 Å. Показано, что в атмосфере азота (давление 1 атм, содержание примесей менее 1 ppm) происходит полное окисление пленки толщиной 4 Å, при этом окисление подложки не наблюдалось. В пленке толщиной 14 Å происходит только частичное окисление висмута. Последующая экспозиция образцов на воздухе не приводит к дальнейшему окислению. Изучение термической стабильности показало, что нагрев в вакууме частично окисленной пленки Bi/InAs(111)A при температуре ~ 50 °С не приводит к разрушению ее структуры. Однако температура ~ 300 °С оказалась критической. Прогрев при данной температуре приводит к частичному восстановлению висмута, диффузии кислорода к подложке и окислению индия и мышьяка.

1. Mihalyuk A. N. et al. Emergence of quasi-1D spin-polarized states in ultrathin Bi films on InAs (111) A for spintronics applications // *Nanoscale*. 2024. Vol. 16, No. 3. P. 1272–1281.

Научный руководитель — Н. Ю. Соловова

УДК 53.096

Диффузия имплантированного германия из пленки SiO_2 в кремний и формирование фазы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Ван Гуаньлун

Новосибирский государственный университет

Соединение $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, по сравнению с кремнием, обладает лучшими оптическими и электрическими свойствами, что позволяет добиться более высоких значений параметров приборов, созданных на его основе. Большинство методов создания пленок $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ являются низкотемпературными, что препятствует внедрению их в имеющуюся кремниевую технологию. Цель данной работы — установить закономерности формирования фазы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при диффузии атомов Ge из имплантированного ионами Ge захороненного слоя SiO_2 в слой кремния на изоляторе (КНИ).

КНИ-структуры были созданы методом DeleCut, разработанным в ИФП СО РАН, на подложках монокристаллического кремния p -типа проводимости с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 10–20 $\Omega \cdot \text{см}$. Толщина захороненного слоя SiO_2 составляла 330 нм, который был имплантирован ионами Ge с энергией 80 кэВ дозой $1,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Толщина перенесенной на SiO_2 пленки кремния составляла ~ 640 нм. Пластина КНИ была разрезана на образцы, которые в результате анодного окисления были доведены до толщины слоя отсеченного кремния 35, 50, 70 и 180 нм. Образцы отжигались при температуре 1100 °С в течение 0,5 и 3 ч. Для исследования наших структур использовался метод комбинационного рассеяния света.

В результате экспериментов было установлено, что после высокотемпературного отжига в пленке КНИ формируется соединение $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, стехиометрический состав которого зависит как от длительности отжига, так и от толщины пленки кремния. После отжига длительностью 0,5 ч в спектрах КРС доминирует пик на частоте 439 см^{-1} , соответствующий рассеянию на оптических фононах в кристаллической решетке, в которой один атом Ge окружен четырьмя атомами Si. В спектрах КРС-структур также наблюдается слабоинтенсивный пик на частоте 403 см^{-1} , соответствующий рассеянию на оптических фононах в решетке $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$. С увеличением длительности отжига до 3 ч происходит рост интенсивности пика КРС на частоте 439 см^{-1} , причем тем больше, чем меньше толщина пленки КНИ. В пленках толщиной 35 нм при этом также наблюдается рост интенсивности пика на частоте 403 см^{-1} в 6 раз, и его интенсивность становится сравнимой с интенсивностью пика 439 см^{-1} . Полученные результаты показывают, что диффузия Ge из захороненного слоя SiO_2 в пленку Si приводит к формированию слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. И. Е. Тыщенко

УДК 538.971

**Измерение фотоЭДС на поверхности p -GaAs(Cs,O)
методами фотоотражения и фотоэмиссии**

М. М. Верчук

Новосибирский государственный университет

В данной работе изучалось поведение поверхностного электрического поля и фотоЭДС в умеренно легированном арсениде галлия ($p = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) с адсорбированными слоями цезия и кислорода. Использовались две методики измерения. Первая основана на спектроскопии фотоотражения: изучаемый образец освещается двумя источниками света, один из которых является пробным светом, второй — светом накачки фотоЭДС. Модуляция фотоЭДС приводила к осцилляциям Франца — Келдыша в спектрах коэффициента отражения пробного света. Проведены измерения спектров фотоотражения в зависимости от адсорбированных слоев цезия и кислорода на поверхности арсенида галлия. Исходя из полученных данных, было найдено поверхностное электрическое поле и фотоЭДС. Обнаружено, что при адсорбции слоев цезия на поверхности арсенида галлия поверхностное электрическое поле и фотоЭДС возрастают, что может объясняться образованием и ионизацией цезий-индуцированных электронных состояний [1]. При адсорбции кислорода поле и фотоЭДС падали из-за пассивирования цезиевых поверхностных состояний. Вторая методика основана на влиянии изгиба зон на квантовый выход фотоэмиссии. Поверхность образца освещалась двумя пучками света с одинаковой длиной волны, модулированными на различных частотах $f_{1,2}$. Каждый пучок генерировал ток фотоэмиссии, а также поверхностную фотоЭДС. Влияние фотоЭДС на эффективное сродство и, как следствие, на квантовый выход фотоэмиссии приводило к возникновению на суммарной и разностной частотах $f_2 \pm f_1$ фотоЭДС-индуцированного фототока, который измерялся последовательным синхронным детектированием частот f_2 и f_1 . Методы фотоотражения и фотоэмиссии дали качественно близкие зависимости величины фотоЭДС от покрытия цезием и кислородом, что подтверждает возможность изучения фотоЭДС с помощью предложенной фотоэмиссионной методики.

1. Alperovich V. L., Paulish A. G., Terekhov A. S. Domination of adatom-induced over defect-induced surface states on p-type GaAs (Cs, O) at room temperature // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50, No. 8. P. 5480.

Научный руководитель — В. С. Хорошилов

УДК 538.9

Кинетика затухания люминесценции и светоиндуцированного поглощения кристалла ниобата лития, легированного магнием

А. М. Вопиловский

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского, Новосибирск

Ниобат лития является сегнетоэлектрическим оксидом, широко применяемым при создании электрооптических, а также нелинейно-оптических устройств. Этот кристалл также рассматривается в качестве эталона для других сегнетоэлектрических оксидов и обычно используется в качестве пробного материала, где новые концепции и приложения могут быть протестированы как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. Его уникальные электрические и оптические свойства обусловлены наличием межзонных состояний — поляронов малого радиуса. В связи с появлением относительно новых экспериментальных данных [1] стал возможным более детальный анализ процессов, происходящих в кристалле в результате возбуждения лазерным импульсом, с целью определения важных для практического применения параметров, например подвижностей и прыжковых барьеров. До сих пор кинетические кривые описывались лишь феноменологически, поэтому создание кинетической модели люминесценции и поглощения и определение на ее основе микроскопических параметров системы является актуальной задачей.

В настоящей работе был проанализирован обширный массив экспериментальных кинетических данных [1], измеренных в широком диапазоне температуры. На основании анализа были предложены модельные механизмы люминесценции и светоиндуцированного поглощения, в которых основную роль играют взаимопревращения трех видов квазичастиц: электронных и дырочных поляронов и samozaxваченных экситонов. Экспериментальные данные были аппроксимированы рассчитанными теоретическими зависимостями, в результате чего были определены и проанализированы прыжковые радиусы взаимодействия и энергии активации процессов, приводящих к релаксации поляронов и экситонов в кристалле.

1. Messerschmidt S. et al. The role of self-trapped excitons in polaronic recombination processes in lithium niobate // J. Phys.: Condensed Matter. 2018. Vol. 31, No. 6. P. 065701.

Научный руководитель — С. Г. Федоренко

Исследование фазового перехода в тонких пленках галогенидного перовскита $FA_xMA_{1-x}PbI_3$

В. О. Гриценко, А. О. Мурзин

Санкт-Петербургский государственный университет

Галогенидные перовскиты представляют большой интерес для фотовольтаики и оптоэлектроники благодаря их уникальным оптическим свойствам, таким как большая длина диффузии носителей заряда, большой коэффициент поглощения от ближнего инфракрасного до ультрафиолета света вследствие возможности регулирования ширины запрещенной зоны изменением состава или добавления легирующих веществ и многое другое. Одними из наиболее эффективных перовскитных солнечных элементов считаются солнечные элементы на основе $FA_{0,85}MA_{0,15}PbI_3$ [1], где FA — $[HC(NH_2)_2]^+$ формамидиний, MA — $[CH_3NH_3]^+$ метиламоний. Влияние соотношения FA/MA в значительной мере определяет эффективность солнечных элементов, поэтому крайне важно уметь определять его достаточно точно. К сожалению, наиболее популярные среди химического сообщества методы рентгенофазового анализа не всегда позволяют сделать это с высокой точностью, в связи с чем возникает потребность в использовании других методов.

Данная работа посвящена исследованию температурных зависимостей оптических свойств тонких пленок галогенидного перовскита $FA_xMA_{1-x}PbI_3$. Сделаны выводы о соотношении между FA/MA в представленных образцах. В работе рассматривается влияние состава первоначального раствора, добавления MAI во время синтеза и состава атмосферы, в которой происходил отжиг на температуру фазового перехода. В качестве метода исследования была выбрана температурозависимая спектроскопия фотолюминесценции. Благодаря высокой точности при относительной доступности используемых в работе методов и приборов становится возможным с малой погрешностью управлять отношением FA/MA во время синтеза, которое практически невозможно определить на основе рентгенофазового анализа.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (мегагрант № 075-15-2022-1112) на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанопотоника».

1. Zhan S. et al. Stable 24.29%-Efficiency $FA_{0,85}MA_{0,15}PbI_3$ Perovskite Solar Cells Enabled by Methyl Haloacetate-Lead Dimer Complex // *Adv. Energy Mater.* 2022. Vol. 12. P. 2200867.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. В. Капитонов

УДК 538.9

Измерения длины электрон-электронного рассеяния в подвешенных полупроводниковых микроструктурах

Д. А. Егоров

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Большое влияние на электронный транспорт в полупроводниковых микро- и наноструктурах оказывает электрон-электронное ($e-e$) взаимодействие. Однако обычные измерения сопротивления почти нечувствительны к $e-e$ -взаимодействию, поскольку оно сохраняет полный импульс электронной системы. Но вклад отдельных баллистических траекторий в контактное сопротивление оказывается чувствительным к нему. Когда длина $e-e$ -рассеяния становится сравнимой с длиной баллистической траектории, последняя разрушается, уменьшая свой вклад в нелокальное магнетосопротивление. Известно то, как длина $e-e$ -рассеяния зависит от температуры [1]. Таким образом, изучение температурного подавления баллистических пиков нелокального магнетосопротивления позволяет определить длину $e-e$ -рассеяния.

Интерес к подвешенным микроструктурам (т. е. структурам, отделенным от подложки) вызван, в частности, усилением $e-e$ -взаимодействия, которое предсказано теоретически [2], однако прямых сравнений длин $e-e$ -рассеяния в подвешенных и неподвешенных образцах до сих пор сделано не было. Это представляет собой актуальную научную задачу.

Экспериментально изучено нелокальное магнетосопротивление в неподвешенных и подвешенных микроструктурах с двумерным электронным газом на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs. Из анализа температурных зависимостей амплитуд баллистических пиков были определены длины $e-e$ рассеяния, а также критические температуры, при которых длина $e-e$ -рассеяния равна длине резонансной траектории. Критическая температура, а следовательно, и длина $e-e$ -взаимодействия в подвешенных образцах оказалась ниже, чем в неподвешенных, что свидетельствует об ожидаемом усилении $e-e$ -взаимодействия в результате подвешивания. Также была получена зависимость критической температуры от длины резонансной траектории.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-12-00343).

1. Chaplik A. V. Energy spectrum and electron scattering processes in inversion layers // Sov. Phys. JETP. 1971. Vol. 33. P. 997–1000.
2. Pogosov A. G. Et al. Suspended semiconductor nanostructures: physics and technology // J. Physics: Condensed Matter. 2022. Vol. 34, No. 26. P. 263001.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Д. А. Похабов

Переключения сопротивления в нестехиометрических пленках SiO_x

К. Н. Ермак

Новосибирский государственный технический университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Стремительный прогресс в области информационных технологий (в частности, в разработке нейроморфных аппаратных систем) основан на решениях с использованием массивов быстродействующей энергонезависимой памяти с резистивной коммутацией (ReRAM) большой емкости, позволяющих выполнять хранение и вычисления в одном и том же месте без передачи данных. Аппаратная реализация нейроморфных систем на базе ReRAM для решения задач искусственного интеллекта была успешно продемонстрирована с использованием тонкопленочных структур на основе окислов металлов. Особый интерес представляют нейронные сети на базе мемристорной логики с использованием кремнийсодержащих диэлектриков, которые бы обеспечивали многоуровневую коммутацию.

В представленной работе пленки SiO_x заданного состава толщиной около 40 нм были получены методом плазмохимического осаждения из газовой смеси моносилана с кислородом ($\text{SiH}_4 - \text{O}_2$) при контролируемом потоке газов на установке с удаленной плазмой [1]. Измерения вольт-амперных характеристик проводились на МДП-структурах с помощью двухканального источника-измерителя В2902А как на постоянном токе, так и в импульсном режиме. На экспериментальных вольт-амперных характеристиках наблюдается мемристорный эффект с биполярным механизмом переключения через стабильные промежуточные состояния. Структуры демонстрируют высокую стабильность переключающих свойств, большое окно памяти. Переход из закрытого в открытое состояние происходит не резко (скачкообразно), а достаточно плавно на довольно большом участке развертки напряжения. Развертка напряжения в импульсном режиме показывает сильную зависимость величины окна памяти от длительности импульса. Обнаружено, что при напряжении включения 14–15 В зависимость тока от числа импульсов носит линейный характер. Представленный объем экспериментальных данных показывает возможность создания элементов ReRAM с активным слоем SiO_x , обладающих синаптической пластичностью.

1. Перевалов Т. В., Володин В. А., Новиков Ю. Н. и др. Наноразмерные флуктуации потенциала в SiO_x , синтезированном плазмохимическим осаждением // ФТТ. 2019. Т. 61, вып. 12. С. 2528–2535.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Г. Н. Камаев

УДК 539.233

Рост SnSe_2 , инициированный кристаллизацией тонкого аморфного слоя на поверхностях $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ и $\text{Si}(111)$

К. Е. Захожев

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

2D-дихалькогениды металлов, состоящие из слоев толщиной в несколько атомов, обладают диапазоном поглощения от ближнего ИК (1,25 эВ) до УФ (3,5 эВ), а отсутствие оборванных связей на поверхности и взаимодействие Ван-дер-Ваальса между слоями обеспечивает высокую механическую гибкость, что делает их перспективными для применения в оптоэлектронике, фотонике, в том числе в гибкой электронике. Тем не менее разработка и оптимизация методик выращивания эпитаксиальных слоев SnSe_2 высокого структурного совершенства на полупроводниковых подложках является актуальной проблемой, препятствующей применению данного класса материалов в современной полупроводниковой электронике.

Разработаны методики роста SnSe_2 на подложках $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ и $\text{Si}(111)$, включающие: 1) осаждение аморфного слоя SnSe_2 толщиной ~ 1 нм с соотношением потоков $\text{Se} : \text{Sn} \sim 10 : 1$ при температуре ~ 100 °C; 2) кристаллизация аморфного слоя путем резкого повышения температуры до ростовой (~ 250 °C) с одновременным осаждением атомов Se и Sn. Рост SnSe_2 на $\text{Si}(111)$ также включает предварительную пассивацию поверхности монослоем Se при 100 °C.

Пленки $\text{SnSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ и $\text{SnSe}_2/\text{Si}(111)$ толщиной 50 и 30 нм соответственно были получены в колонне отражательного электронного микроскопа. Рост проходил по двумерно-островковому механизму. Анализ пленок методом *ex situ* атомно-силовой микроскопии показал наличие 3D-островков SnSe_2 , образовавшихся в областях выхода на поверхность дислокаций с винтовой компонентой, концентрация которых составила $\sim 2 \cdot 10^8$ см⁻² и $\sim 18 \cdot 10^8$ см⁻² для пленок на поверхностях $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ и $\text{Si}(111)$ соответственно. Анализ структурно-морфологических особенностей пленки $\text{SnSe}_2/\text{Si}(111)$ методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии показал, что пленка имеет гексагональную структуру решетки пространственной группы $P\bar{3}m1$ с параметрами $a = 0,38$ нм и $c = 0,62$ нм, что соответствует фазе 1T- SnSe_2 и подтверждается методом комбинационного рассеяния света.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-72-10124) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры».

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. И. Рогило

Эпитаксия и свойства барьера в InAlSb/InSb nВn-гетероструктурах

Т. А. Зиренко

Новосибирский государственный университет

Антимонид индия — узкозонный полупроводник, использующийся для создания инфракрасных фотоприемников среднего ИК-диапазона. Основным ограничением ИК-фотоприемников на основе InSb является необходимость охлаждения таких устройств до криогенных температур, что увеличивает вес, энергопотребление и размеры устройств. Одним из вариантов повышения рабочей температуры без потери чувствительности является применение барьерных nВn-гетероструктур на основе InSb/InAlSb, в которых в качестве барьера используются соединения InAlSb. В то время как оптимальные условия роста слоев InSb уже изучены, условия роста слоев InAlSb и их изменения в зависимости от доли Al практически не исследованы.

При росте методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) *in situ* контроль осуществляется методом дифракции быстрых электронов, позволяющим регистрировать реконструкции на поверхности слоев. Вид реконструкции на поверхности образца зависит от условий роста. Наиболее оптимальным является рост в стабилизированных сурьмой условиях, при этом на поверхности слоев наблюдается реконструкция $a(1 \times 3)$, в режиме обогащения сурьмой на поверхности образуется реконструкция $c(4 \times 4)$. Поэтому переход $a(1 \times 3) \leftrightarrow c(4 \times 4)$ можно использовать для определения оптимальных условий роста. Цель данной работы – определить оптимальные условия роста слоев InAlSb с помощью изучения реконструкционного перехода $a(1 \times 3) \leftrightarrow c(4 \times 4)$. Слои выращивались методом МЛЭ на подложках InSb (100). Реконструкционные переходы на поверхности InSb, InAlSb изучались при варьировании потока сурьмы без потока элементов 3-й группы (статические условия), так и при варьировании соотношения потоков 3-й группы и сурьмы в процессе роста (динамические).

Температура реконструкционного перехода для слоев с долей Al до 0,1 выше, чем для InSb. При доле Al 0,15, вместо перехода $a(1 \times 3) \leftrightarrow c(4 \times 4)$, возникает переход $a(1 \times 3) \leftrightarrow c(4 \times 4) + (1 \times 3)$ до $T = 380$ °С, для больших температур наблюдается переход $a(1 \times 3) \leftrightarrow (1 \times 3)$. Изменения реконструкции слоев InAlSb в условиях обогащения сурьмой могут быть связаны с псевдоморфностью слоя InAlSb. Аналогичные изменения наблюдаются и в динамических условиях.

Научный руководитель — М. А. Суханов

УДК 538.9

Энергетический спектр новых GaSbP/AIP квантовых точек

Д. В. Касьянов

Новосибирский государственный университет

Одной из задач современной физики полупроводников является создание универсальной памяти — элементов памяти, которые сочетают в себе быстроедействие и энергонезависимость. Перспективное направление в этой области — использование полупроводниковых квантовых точек (КТ) на основе A_3B_5 материалов в качестве плавающего затвора в элементах памяти [1]. Главной преградой на пути создания таких устройств является малое время хранения заряда, обусловленное низкой энергией локализации носителей в КТ (E_{loc}). Лучшая на данный момент энергия локализации 1,18 эВ, что соответствует времени хранения 4 дня, была достигнута для элементов памяти с GaSb/GaP КТ. При замене материала матрицы на AIP ожидается увеличение энергии локализации на 500 мэВ.

Ранее были получены релаксированные КТ [2], в которых E_{loc} составляет около 1,6 эВ. Однако расчеты [3] показывают, что в напряженных КТ E_{loc} будет выше. Одним из путей предотвращения пластической релаксации КТ является формирование их из твердого раствора GaSbP, характеризующегося меньшим рассогласованием параметров решетки по отношению к AIP. Таким образом, цель исследования — изучить энергетический спектр GaSbP/AIP КТ.

Гетероструктуры с КТ и без них были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Обнаружено, что, несмотря на значительное увеличение доли молекул P_2 в потоке осаждаемых веществ, происходит формирование релаксированных GaSbP/AIP КТ. Проведено исследование выращенных гетероструктур методом спектроскопии фотолюминесценции. Также был проведен расчет энергетического спектра квантовых точек, получены карты энергии перехода и E_{loc} дырочных состояний и проведено сравнение результатов расчетов с данными спектроскопии фотолюминесценции.

1. Marent A., Nowozin T., Geller M., Bimberg D. The QD-Flash: a quantum dot-based memory device // *Semicond. Sci. Technol.* 2011. Vol. 26. P. 014026.
2. Abramkin D. S., Petrushkov M. O., Bogomolov D. B. et al. Structural Properties and Energy Spectrum of Novel GaSb/AIP Self-Assembled Quantum Dots // *Nanomater.* 2023. Vol. 13. P. 910.
3. Abramkin D. S., Atuchin V. V. Novel InGaSb/AIP Quantum Dots for Non-Volatile Memories // *Nanomater.* 2022. Vol. 12. P. 3794.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. С. Абрамкин

Исследование смачиваемости бифильных медь-графеновых поверхностей

С. В. Комлина

Новосибирский государственный университет

Графен обладает исключительными электронными, химическими, тепловыми, механическими и оптическими свойствами [1], а потому перспективен для применения во многих сферах, например для создания различных сенсорных датчиков или защитных покрытий [2]. В настоящее время одна из наиболее актуальных задач заключается в создании поверхности с контролируемо изменяемыми свойствами, в частности с контролируемо изменяемым динамическим контактным углом, и графен может помочь в ее решении. В данной работе изучается смачиваемость бифильных поверхностей на основе графена.

Цель работы — отработать методику синтеза бифильных поверхностей и исследовать характер изменения контактного угла в зависимости от процента покрытия образца графеном. Для создания образцов применялся метод парофазного осаждения на медную фольгу при атмосферном давлении с использованием метана в качестве углеводорода. Время стандартного синтеза однослойного графена составляет 10 мин [1]. В работе этот параметр варьировался от 1 до 30 мин, изменяя в диапазоне от 1 до 10 мин процент покрытия образца графеном, а после — число графеновых слоев. Синтезировано несколько образцов, на каждом из которых измерялся контактный угол после вынесения в атмосферу и до момента стабилизации (в среднем не менее 2 ч).

Показано, что начальный контактный угол линейно возрастает с увеличением времени синтеза от 13° для 1,5 мин до 87° для 30 мин. Также установлено, что контактный угол увеличивается со временем и после первого часа измерений практически стабилизируется, выходя на нейтральные значения, близкие к собственному контактному углу графита. Наблюдаемое поведение может быть связано со степенью покрытия образца графеном — чем выше доля графена на поверхности, тем больше контактный угол. Такие покрытия в дальнейшем могут применяться для систем с контролируемым теплообменом или для антикоррозионных покрытий.

1. Saqib Shams S., Zhang R., Zhu J. Graphene synthesis: a Review // Mater. Sci. Poland. 2015. Vol. 33. P. 566–578.
2. Shi Y., Hui F., Duan H. L. A review on the use of graphene as a protective coating against corrosion // Ann. Mater. Sci. Eng. 2014. Vol. 1. P. 16.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Андрющенко

УДК 535.016+538.911

Исследование морфологии и оптических постоянных буферных слоев ZnTe/Si методами эллипсометрии и профилометрии

А. С. Кузнецова

Новосибирский государственный технический университет

Кадмий-ртуть-теллур (КРТ) является основным фоточувствительным материалом, используемым в современной ИК-фотоэлектронной технике. Выращивание слоев КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать гетероэпитаксиальные структуры на кремнии с высокими характеристиками. Из-за большого рассогласования постоянных решеток Si и КРТ эпитаксия КРТ должна проводиться на предварительно выращенных на Si буферных слоях ZnTe/CdTe. При этом качество получаемых слоев КРТ во многом зависит от структурного совершенства буферных слоев.

Цель данной работы — исследовать морфологию и дефектность выращенных слоев теллурида цинка методами *ex situ* эллипсометрии и оптической профилометрии. Метод эллипсометрии основан на анализе изменений поляризации отраженной волны, которые характеризуются параметрами ψ и Δ . Оптический профилометр — это прибор для измерения шероховатости поверхности бесконтактным способом. Обычно в таком измерительном устройстве реализовано несколько оптических технологий. Нами были проведены исследования буферного слоя ZnTe, выращенного по стандартной технологии и имеющего большую вариацию толщины по площади пластины.

Решение обратной задачи эллипсометрии (определение параметров модели по измеренным значениям ψ и Δ) показало, что пленка ZnTe в области прозрачности материала имеет слабое поглощение. Зависимость показателя поглощения от толщины пленки практически отсутствует. Наличие поглощения указывает на наличие структурных дефектов. По данным оптической профилометрии буферный слой имеет однородно распределенную шероховатость со среднеквадратической высотой 2–3 нм. Но на фоне однородного рельефа наблюдаются одиночные дефекты в виде ямок и бугорков порядка 10 нм. Плотность дефектов не зависит от толщины пленки и неоднородна по шайбе. На наш взгляд, исследование этих дефектов крайне актуально для понимания причин появления V-дефектов при последующем росте КРТ.

Корреляция результатов между эллипсометрией и профилометрией, имеющими различный физический подход, говорит о том, что их можно использовать как взаимодополняющие методы исследования.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. А. Швец

СВЧ-фотопроводимость квантовых ям CdHgTe/HgTe/CdHgTe критической толщины

Н. С. Кузьмин

Новосибирский государственный университет

В последние годы особый интерес для исследования стали представлять структуры с двойным гетеропереходом CdHgTe/HgTe/CdHgTe с критической толщиной слоя HgTe, равной $\sim 6,5$ нм, в которых реализуется система бесщелевых дираковских фермионов. Стоит отметить, что в недавних работах было предсказано [1] и экспериментально подтверждено [2] существование вблизи дираковской точки сетки одномерных геликоидальных топологических состояний, возникающих на границах доменов, соответствующих обычному двумерному изолятору и топологическому двумерному изолятору, существующих ввиду неравномерности роста квантовых ям.

В нашей работе было исследовано поведение полевых холловских транзисторов, созданных на основе двойного гетероперехода CdHgTe/HgTe/CdHgTe с критической толщиной слоя HgTe $\sim 6,5$ нм. Сам образец представлял собой три последовательно соединенных холловских мостика с размерами 4×12 , 10×30 и 50×100 мкм². Измерения проводились при температурах в диапазоне от 3 до 12 К при освещении структуры СВЧ-излучением с частотой в диапазоне от 1,8 до 2,56 ГГц.

В ходе работы было получено, что на зависимостях СВЧ-фотосопротивления ΔR_{ph} от затворного напряжения вблизи дираковской точки наблюдаются знакопеременные флуктуации с величиной около ~ 1 % от полного сопротивления. Величина данных флуктуаций на макроскопической части образца (50×100 мкм²) и на мезоскопической части (4×12 мкм²) имеет примерно одинаковую характерную величину, что свидетельствует об отсутствии влияния мезоскопических явлений на наблюдаемый эффект. Также было обнаружено понижение величины СВЧ-фотосопротивления с ростом температуры и линейное повышение с ростом мощности подводимого излучения.

Предполагается, что данные эффекты наблюдаются ввиду нерегулярности разогрева сетки топологических одномерных токовых состояний.

1. Mahmoodian M. M., Entin M. V. Conductivity of a two-dimensional HgTe layer near the critical width: The role of developed edge states network and random mixture of p- and n-domains // Phys. Rev. B. 2020. Vol. 101. P. 125415.
2. Gusev G. M. et al. Transport through the network of topological channels in HgTe based quantum well // 2D Mater. 2022. Vol. 9. P. 015021.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. С. Ярошевич

УДК 538.9

Двумерный топологический андерсоновский изолятор в режиме квазибаллистического транспорта

Д. А. Курмачев

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

В физике конденсированного состояния не так давно появился новый объект изучения — топологический изолятор (ТИ). Данный материал представляет собой диэлектрик в объеме, а на поверхности образуются токопроводящие состояния. Для создания двумерного ТИ используют квантовую яму на основе HgTe. Причина использования HgTe заключается в инверсионной зонной структуре. Из-за нее возможны краевые состояния, проводящие ток. Также размер квантовой ямы определяет свойства структуры. При толщине около 8 нм квантовая яма будет представлять собой двумерный ТИ [1].

Однако при толщине около 14 нм также можно получить ТИ. Это возможно из-за андерсоновской локализации в объеме. Из-за нее электроны, находящиеся в объеме, не участвуют в переносе заряда. Таким образом, основной вклад в проводимость дают краевые состояния. Ранее было подтверждено наличие краевых состояний при макроскопических масштабах [2]. Исследования в мезоскопических масштабах не проводились.

Цель работы — исследовать свойства двумерного топологического андерсоновского изолятора на мезоскопических масштабах. Для этого были изготовлены образцы микронных размеров, т. е. на два порядка меньших ранее исследованных.

Результаты измерений локального и нелокального сопротивления показали, что краевой транспорт в образце мезоскопического масштаба существует. Измеренные сопротивления оказались в несколько раз больше кванта сопротивления. Это указывает на квазибаллистический характер движения носителей заряда.

Для анализа результатов локального и нелокального сопротивления использовалось предположение об отсутствии объемной проводимости. Оценки показали, что использование только теории о краевых состояниях недостаточно для описания свойств двумерного топологического андерсоновского изолятора в квазибаллистическом режиме на мезоскопических масштабах.

1. Квон З. Д. и др. Топологические изоляторы на основе HgTe // Успехи физ. наук. 2020. Т. 190, № 7. С. 673–692.
2. Рыжков М. С. и др. Краевой и объемный транспорт в двумерном топологическом изоляторе на основе квантовой ямы CdHgTe // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2022. Т. 115, № 4. С. 230–235.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН З. Д. Квон

Структурные и люминесцентные свойства островков GaN, выращенных методом капельной эпитаксии на аморфном и графеноподобном слоях SiN

Я. Е. Майдэбура

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Квантовые точки (КТ) GaN за счет яркого проявления квантово-размерных эффектов привлекают значительное внимание со стороны фундаментальной и прикладной наук. КТ GaN перспективны для создания светодиодов, однофотонных излучателей, солнечных элементов и одноэлектронных транзисторов. Наиболее подходящим способом для формирования КТ является метод капельной эпитаксии (КЭ), который заключается в нанесении и обработке металлических капель в потоке газа или плазмы. Однако при росте КТ GaN методом КЭ на традиционных поверхностях (таких как AlGaIn, Si (111), Al₂O₃) КТ характеризуются широким распределением по размерам, низким кристаллическим качеством и сложностью с контролем параметров КТ. В данной работе мы исследовали формирование КТ GaN методом КЭ на поверхностях аморфного (a-SiN) и графеноподобного SiN (g-SiN).

Образцы выращивались на установке аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии SBE-32 Riber. На очищенной подложке Si(111) были сформированы тонкие слои g-SiN и a-SiN путем обработки подложки при разных ростовых условиях в потоке аммиака. После чего при температуре 600 °С наносились капли Ga, которые обрабатывались в течение 4,5 мин в потоке аммиака 250 sccm. *Ex situ* образцы были исследованы методами высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРПЭМ), микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) и атомно-силовой микроскопии.

В результате было обнаружено, что островки, сформированные на поверхности слоя a-SiN, обладают высокой плотностью ($3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$) и широким распределением по размерам ($\sigma = 23 \%$ при среднем латеральном размере около 30 нм). Напротив, островки GaN, сформированные на g-SiN, обладают низкой плотностью ($5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$) и узким распределением по размерам ($\sigma = 13 \%$ при среднем латеральном размере около 36 нм). Как следует из анализа ВРПЭМ изображений, при росте на a-SiN островки обладают структурой типа вюрцита, тогда как при росте на g-SiN — структурой типа цинковой обманки. Этот факт является необычным, учитывая одинаковые условия формирования островков GaN. В гелиевых спектрах микроФЛ островков, полученных на g-SiN, доминируют экситоны, связанные на донорах. Напротив, в спектрах микроФЛ островков, полученных на a-SiN, доминируют экситоны, сильно связанные на структурных дефектах.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук К. С. Журавлев

УДК 51-73: 519.245: 538.971

**Влияние ростовых условий на морфологию
планарных кремниевых нанопроволок
на поверхности Si(100) (Монте-Карло моделирование)**

С. В. Манцурова

Новосибирский государственный технический университет

Полупроводниковые планарные нанопроволоки (ПНП) представляют интерес из-за хорошей совместимости с развитой планарной технологией интегральных схем. Одним из методов синтеза Si НП является рост по механизму «пар — жидкость — кристалл» (ПЖК) с использованием золотых капель в качестве катализаторов роста. Необходимым условием для роста ПНП является наличие пассивации поверхности, которая приводит к увеличению смачиваемости поверхности кремния [1].

В данной работе исследуется ПЖК рост кремниевых ПНП на поверхности Si(100) с помощью моделирования методом Монте-Карло. Пассивация поверхности Si меняет контактный угол капли с подложкой и увеличивает связь НП с поверхностью, что приводит к росту ПНП. Рост НП происходит при пересыщении капли кремнием из внешнего потока. Исследовано влияние температуры и скорости осаждения Si на морфологию ПНП.

Проанализированы направления роста ПНП: в соответствии с кристаллографией подложки рост возможен либо в направлениях $\langle 011 \rangle$, либо в $\langle 001 \rangle$. Показано, что при высокой скорости осаждения кремния и (или) низкой температуре рост ПНП происходит в направлениях $\langle 011 \rangle$, которые задаются фасетками $\{111\}$, на границе раздела «капля — кристалл». При низкой скорости осаждения и (или) высокой температуре, когда кремния из внешнего потока недостаточно, капля восполняет требуемую для роста ПНП концентрацию Si за счет растворения подложки.

В процессе растворения подложки под каплей формируется ямка травления. В этом случае рост ПНП происходит в приповерхностном слое подложки, а направления роста задаются растворением фасеток, ограничивающих ямку травления под каплей. Показано, что направления роста $\langle 001 \rangle$ являются наиболее вероятными при растворении подложки. Продемонстрировано изменение направления роста ПНП в процессе осаждения кремния. Моделирование методом Монте-Карло позволило на атомарном уровне проанализировать причины изменения направления роста ПНП. Получена диаграмма в координатах температура — скорость осаждения Si, разделяющая области роста ПНП различной морфологии и направлений роста.

1. Dedyulin S. N., Fanchini G., Goncharova L. V. Reticular Growth of Silicon Ridges: Random Walk in Two Dimensions // Crystal Growth Design. 2014. Vol. 14, No. 3. P. 1193–1198.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Н. Л. Шварц

УДК 621.315.592

Моделирование сверхструктурных перестроек при гетероэпитаксии Ge на структурированных подложках Si

Е. С. Манько

Новосибирский государственный университет

Для электронных и оптических приборов нового поколения представляют интерес пространственно упорядоченные массивы квантовых точек (КТ). Эти массивы получают гетероэпитаксиальным ростом на структурированных подложках (подложках, на которых с помощью литографии создается рисунок в виде регулярно расположенных ямок). При выборе подходящего режима роста внутри ямок формируются КТ. Механизм роста в ямках недостаточно изучен. Он зависит, в частности, от сверхструктурных перестроек на стенках ямок, которые удобно изучать с помощью моделирования методом молекулярной динамики (МД).

В данной работе методом МД изучались сверхструктурные перестройки на стенках ямок на поверхности структурированных подложек Si(100). Рассматривались ямки с ориентацией (114) и (104), что отвечает соответственно начальной и завершающей стадиям роста смачивающего слоя Ge. Показано, что по механизму димеризации на стенках ямок образуются *H*-образные атомные конфигурации. Также моделировалось осаждение и адсорбция отдельных атомов Ge на стенки ямок. Обнаружено, что при этом происходит образование новых *H*-образных конфигураций. Данный процесс объясняет микроскопический механизм эпитаксиального роста, когда морфология поверхности воспроизводится при осаждении каждого нового моноатомного слоя Ge.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. Л. Новиков

УДК 538.9

**Диффузия и проводимость двумерного газа
невзаимодействующих электронов в системе примесей
в присутствии сильного магнитного поля**

М. М. Махмудиан

Новосибирский государственный университет

Изучается диффузия и проводимость двумерной электрон-примесной системы в предположении отталкивающего взаимодействия между электронами и примесями в сильном магнитном поле. Предполагается, что потенциал примесей имеет вид $V_0(1 - \tanh((r - a)/\eta))$. Проведено моделирование движения электронов в такой системе.

Показано, что при достаточно малой концентрации примесей существуют круговые траектории, не касающиеся примесей. Другой тип траекторий, которые сталкиваются с примесями, состоит из розеток вокруг одной или нескольких примесей. При уменьшении магнитного поля число примесей, входящих в розетки, увеличивается. Найден порог перколяции, когда впервые возникают инфинитные траектории. С помощью моделирования найдено поведение коэффициента диффузии в данном предположении.

Также были проведены расчеты в другой модели, когда движение электронов можно рассмотреть как дрейф циклотронных центров — адиабатическое приближение. Показано, что при слабом магнитном поле это движение переходит в диффузионное. В работе приводится сравнение точного решения уравнений движений электронов с адиабатическим решением. Найден порог перехода между двумя режимами. С помощью моделирования найдено поведение коэффициента диффузии в окрестности порога.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук М. В. Энтин

УДК 538.9

Электронная структура поверхности легированных индием пленок (111) $(\text{Pb},\text{Sn})\text{Te}/\text{BaF}_2$ вблизи точки инверсии зон

А. С. Микаева

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

При увеличении содержания олова в составе твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ширина запрещенной зоны уменьшается от 0,3 эВ ($x = 0$) до 0 эВ ($x \sim 0,35$, $T = 4,2$ К). Сильное спин-орбитальное взаимодействие приводит к инверсии зон и переходу в состояние топологического кристаллического изолятора (ТКИ) при $x > 0,35$. Поверхностные состояния (ПС) ТКИ обладают дираковским законом дисперсии, геликоидальной спиновой структурой и защищены от рассеяния назад симметрией отражения. При этом наличие центра инверсии в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ может приводить к довольно большим временам рассеяния спина, что делает данный материал интересным для изучения спин-зависимых явлений. Легирование индием позволяет в некоторых пределах управлять концентрацией объемных носителей заряда в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$. Однако экспериментально электронная структура реальных поверхностей (111) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ изучена слабо. Цель данной работы — изучить особенности электронной структуры поверхности легированных In эпитаксиальных пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ с составами вблизи точки инверсии зон в зависимости от содержания индия, температуры и состава x .

В работе методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением изучена электронная структура нереконструированной поверхности (1×1) эпитаксиальных пленок (111) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}/\text{BaF}_2$ в диапазоне $x \sim 0,16-0,5$ при температурах от 77 до 300 К. Выделен вклад состояний объемной валентной зоны и ПС ТКИ. При температуре 77 К появление топологических ПС происходит при переходе от $x = 0,16$ к $x = 0,19$. Обнаружено, что отжиг пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ приводит к диффузии индия на поверхность и формированию тонкого (~ 1 нм) слоя более широкозонного гексагонального In_2Te_2 , сопровождающегося появлением реконструкции (7×7) . При этом в дисперсии состояний валентной зоны $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ наблюдаются дополнительные состояния, соответствующие In_2Te_2 . Кроме того, подтверждена возможность получения тонких ТКИ слоев на поверхности диэлектрических пленок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ путем осаждения и диффузии в объем избыточного олова. В магнитосопротивлении таких структур при $T = 4,2$ К наблюдается эффект слабой антилокализации, который указывает на значительный вклад от поверхностных состояний в проводимость структур, и подтверждает переход в фазу ТКИ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Голяшов

УДК 53.096, 539.232, 538.911

Резистивные переключения в микроструктурах на основе диоксида ванадия с фазовым переходом «полупроводник – металл»

Д. М. Милюшин

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Диоксид ванадия (VO_2) является функциональным материалом со сверхбыстрым фазовым переходом «полупроводник – металл» при температуре 68°C . При таком переходе происходит резкое изменение проводимости до 5 порядков. Это свойство делает VO_2 перспективным для создания резистивных переключателей для нейроморфных систем [1]. Известно, что электрически инициированные переключения в VO_2 хорошо описываются джоулевым нагревом [2]. Актуальной задачей является повышение энергоэффективности при электрических переключениях за счет уменьшения рассеяния тепла вне области переключателя.

В данной работе рассматриваются резистивные переключатели на основе поликристаллических пленок VO_2 . Пленки VO_2 получены методом химического осаждения из газовой фазы на подложках кремния с изолирующим слоем диоксида кремния. С помощью фотолитографии и последующего плазмохимического травления сформированы мезоструктуры для двухконтактных планарных переключателей с шириной контактов от 1 до 70 микрон. Расстояние между контактами составляло 4 мкм. В таких мезоструктурах, по сравнению с переключателями на сплошных пленках VO_2 , протекание тока происходит строго между сформированными литографическими контактами, а также уменьшен отвод тепла. При ширине контактов более 30 мкм зависимость порогового напряжения от внешней температуры слабо отличается для двух типов структур (сплошная пленка и мезоструктура), а при ширине контактов 10 мкм отличие становится существенным. Так, величина порогового напряжения, при котором происходит фазовый переход при ширине контактов 10 мкм отличается почти в 2 раза. Разработана качественная модель формирования токопроводящего канала, объясняющая зависимость полученных параметров резистивных переключений от ширины контакта для двух типов структур.

Полученные результаты будут иметь перспективу для развития сверхбыстрых и энергоэффективных коммутационных устройств для оптических и электрических систем.

1. Y. Ke et al. // Small. 2018. Vol. 14, № 39. P. 1–29.
2. Yoon J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105, № 8. P. 083503.

Научный руководитель — К. Е. Капогузов

Моделирование электромагнитного отклика цилиндрических нанорезонаторов ИК-диапазона на основе кремния и диоксида ванадия

Н. А. Миронов

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Диоксид ванадия является перспективным материалом для создания устройств динамического сверхбыстрого управления электромагнитным излучением благодаря наличию фазового перехода «полупроводник — металл» [1]. Известно, что оптический отклик можно усилить при помощи метаматериальных систем, представляющих собой искусственные структурированные среды (как правило, резонансные) [2]. Электромагнитные системы, состоящие из металлических и диэлектрических частиц, перспективны для управления оптическим излучением благодаря большому числу резонансных эффектов. Цель данной работы — исследовать электромагнитный отклик в гибридных структурах на основе дисков диоксида ванадия и кремниевых цилиндров.

При помощи численного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics с использованием модуля Wave Optics были исследованы эффекты рассеяния плоской электромагнитной волны на наночастице диоксида ванадия, расположенной на вершине кремниевого наноцилиндра. В работе были рассчитаны спектры сечения рассеяния и поглощения гибридных наночастиц в инфракрасном диапазоне. Установлено, что особенности в спектре обусловлены резонансами Ми в кремниевых наноцилиндрах, а также плазмонными резонансами, характерными для диоксида ванадия в металлическом состоянии (длина волны примерно 2 мкм).

Показано, что периодические массивы гибридных наночастиц, расположенных на кремниевой подложке по сравнению с уединенными наночастицами, отличаются сдвигом спектральных особенностей в область больших длин волн. В гибридных структурах наблюдаются резонансные особенности, связанные с гибридными колебаниями, которые приводят к резкому увеличению коэффициента отражения при переходе диоксида ванадия из полупроводникового в металлическое состояние. Полученные результаты полезны для разработки модуляторов ближнего инфракрасного диапазона.

1. Mayer B. et al. Tunneling breakdown of a strongly correlated insulating state in VO_2 induced by intense multiterahertz excitation // Phys. Rev. B. 2015. Vol. 91, No. 23. P. 235113.
2. Nematı A. et al. Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices // Opto-Electron. Adv. 2018. Vol. 1, No. 5. P. 180009.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Е. Гайдук

УДК 538.9

**Вклад фотонного переноса в транспорт электронов
в p-GaAs-фотокатоде**

С.С. Михеев

Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Работа посвящена исследованию влияния фотонного переноса на транспорт электронов в p-GaAs-фотокатоде. Во время движения в активном слое p-GaAs часть электронов рекомбинирует с дырками с излучением фотона, который может повторно вызвать рождение электронно-дырочной пары. Тем самым происходит фотонный перенос (ФП) неравновесных носителей заряда. Влияние ФП на параметры полупроводниковых приборов было впервые рассмотрено Думке в 1957 г. [1] Для изучения вклада ФП в транспорт электронов мы использовали вакуумно-полупроводниковый фотодиод, фотокатод которого содержал области с одним слоем GaAs и двумя слоями GaAs, разделенными AlGaAs-слоем, причем второй слой GaAs имел границу с вакуумом. При освещении фотокатода со стороны первого GaAs-слоя и полном поглощении света в нем фотоэлектроны могут перейти во второй GaAs-слой и выйти в вакуум только при участии ФП, так как слой AlGaAs является энергетическим барьером.

Однородность эмиссионных свойств в разных областях фотокатода, имевшего уровень легирования $7,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, была подтверждена идентичностью формы энергетических распределений эмитированных электронов. Измерены спектры квантовой эффективности фотокатода в областях, соответствующих одному и двум слоям GaAs, в диапазоне температур 80–300 К. Методом Монте-Карло был промоделирован транспорт электронов в фотокатоде и с помощью отношения квантовых эффективностей в областях с одним и двумя слоями GaAs при комнатной температуре определена величина внутренней квантовой эффективности фотолюминесценции η , оказавшаяся равной $0,9 \pm 0,01$. На основе полученного значения η была рассчитана зависимость вклада фотонного переноса в транспорт электронов к эмитирующей поверхности от толщины GaAs активного слоя.

1. Dumke W. P. // Phys. Rev. 1957. Vol. 105, No. 1. P. 139.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Г.Э. Шайблер

УДК 538.9

Перенос энергии между орторомбической и тетрагональной фазами и их сосуществование в монокристалле MAPbI_3

А. О. Мурзин, В. О. Гриценко

Санкт-Петербургский государственный университет

Галогенидные перовскиты имеют значительные перспективы в области светоизлучающих устройств за счет своей высокой эффективности фотолюминесценции и перестраиваемой ширины запрещенной зоны во всем видимом диапазоне. Структурные фазовые переходы в них часто значительно меняют оптические свойства материала. Это может стать как препятствием, так и методом функционализации материала, что и обуславливает потребность в их изучении. В данной работе исследовались оптические свойства монокристалла галогенидного перовскита MAPbI_3 ($\text{MA} = \text{CH}_3\text{NH}_3^+$) во время фазового перехода между тетрагональной и орторомбической фазами.

Температурная зависимость энергетического положения резонанса спектров отражения показала резкий фазовый переход между орторомбической и тетрагональной фазами в узком диапазоне температур ($\Delta T \sim 5$ К) около температуры фазового перехода $T_{\text{ph}} \approx 162$ К. Данное поведение соответствует результатам температурозависимых исследований дифракции рентгеновского излучения и нейтронов [1] на монокристаллах MAPbI_3 , а также свидетельствует о малом объеме включений тетрагональной фазы в объеме кристалла при $T < T_{\text{ph}}$. Но температурная зависимость спектров фотолюминесценции демонстрировала наличие двух пиков, энергетические положения которых соответствуют энергиям рекомбинации связанных экситонов в орторомбической и тетрагональной фазе в широком температурном диапазоне (120–162 К). Возможное объяснение — присутствие одностороннего канала передачи энергии из объемной орторомбической фазы в малообъемные включения тетрагональной фазы с меньшей шириной запрещенной зоны. Данное заключение нашло подтверждение в экспериментах с использованием методики спектроскопии возбуждения фотолюминесценции, проведенных в данной работе.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (мегагрант № 075-15-2022-1112) на оборудовании ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника».

1. Whitfield P. S. et al. Structures, Phase Transitions and Tricritical Behavior of the Hybrid Perovskite Methyl Ammonium Lead Iodide // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. P. 35685.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. В. Капитонов

УДК 538.945

Электрон-фононное взаимодействие в MgB_2

Г. Р. Павлов

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск

Широкий интерес к недавно открытому сверхпроводнику MgB_2 вызван сочетанием в нем неожиданно высокой $T_c = 39\text{K}$ с изотропным характером электронных свойств, с отсутствием проблем с межгранулярными контактами, с высокими критическими транспортными токами. Как показали исследования изотопического эффекта [1], эксперименты по туннельной [2], фотоэлектронной [3], колебательной спектроскопии, а также расчеты зонной структуры и фононного спектра, сверхпроводимость MgB_2 обусловлена за счет сильного электрон-фононного взаимодействия. Несмотря на то что температура сверхпроводящего перехода небольшая, перспективы практического применения MgB_2 казались более многообещающими.

В настоящей работе на основе теории функционала плотности произведен расчет электрон-фононного взаимодействия MgB_2 . Определена спектральная функция Элиашберга. Спектральная функция Элиашберга представляет собой сумму вкладов от процессов рассеяния, в которых электроны рассеиваются на фононах на поверхности Ферми. Она является важным параметром для определения критической температуры сверхпроводников. Оценена температура сверхпроводящего перехода для MgB_2 .

1. Bud'ko S. L., Lapertot G., Petrovic C. et al. Superconductivity in dense MgB_2 wires // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, No. 11. P. 2423.
2. Sharoni A., Felner I., Millo O. Tunneling spectroscopy and magnetization measurements of the superconducting properties of MgB_2 // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63, No. 22. P. 220508.
3. Takahashi T., Sato T., Souma S., Muranako T., Akimitsu J. High-resolution photoemission study of MgB_2 // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, No. 21. P. 4915.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Е. П. Шарин

УДК 539.2

Намагниченность кластеров железа

Т. Д. Перевалов¹, Л. Н. Измайлов¹, А. К. Кузнецова²

¹Восточно-Казахстанский технический университет
им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

²Томский государственный университет

Экспериментальные исследования показали, что ферромагнитные свойства железа разнятся для кластеров разных размеров. Согласно [1], для кластеров железа, содержащих приблизительно 150 атомов, намагниченность равна 4 магнетона Бора на атом. Намагниченность массивного железа соответствует 2,2 магнетона Бора и наблюдается для кластеров, где количество атомов превышает 500.

Наша задача — выяснить характер изменения намагниченности кластеров железа в зависимости от количества атомов, содержащихся в кластерах. Для этого использовали метод построения плотности состояний спин-поляризованных электронов в зависимости от их энергии [2].

Для построения спектров спин-поляризованных электронных состояний выбирали октаэдрические кластеры для объемно-центрированной (ОЦК) и гранецентрированной (ГЦК) решеток железа. Кристаллическая решетка ОЦК железа является ферромагнитной. Наименьшим кластером ОЦК-решетки является кластер, содержащий 6 неравнодистантных атомов, в отличие от ГЦК-решетки, где все атомы равнодистантны. Построены спектры плотности электронных состояний для двух типов октаэдров железа с использованием авторских программ.

1. Billas I. M. L., Chatelain A., Walt A. H. Magnetism from the Atom to the Bulk in Iron, Cobalt, and Nickel Clusters // Sci. 1994. Vol. 265. 5179.
2. Нявро А. В. Эволюция электронных состояний: атом — молекула — кластер — кристалл. Томск: Том. гос. ун-т, 2013. 268 с.

Научный руководитель — д-р филос. наук, доц. Г. С. Бектасова

УДК 535.376; 535.215

**Особенности фотолюминесценции эпитаксиальных пленок
твердых растворов $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$,
выращенных на Si- и GaP-подложках**

У.Х. Рахмонов

Физико-технический институт
НПО «Физика – Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан

В работе представлены результаты исследований фотолюминесценции твердого раствора $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$, выращенного методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема оловянного раствора-расплава, состоящего из Sn, Si, ZnSe и GaP в атмосфере очищенного водорода по технологии, описанной в [1]. В качестве подложек использовались монокристаллические Si(111)- и GaP(111)-пластины толщиной 300 мкм и диаметром 20 мм. Пленки $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$, выращенные как на Si(111)-, так и на GaP(111)-подложках, имели проводимость *n*-типа. Состав пленки $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$ исследовался на рентгеновском микроанализаторе Jeol JSM 5910 LV Japan. Результаты исследований показали, что между подложкой и эпитаксиальной пленкой находится тонкий варизонный слой с переменным составом, начинающимся с GaP у подложки, который затем постепенно сменяется кремнием, а в конце (на поверхности пленки) заканчивается ZnSe.

Сняты спектры фотолюминесценции пленок TP $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$. Возбуждение фотолюминесценции производилось лазерным излучением со стороны эпитаксиального слоя при температуре жидкого азота (77 К). Спектр фотолюминесценции охватывает почти весь видимый диапазон спектра солнечного излучения, начиная от 370 до 790 нм с максимумом излучения при длинах волн $\lambda_{\text{max}} = 429$ нм и $\lambda_{\text{max}} = 449$ нм, соответствующих энергии фотонов $E_{\text{ph}} = 2,88$ эВ и $E_{\text{ph}} = 2,75$ эВ соответственно. Интересным результатом является возникновение пиков излучения с небольшими интенсивностями при энергиях фотонов $E_{\text{ph}} = 1,8$ эВ ($\lambda = 689$ нм) и $E_{\text{ph}} = 1,62$ эВ ($\lambda = 0,765$ нм), которые, по-видимому, обусловлены ковалентными связями Si-Si и Ga-P находящихся в узлах тетраэдрических связей TP $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$ соответственно.

1. Saidov A. S., Usmonov Sh. N., Rakhmonov U. Kh. et al. Multicomponent Solid Solutions $(\text{ZnSe})_{1-x-y}(\text{Si}_2)_x(\text{GaP})_y$ // J. Mater. Sci. Res. 2012. Vol. 1, No. 2. P. 150–156.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Саидов

Эффект Гуржи в подвешенных GaAs точечных контактах

Д. И. Сарыпов

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Электрон-электронное ($e-e$) взаимодействие существенно влияет на электронный транспорт в микро- и наноструктурах. При этом связанные с ним эффекты, в силу их многочастичности, сложны для описания. Гидродинамический подход позволяет упростить описание при рассмотрении электронов как вязкой жидкости [1]. В традиционных транспортных измерениях $e-e$ -взаимодействие не проявляет себя, так как не изменяет общий импульс электронной подсистемы. Однако оно становится заметным, например, в баллистических проводниках, ширина которых сравнима с длиной $e-e$ -рассеяния l_{ee} . В этом случае $e-e$ -взаимодействие уменьшает скорость передачи импульса от электронной подсистемы к шероховатым стенкам канала, что приводит к необычному уменьшению сопротивления образца, которое получило название эффекта Гуржи [2].

Настоящая работа нацелена на изучение эффекта Гуржи в баллистических наноструктурах на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs при контролируемом изменении длины l_{ee} за счет изменения температуры образцов и их подвешивания, т. е. отрыва от подложки с высокой диэлектрической проницаемостью [3].

В работе экспериментально изучены особенности температурной зависимости сопротивления подвешенных точечных контактов (ТК), возникающие при изменении отношения длины $e-e$ -рассеяния к их ширине. ТК представляют собой сужения длиной 0,4 мкм и шириной в диапазоне от 0,7 до 1,5 мкм. В температурной зависимости сопротивления ТК наблюдается эффект Гуржи. Проведенное исследование позволило изучить характер температурной зависимости длины $e-e$ -рассеяния, а также вязкого вклада в сопротивление исследуемых структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-12-00343).

1. Gurzhi R. N. Hydrodynamic effects in solids at low temperature // Soviet Phys. Uspekhi. 1968. Vol. 11, No. 2. P. 255.
2. Gurzhi R. N. Minimum of resistance in impurity-free conductors // Sov. Phys. JETP. 1962. Vol. 44. P. 771–772.
3. Pogosov A. G., Shevyrin A. A., Pokhabov D. A., Zhdanov E. Y., Kumar S. Suspended semiconductor nanostructures: physics and technology // J. Phys.: Cond. Matter. 2022. Vol. 34, No. 26. P. 263001.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Похабов

УДК 537.622.4

Исследование бислойных пленок с решеткой антиточек методом компьютерного моделирования

С. С. Симакова

Омский государственный технический университет

Решетка антиточек в ферромагнитной пленке представляет собой множество пор фиксированного размера и формы, образующих периодическую структуру [1, 2]. Как правило, антиточки организованы в квадратную или гексагональную решетку. Основное свойство таких пленок состоит в том, что, изменяя размеры и взаимное расположение антиточек, можно регулировать магнитные свойства системы. В связи с этим ферромагнитные пленки с решетками антиточек рассматриваются как перспективные материалы для устройств спинтроники [3, 4].

В работе рассматриваются бислойные ферромагнитные пленки с решеткой антиточек. Моделирование системы выполнено с помощью метода Монте-Карло на основе алгоритма Метрополиса.

Исследуемая система представляет собой две ферромагнитные пленки с толщинами D_1 и D_2 моноатомных слоев. Пленки выполнены из материалов с различной магнитной восприимчивостью. Решетка антиточек имеет квадратную структуру с периодом d . Рассматриваются поры квадратной формы со стороной $a = d/2$.

Магнитное поведение пленок описывается моделью Изинга. Пленки имеют разные значения обменного интеграла J_1 и J_2 ($J_1 > J_2$). Для определения температур фазовых переходов используется теория конечно-размерного скейлинга. Моделируются системы с линейным размером от 32 до 96 с шагом 16. Вдоль осей OX и OY применяются периодические граничные условия.

Получена зависимость температур фазовых переходов обеих пленок при различных значениях отношений обменных интегралов, размер пор и периода решетки антиточек. Исследовано влияние магнитотвердой составляющей бислойной пленки на магнитомягкую составляющую при различных параметрах решетки антиточек.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00108).

1. Martyanov O. N. et al. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. P. 174429.
2. Vázquez M. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2008. Vol. 320. P. 1978.
3. Moore L. S., Goldhaber-Gordon D. // Nature Phys. 2007. Vol. 3. P. 295.
4. Seeman K., Leiste H., Ziebert C. // J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 316. e879.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Тихомиров

УДК 538.9

Гальваномеханические эффекты в тригональных дираковских монослойных материалах

А. В. Снегирев

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) — перспективный класс соединений, который привлек большое внимание исследователей во многом благодаря своим уникальным оптическим и транспортным свойствам. Оптическое возбуждение этих соединений циркулярно-поляризованным светом может приводить к неравновесному заселению долин.

Данная работа посвящена теоретическому описанию транспортных свойств монослоев ДПМ, подвергнутых слабой однородной деформации и облучению циркулярно-поляризованным светом. В работе показано, что в первом порядке малости по деформации электрический ток возникает благодаря междолинному рассеянию электронов.

В первой части работы рассматривается образец ДПМ p -типа (случай n -типа рассматривается аналогичным образом) при нулевой температуре, с уровнем Ферми, находящимся внутри валентной зоны. Показано, что ФГЭ тока линейно зависит от частоты облучающего света.

Во второй части работы рассмотрен образец ДПМ с уровнем Ферми, лежащем внутри запрещенной зоны. В этом случае при межзонном фотовозбуждении неравновесных носителей концентрации неравновесных электронов и дырок сравнимы и теория ФГЭ тока строится в рамках нелинейной теории рекомбинации и итерационным образом по анизотропной части вероятности междолинного рассеяния, обусловленной однородной деформацией образца. Также для обоих случаев было проанализировано поведение системы при облучении светом большой интенсивности.

Полученные эффекты имеют долинный характер и чувствительны к поляризации облучающего излучения. Результаты данной работы будут полезны для лучшего понимания физики деформируемых двумерных материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. М. Ковалев

УДК 538.9

Кристаллическая структура тонких пленок Bi/InAs(111)A

Н. Ю. Соловова

Новосибирский государственный университет

В теоретических работах было предсказано, что бислои висмута, а также тонкие пленки Bi(111) являются элементными двумерными топологическими изоляторами. Однако на электронную и кристаллическую структуру тонких пленок значительно влияет материал подложки. В данной работе в качестве подложки была выбрана поверхность n-InAs(111)A. На поверхности n-InAs(111)A наблюдается изгиб зон вниз, что приводит к формированию состояний двумерного электронного газа. Влияние спин-орбитального взаимодействия атомов висмута на состояния двумерного электронного газа InAs интересно для спинтроники.

Цель работы — изучить влияние условий роста тонких пленок Bi/InAs(111)A на их кристаллическую и электронную структуру. Bi осаждался на подложку InAs(111)A-(2 × 2) из ячейки Кнудсена при комнатной и высокой (~ 300 °C) температуре. Электронная структура изучалась с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Для изучения кристаллической структуры пленок применялась рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, дифракция медленных электронов (ДМЭ) и рентгеновская фотоэлектронная дифракция (РФД).

При высокой температуре подложки (~ 300 °C) рост пленки ограничен толщиной ~ 4 Å. Данные сканирующей туннельной микроскопии и ДМЭ указывают на образование димеров висмута, формирующих на поверхности InAs(111)A реконструкцию ($2\sqrt{3} \times 3$). Электронная структура включает как состояния двумерного электронного газа InAs, так и новые состояния пленки Bi, и обладает полупроводниковым характером с шириной запрещенной зоны ~ 150 мэВ.

При комнатной температуре на начальных этапах роста (до ~ 8 Å) происходит формирование сложного переходного слоя InAs/InAs_{1-x}Bi_x/Bi(111). Кристаллическая структура границы раздела изучалась с помощью РФД. Электронная структура на данном этапе роста близка к электронной структуре InAs(111)A. Однако наблюдается уменьшение ширины запрещенной зоны и увеличение эффективной массы дырок. При дальнейшем увеличении толщины электронная структура пленки приближается к электронной структуре поверхности кристалла Bi(111). Однако в картине ДМЭ наблюдаются рефлекссы, указывающие на формирование фазы с прямоугольной элементарной ячейкой, что может быть связано с формированием доменов со структурой Bi(110) или двумерной фазы α-Bi.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Голяшов

УДК 538.9

Исследование влияния отжига на электрофизические параметры границы раздела CdHgTe-HfO₂

И. С. Стуколов

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Твердый раствор кадмий-ртуть-теллур ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, КРТ) — полупроводниковый материал, широко используемый для производства фотоприемных устройств ИК-диапазона. Поверхность полупроводникового слоя, чувствительная к внешним воздействиям, оказывает существенное влияние на характеристики конечного прибора. Одним из способов пассивации и защиты поверхности является ее химическая очистка и последующее нанесение диэлектрического покрытия, например HfO_2 . Одним из технологически неизбежных типов воздействия при изготовлении приборов на КРТ является нагрев до температур свыше 100 °С. Такой нагрев может приводить как к модификации границы раздела «диэлектрик — полупроводник», так и к ухудшению ее электрофизических параметров. Цель работы — определить влияние параметров отжига на электрофизические характеристики границы раздела CdHgTe-HfO_2 .

Для исследования использовались МДП-структуры, изготовленные на эпитаксиальной пленке $n\text{-Cd}_{0,22}\text{Hg}_{0,78}\text{Te}$. Диэлектрик — 20 нм HfO_2 — был нанесен методом атомно-слоевого осаждения (АСО), а металлические контакты — термическим испарением. Изучаемые структуры различались обработкой поверхности КРТ, предшествующей осаждению диэлектрика: реперный образец не подвергался химической очистке и обработке, один образец был очищен в NH_4OH и еще один после химической очистки окислили в удаленной плазме ВЧ-разряда непосредственно в установке АСО. Структуры последовательно отжигали в формовочном газе (95 % N_2 , 5 % H_2) сначала при температуре 120 °С (1 ч), а затем при 200 °С, увеличивая продолжительность отжига.

Измерения вольт-фарадных характеристик проводились при температуре жидкого азота с циклической разверткой напряжения от 0,5 до –6 В и обратно. Зависимости обладают характерным низкочастотным видом и гистерезисом, обусловленным влиянием медленных состояний. Установлено, что отжиг при 120 °С не оказывает существенного влияния на параметры МДП-структур, в то время как повышение температуры приводит к изменению как встроенного заряда диэлектрика, так и плотности медленных состояний.

Показано, что отжиг может быть использован для повышения качества границы раздела CdHgTe-HfO_2 в приборных структурах.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук Г. Ю. Сидоров, И. А. Краснова

УДК 538.9

**Исследование поверхности структур
(Bi_{1-x}Sb_x)₂(Te_{1-y}Se_y)₃/Bi₂Te₃/Si(111) и (Bi_{1-x}Sb_x)₂(Te_{1-y}Se_y)₃/Gr/SiC(111)
методом атомно-силовой микроскопии**

Ч. Фань, С. Цю

Новосибирский государственный университет

В последнее время из-за развития спинтроники возрос интерес к так называемым топологическим изоляторам (ТИ) — материалам, энергетический спектр объемных состояний которых имеет щель, а спектр поверхностных состояний линейен. Распространенными топологическими изоляторами являются Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ и Sb₂Te₃, однако такие бинарные ТИ материалы имеют естественные дефекты, например, в Bi₂Se₃ это вакансии Se и антисайты Se_{Bi}, присутствующие в Bi₂Se₃. Эти кристаллографические дефекты создают большое количество нежелательных электрически активных примесей, которые подавляют топологическую поверхностную проводимость ТИ. Для получения уменьшения объемной проводимости широко исследуется соединение (Bi_{1-x}Sb_x)₂(Te_{1-y}Se_y)₃ (BSTS), удельная проводимость которого зависит от состава. Объемная проводимость BSTS сильно подавлена из-за взаимной компенсации пары дефектов (Bi, Sb)/Te и вакантных дефектов Se, что позволяет поверхностному транспорту доминировать при низких температурах [1]. В нашей лаборатории исследуются эпитаксиальные пленки BSTS, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si (111) и Gr/SiC(111).

Цель работы — исследовать морфологию поверхности эпитаксиальных гетероструктур (Bi_{1-x}Sb_x)₂(Te_{1-y}Se_y)₃/Bi₂Te₃/Si(111) и (Bi_{1-x}Sb_x)₂(Te_{1-y}Se_y)₃/Gr/SiC(111) методом атомно-силовой микроскопии на приборе нанолaborатории Ntegra Prima. Обнаружено, что формирование пленок на подложке Gr/SiC происходит вдоль выделенных направлений, которые соответствуют рельефу поверхности карбида кремния. При этом латеральный размер пирамид на графене был порядка 1 мкм против 300 нм на кремнии. Форма пирамид имела вид шестигранников в отличие от треугольной огранки на кремнии, что указывает на лучшее качество пленок.

1. Wang W. et al. Intrinsic Topological Insulator Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{3-x}Se_x Thin Crystals // Sci. Reports. 2015. No. 5. P. 7931.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Ищенко

УДК 536.7, 537.6

**Изучение влияния содержания кислорода
на температурные зависимости коэффициента термоЭДС
в слоистом кобальтате $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$**

Д. И. Фролов

Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

В данной работе проводились исследования коэффициента термоЭДС в соединении $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ с различным содержанием кислорода. С помощью твердофазного синтеза были получены поликристаллические образцы. Значения x определялись весовым методом с точностью до $\sim 0,001$. Коэффициент термоЭДС измерялся с помощью дифференциального метода, когда к поверхности образца на электропроводящую пасту закреплялись две термопары, а к торцу подводился нагреватель, который создавал градиент температур между термопарами. Измерения выше комнатной температуры до $300\text{ }^\circ\text{C}$ проводились в печи, а ниже комнатной температуры — в транспортном сосуде Дьюара с жидким азотом.

Ранее нами было получено, что удельное электросопротивление $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ при значениях $x = 0 \div 0,51$ практически не изменяется, далее уменьшается при росте x [1]. В данной работе мы измерили температурные зависимости коэффициентов термоЭДС соединения $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ с различным содержанием кислорода $x = 0,015 \div 0,835$ в интервале температур $100\text{--}550\text{ K}$. Получено, что при комнатной температуре с увеличением содержания кислорода коэффициент термоЭДС уменьшается. Для расчета коэффициента термоЭДС в данной системе используется формула Хайкса:

$$\alpha = -\frac{k_B}{e} \ln \left(\frac{g_2}{g_3} \frac{N(\text{Co}^{3+})}{1 - N(\text{Co}^{3+})} \right), \text{ где } \alpha \text{ — коэффициент термоЭДС, } k_B \text{ — постоянная Больц-$$

мана, e — заряд электрона, g_2 и g_3 — параметры спин-орбитального вырождения Co^{2+} и Co^{3+} соответственно. $N(\text{Co}^{3+})$ — концентрация кобальта $3+$, рассчитанная из валентностей катионов и анионов. Из магнитных измерений $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ нами получено, что ион Co^{2+} находится только в высокоспиновом состоянии ($g_2 = 4$). Вычисляя параметр g_3 , мы получили, что при значении $x = 0,015$ ионы Co^{3+} находятся в низкоспиновом и промежуточном состояниях. При росте содержания кислорода начинает играть роль орбитального вырождения уровней иона, а при $x = 0,636$ в системе появляются высокоспиновые состояния Co^{3+} , что, скорее всего, объясняет поведение электросопротивления $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ в зависимости от x , изученное ранее в [1].

1. Фролов Д. И., Ткачев Е. Н., Кузнецов В. А. Особенности электронного транспорта в слоистом кобальтате $YBaCo_4O_{7+x}$ // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXIII Международ. науч.-практ. конф. студ. и молодых ученых. Томск: Изд-во ТПУ, 2022. Т. 2. С. 480–481.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Н. Ткачев

УДК 539.1

**Метод характеристики дефектности и структурной подвижности
в кристаллических гибридных, металл-органических
пористых координационных полимерах**

М. Е. Фролов

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Металл-органические каркасы (МОК) представляют собой класс кристаллических пористых координационных полимеров. МОК состоят из неорганических узлов, связанных органическими мостиковыми лигандами. Меняя химическое строение элементов данных структур, можно регулировать их физико-химические свойства. Интерес к МОК обусловлен их потенциальным применением в таких областях, как хранение газов, катализ, разделение углеводородных смесей.

В данной работе изучается МОК — $UiO-66(Zr)$. Данная структура обладает относительно высокой термической и химической стабильностью, а также имеет большую площадь удельной поверхности. $UiO-66(Zr)$ содержит металлические центры оксида циркония, соединенные между собой органическими линкерами, фрагментами терефталевой кислоты. Исследуемый в данной работе образец $UiO-66(Zr)$ синтезирован с дейтерированными линкерами ($-C_6D_4-$) и адсорбированным n -пентаном. Проводилось изучение зависимости скорости движения молекул при различных температурах (от 283 до 443 К). Метод исследования — ядерный магнитный резонанс (ЯМР) на ядрах дейтерия. Также применялись методы моделирования молекулярной динамики. Показано, что линкеры каркаса принимают участие в двух видах движения, а именно перевороты фенильного кольца на 180° (p -флипы) и либрации (вращательные колебания фенильного кольца).

Оказалось, что из-за наличия дефектов, нехватки $1/12$ части линкеров, константа скорости p -флипов характеризуется Log -нормальным распределением, что отражается на температурной эволюции формы линии 2H ЯМР-спектра. Удалось определить параметры движения в каждой исследуемой температуре, а также определить ширину распределения. Показано, что наличие n -бутана существенным образом влияет на ширину распределения, это, по-видимому, связано с координацией n -пентана с неорганическими узлами каркаса.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. И. Колоколов

УДК 538.9

Рост пленок $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_3$ на подложках Gr/SiC методом молекулярно-лучевой эпитаксии

С. Цю, Ч. Фань

Новосибирский государственный университет

$(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_3$ (BSTS) исследуют с середины 1960-х гг. Первоначально интерес к этому материалу был обусловлен его термоэлектрическими свойствами. Однако в последнее время повышенный интерес к BSTS обусловлен наличием в нем топологических состояний (ТС). Топологический изолятор — это материал, поверхностные состояния которого обладают линейным законом дисперсии, при этом в спектре объемных состояний присутствует щель. Наиболее перспективными материалами для исследования ТС являются соединения на основе висмута, например: Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 и их сплавы. Но объемная проводимость поверхностных состояний этих материалов слишком высока, что затрудняет эти исследования. Для решения этой проблемы можно уменьшить толщину пленки или изменить ее состав, например использовать BSTS. Получение тонких образцов большой площади из объемного материала является трудной задачей. Использование молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет получать тонкие пленки толщиной до 1 нм и контролировать состав. Работ, которые бы описывали рост пленок BSTS методом МЛЭ, не много [1, 2]. Возможно, это связано с трудностью получения таких пленок.

В нашей работе пленки BSTS были выращены методом МЛЭ. В качестве источников использовались элементные (Bi, Te), бинарные (Bi_2Te_3) и четверной (BSTS). Использовались подложки Si и Gr/SiC. Подложки Si проходили предварительную обработку методом RCA. Графен же отжигался в вакууме при температурах порядка 500–550 °C. После этого подложки охлаждались до температуры роста (320–370 °C для Si и 160–250 °C для Gr/SiC). Как было показано ранее, рост на подложках Si проводится с использованием буферного слоя Bi_2Te_3 . Рост BSTS на графене — без буферного слоя. Скорость роста варьировалась от 0,17 до 0,5 нм/мин. Цель работы — разработать параметры роста эпитаксиальных пленок BSTS на подложках Gr/SiC и исследовать их электрофизические характеристики в зависимости от условий роста.

1. Mayer T. et al. Transport properties of band engineered p-n heterostructures of epitaxial $\text{Bi}_2\text{Se}_3/(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2(\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y)_3$ topological insulators // Phys. Rev. Mat. 2021. Vol. 5, No. 1. P. 014202.
2. Stepina N. P. Epitaxial Growth of the $\text{Bi}_y\text{Sb}_{2-y}\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 3D Topological Insulator: Physical Vapor Deposition and Molecular Beam Epitaxy // Cryst. Growth Design. 2022. Vol. 22 (12). P. 7255–7263.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. В. Ищенко

УДК 53.096

Термическая стабильность пленок кремния на изоляторе нанометровой толщины

Чэнь Дунци

Новосибирский государственный университет

Современные тенденции развития электроники требуют создания структур со слоями кремния и диэлектрика толщиной в несколько нанометров. Использование структур со слоями нанометровой толщины в кремниевой технологии может быть осложнено снижением их термической стабильности. Цель данной работы — установить условия термической стабильности пленок кремний на изоляторе (КНИ) нанометровой толщины при высокотемпературном отжиге в печи при нормальном атмосферном давлении.

В наших экспериментах КНИ-структуры были изготовлены с использованием технологии DeleCut. Затем в результате многоступенчатого термического окисления пленки КНИ были доведены до толщин d_{Si} 6,7 и 8,3 нм. Последующий отжиг образцов проводили в потоке паров N_2 в печи при температурах $T = 800\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$, 15 мин. Исследования толщины и состава пленок проводились с помощью спектральной эллипсометрии.

На основе полученных результатов и литературных данных установлено, что для пленок с толщиной от 4,7 до 8,3 нм зависимость d_{Si} от T имеет одинаковый характер: толщина пленки практически неизменна вплоть до $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$, а при T выше $800\text{ }^\circ\text{C}$ уменьшается. При этом уменьшение толщины пленок Si соответствует увеличению толщины захороненного слоя SiO_2 , а на поверхности пленки окисел практически не растет. Пленки с $d_{\text{Si}} = 2,2$ нм практически не окисляются вплоть до $T = 900\text{ }^\circ\text{C}$, а затем процесс окисления происходит быстрее, чем для пленок с $d_{\text{Si}} = 4,7\text{--}8,3$ нм.

Установлено, что с ростом температуры отжига увеличивается доля аморфной фазы в пленках КНИ. Скорость роста доли аморфной фазы увеличивается с уменьшением начальной толщины пленки. На основе полученных результатов проведены расчеты энергии активации роста доли аморфной фазы и сделаны выводы о механизме аморфизации пленок КНИ нанометровой толщины при высокотемпературном отжиге. Показано, что основным механизмом аморфизации пленок является генерация междоузельных атомов кремния в пленке КНИ, которые формируются в процессе внутреннего окисления пленки за счет диффузии молекул O_2 через нанометровую пленку КНИ в SiO_2 , их диссоциации вблизи границы раздела и образования Si-O-связей на границе Si/SiO₂.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. И. Е. Тыщенко

Расчет энергии образования точечных дефектов в гексагональном нитриде бора

И. И. Янибеков

Санкт-Петербургский государственный университет

Исследование сверхширокозонных полупроводников весьма актуально, поскольку большая по сравнению с классическими полупроводниками ширина запрещенной зоны делает их идеальными кандидатами для применения в силовой электронике, создании высокочастотных устройств, а также однофотонных источников для квантовой криптографии.

Одним из материалов, точечные дефекты в котором могут претендовать на роль однофотонного источника, является гексагональный нитрид бора (h-BN). Одним из центров однофотонной люминесценции в h-BN может являться дефект, который представляет собой комплекс из вакансии азота и антиструктурного дефекта — азот в позиции бора ($N_B V_N$). Предполагается, что данный дефект может быть создан при облучении образца ионами гелия и электронами [1]. Цель данной работы — изучить, насколько данный дефект в различных зарядовых состояниях энергетически более выгоден в сравнении с вакансией бора.

Для расчета использовался программный пакет ASE, при помощи которого создавалась четырехслойная модель h-BN из 127 атомов с вакансией бора. Затем методом функционала плотности библиотекой GPAW рассчитывалась полная энергия системы и далее посредством минимизации сил пакетом ASE с учетом электростатических поправок рассчитывалась энергия образования сравниваемых дефектов [2].

В данной работе рассматриваются энергии образования нейтральных и заряженных дефектов в h-BN в виде классической вакансии V_B , и в конфигурации $N_B V_N$. Также оценивается вероятность переходов между различными зарядовыми состояниями. Результаты данной работы помогут в интерпретации экспериментальных данных, полученных в работе [1].

1. Петров Ю. В., Гогина О. А., Вывенко О. Ф. и др. Влияние комбинированного ионного и электронного облучения на полосу люминесценции 2 eV в гексагональном нитриде бора // Журн. техн. физики. 2023. Т. 93, вып. 7.
2. Tran T. T., Bray K., Ford M. J. et al. Quantum emission from hexagonal boron nitride monolayers // Nat. Nanotechnol. 2015. Vol. 11. P. 37–42.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Петров



ТЕПЛОФИЗИКА

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук *В. С. Сердюков*

Ответственный секретарь секции — *Е. А. Рухлинская*

Экспертный совет секции

канд. физ.-мат. наук *В. А. Андриющенко*

канд. физ.-мат. наук *Е. А. Баранов*

канд. физ.-мат. наук *Г. В. Барткус*

канд. физ.-мат. наук *Ф. В. Роньшин*

канд. физ.-мат. наук *А. И. Сафонов*

THERMOPHYSICS

Section Head — Cand. Phys.-Math. Sci. *V. S. Serdyukov*

Responsible Secretary — *E. A. Rukhlinskaya*

Section scientific committee

Cand. Phys.-Math. Sci. *V. A. Andryushchenko*

Cand. Phys.-Math. Sci. *E. A. Baranov*

Cand. Phys.-Math. Sci. *G. V. Bartkus*

Cand. Phys.-Math. Sci. *F. V. Ronshin*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. I. Safonov*

УДК 537.3

Исследование влияния содержания кислорода на термоэлектрические свойства оксидов $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$

И. М. Акрамов^{1,2}, И. Н. Катаманин¹

¹Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный технический университет

В современном мире, где основным способом получения электроэнергии является сжигание ископаемых ресурсов, актуальной является проблема получения электроэнергии альтернативными способами. Один из таких — термоэлектрический эффект.

Термоэлектрический эффект — это явление генерации электроэнергии материалом при определенной разнице температур. Данный эффект позволяет получать электрический ток напрямую, без необходимости преобразования тепла в механическую энергию, как это, например, осуществляется на ТЭЦ. Помимо этого, данный способ получения энергии является экологически чистым и может быть использован для преобразования тепловых потерь.

Однако широкого распространения термоэлектрические генераторы (ТЭГ) не получили из-за низкого коэффициента преобразования энергии. На данный момент ТЭГ используются в космической промышленности и в высокотехнологичном медицинском оборудовании. Поиск материала с наибольшим КПД, или же добротностью, является основной задачей исследователей в данной области.

Добротность термоэлектрического материала, также именуемая как ZT, является безразмерной величиной, характеризующей эффективность преобразования градиента температур определенным материалом. Добротность тем больше, чем выше значения электропроводности и термоЭДС и чем ниже теплопроводность представленного материала.

В данной работе был изучен оксид $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$. Результаты предыдущих работ показали [1], что данный материал имеет электропроводность $74,5 \text{ 1/Ом}\cdot\text{см}$ и значение термоЭДС в $2\cdot 10^{-4} \text{ В/К}$. Однако, как показала практика при работе с композитами оксидов с нанотрубками, их свойства могут зависеть от содержания в них кислорода. В данной работе проведено исследование влияния кислорода в образце на термоэлектрические свойства оксидов.

1. Romanenko A. I., Chebanova G. E., Chen Tingting et al. Review of the thermoelectric properties of layered oxides and chalcogenides // J. Phys. D: Appl. Phys. 2022. Vol. 55. 143001.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук Г. Е. Чебанова,
д-р физ.-мат. наук, проф. А. И. Романенко

УДК 544.452+543.637+546.171.1+547.495.2

Особенности превращения карбамида в водокислородном флюиде

С. А. Алехин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Карбамид является неотъемлемой частью отходов биомассы, так как он образуется в результате метаболизма белка у животных. Кроме того, карбамид используется при производстве гербицидов и пестицидов, в мебельной промышленности и газоочистных установках. Из-за столь широкого его применения избыточное количество аммонийного азота поступает в окружающую среду в составе муниципальных стоков, стоков промышленных предприятий, а также грунтовых вод, что является причиной их загрязнения. Окисление обводненных отходов при параметрах выше критической точки воды ($T_c = 647$ К, $P_c = 22,1$ МПа) рассматривается в качестве одного из перспективных методов их очистки.

Цель данной работы — исследование особенностей окисления карбамида и аммиака в H_2O/O_2 флюиде в трубчатом реакторе из нержавеющей стали при равномерном нагреве со скоростью 1 К/мин до 873 К. Экспериментальная установка подробно описана в [1]. Эксперименты проводились при разном содержании $(NH_2)_2CO$, O_2 и H_2O в реакционной смеси. Дополнительно проведены опыты с добавлением NaOH в систему.

В результате проведенных исследований установлено, что окисление карбамида протекает преимущественно гетерогенно на поверхности стенки реактора и в несколько стадий, включающих гидролиз карбамида с образованием NH_3 и CO_2 , образование и разложение циануровой кислоты, окисление NH_3 и продуктов разложения циануровой кислоты. Наличие избыточного количества циануровой кислоты может приводить к закупорке системы. Увеличение содержания кислорода в смеси, а также добавление NaOH препятствует образованию циануровой кислоты и интенсифицирует конверсию азотсодержащих соединений в N_2 . Из полученных результатов следует, что окисление карбамидсодержащих отходов, в том числе отходов биомассы, в водокислородном флюиде целесообразно осуществлять в разбавленных растворах при избытке кислорода и с добавлением щелочи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-20003) и при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области (№ р-10).

1. Shishkin A. V., Alekhin S. A., Sokol M. Y. Effect of initiating additives on phenol oxidation in water-oxygen fluid // Thermophys. Aeromech. 2023. Vol. 30. P. 539–552.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. О. Н. Федяева

УДК 533.6

Численное моделирование закрученной струи несмешивающихся жидкостей

Ю. С. Апостол

Новосибирский государственный университет

Аэрозоли встречаются повсеместно и находят применение во многих отраслях. Для подачи топливных смесей в камеры сгорания применяются форсунки, эффективность которых зависит от свойств полученного аэрозоля: от характеристик капель, образующихся в процессе распыления, зависит их дальнейшее рассеивание, испарение и смешивание паров топлива с воздухом [1]. В данной работе приведены результаты численного моделирования распыла двух несмешивающихся жидкостей в форсунке с двумя подводными каналами. Цель данного исследования — изучить образующиеся структуры, режимы истечения капель и их дисперсность.

Моделирование основано на численном решении уравнений Навье — Стокса, имплементированных в код Basilisk с применением метода аппроксимации свободной поверхности VOF (*volume of fluid*). Размер локальной ячейки адаптируется на основе оценки ошибок дискретизации расчетных величин. Оценка ошибки дискретизации достигается посредством вейвлет-преобразования. Минимальный размер ячейки контролировался максимальным уровнем детализации.

В результате моделирования получено качественное описание взаимодействия двух несмешивающихся жидкостей, а также распределение по размерам капель внутри расчетной области.

1. Zhang B., Popinet S., Ling Y. Modeling and detailed numerical simulation of the primary breakup of a gasoline surrogate jet under non-evaporative operating conditions // Int. J. Multi-phase Flow. 2020. Vol. 130. P. 103362.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Вожаков

Изучение смачиваемости поверхностей методом молекулярной динамики

К. В. Артишевский

Новосибирский государственный университет

Изучение влияния материала и геометрии нанотекстур на приповерхностные процессы представляет большой интерес в связи с совершенствованием микро- и наноразмерных устройств и расширением области их применения [1]. При создании таких устройств одной из важных задач является управление их смачиваемостью [2]. При изучении смачиваемости возникают трудности с созданием поверхности с заданной текстурой, а также с измерением контактных углов на микро- и наноразмерных масштабах. Для решения данных задач предлагается использовать метод молекулярной динамики.

Цель работы — изучить механизмы смачиваемости поверхностей методом молекулярной динамики для установления влияния материала и геометрии нанотекстур поверхностей на их смачиваемость.

В качестве пакета молекулярной динамики используется LAMMPS. Исследуемые модели включают в себя каплю воды (в качестве модели молекул воды используется TIP4P), медную, графитовую или композитную медь-графеновую подложку. Поверхность подложки задается гладкой или текстурированной, построенной по уравнению: $z(x) = \alpha \sin(2\pi x / \beta)$. Параметры α и β , определяющие геометрию текстур, задаются равными 2, 4, 6 и 20, 40, 60.

Контактный угол, полученный на медной подложке, составляет $\sim 10^\circ$, на графите — $\sim 85^\circ$. При нанесении на медную подложку одного слоя графена контактный угол увеличивается до $\sim 30^\circ$, при двух слоях — до $\sim 60^\circ$, при трех — до $\sim 85^\circ$. В ходе расчетов было выявлено, что увеличение параметра β может приводить как к увеличению, так и к уменьшению контактного угла. При увеличении параметра α контактный угол увеличивался. Также наблюдаются различия динамических свойств капли. На медной подложке капля сохраняет горизонтальное положение центра масс и растекается вдоль шероховатостей. На графите капля перемещается по подложке.

1. Zang D., Tarafdar S., Tarasevich Y. Y. et al. Evaporation of a droplet: From physics to applications // Phys. Rep. 2019. Vol. 804. P. 1–56.
2. Macko J., Podrojškova N., Orinakova R., Orinak A. New insights into hydrophobicity at nanostructured surfaces: Experiments and computational models // Nanomaterials Nanotechnology. 2022. Vol. 12. 18479804211062316.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Андриющенко

УДК 539.434

Прогнозирование усталостной прочности термобарьерного покрытия

Д. С. Афанаскин

Новосибирский государственный университет

Газотурбинные двигатели и установки, используемые в транспортном, энергетическом и оборонном секторах, используют высокотемпературные теплозащитные покрытия (тепловые экраны) для повышения эффективности и мощности. Тепловые экраны защищают компоненты двигателя от износа, но при этом сами подвержены износу. При циклической нагрузке покрытия изнашиваются, что в конечном итоге приводит к их растрескиванию и расслаиванию и впоследствии к разрушению [1]. Будущее повышение мощности двигателей зависит от эффективности и прочности тепловых экранов [2]. Отсюда возникает потребность прогнозирования их усталостной долговечности.

В данной работе для моделирования термической нагрузки был использован программный пакет ANSYS Mechanical, где был применен метод конечных элементов. Разработана двумерная параметрическая модель термобарьерной плиты и написан скрипт на языке Python для параметризации ее геометрических характеристик. Термическая нагрузка определялась температурой газовой смеси из камеры сгорания с одной стороны плиты и системой охлаждения с другой стороны, которая была равна 1000 и 400 °С соответственно.

В результате моделирования были получены поля эквивалентных деформаций и напряжений в различных слоях термобарьерной плиты при ее различных геометрических характеристиках.

1. Guan P., Ai Y., Fei C., Yao Y. Thermal Fatigue Life Prediction of Thermal Barrier Coat on Nozzle Guide Vane via Master-Slave Model // Appl. Sci. 2019. № 9. P. 4357. URL: <https://doi.org/10.3390/app9204357/> (дата обращения: 23.02.2024).
2. Clarke D. R., Oechsner M., Padture N. P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines // MRS Bulletin. 2012. No. 37. P. 891–898. URL: <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232/> (дата обращения: 23.02.2024).

Научный руководитель — Д. С. Глуздов

Исследование структуры двухфазного потока при кипении жидкости в микроканалах

П. С. Басова, В. А. Бодина, А. Ф. Волохов

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»

Быстрый прогресс в области высокопроизводительных устройств и миниатюризация электроники привели к необходимости рассеивания высоких плотностей тепловых потоков. Кипение жидкости в микроканалах — один из самых перспективных методов охлаждения. Однако данный механизм теплопередачи подвержен тепловой и гидродинамической неустойчивости, что вызывает колебания скорости потока, давления и температуры, что может привести к нарушению работы или повреждению устройств.

Для экспериментальных исследований структуры двухфазного потока был разработан и спроектирован микроканальный испаритель. На основе анализа литературы были изучены виды неустойчивости потока и причины их возникновения [1]. В данном исследовании учитывались критериальные зависимости для определения влияния поверхностного натяжения, вязких и инерционных сил на структуру кипения. Проведены численные расчеты с заданным значением массового расхода на входе и получена гидродинамическая картина течений потока во внутренней полости испарителя для оценки перепада давления в системе. На основе этого был выбран насос, обеспечивающий оптимальный расход жидкости в микроканалах.

Значение критического теплового потока определяет наступление кризиса кипения, приводящего к снижению коэффициента теплоотдачи, что приводит к перегреву и отказу системы [2]. Экспериментальные данные позволили получить зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока и установить наступление кризиса кипения, сопоставить эти данные с гидродинамическими характеристиками потока.

1. Raghvendra Gupta, Deepak Kumar Mishra. Dynamic Instabilities and Their Control in Flow Boiling in Microchannels // *Dyn. Control Energy Syst.* 2020. P. 331–345.
2. Thome J. R., Cioncolini A. Flow boiling in Microchannels // *Adv. Heat Transfer.* 2017. Vol. 49. P. 157–224.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Люлин

УДК 539.233

Исследование сенсорных свойств графена к высыхающим на нем каплям

И. А. Бетке

Новосибирский государственный университет

В недавних работах было показано, что графен изменяет свои проводящие свойства при погружении в водную среду [1]. На основе данного эффекта в настоящее время создаются манометры и датчики истечения, не изменяющие свойства исходных потоков. В данной работе исследуется наличие подобного эффекта в процессе высыхания водных капель на поверхностях, покрытых графеном.

Цель работы — провести серию экспериментов, измерить скорость изменения контактного угла, площади контакта высыхающей капли с поверхностью и сопротивление графенового чипа на непроводящей подложке, а также установить основные взаимосвязи между этими величинами.

В экспериментах используется графен, синтезированный на медной фольге методом CVD при атмосферном давлении и перенесенный на подложки SiO₂ через водную среду. Ранее было показано, что данный метод одновременно обладает высокой воспроизводимостью и хорошим качеством переносимого графена [2].

В работе рассматриваются подложки SiO₂ с разными значениями шероховатости, на которых выявлены различные характеры высыхания капель. На более шероховатых образцах капля постепенно увеличивает радиус кривизны при неизменной площади контакта, что объясняется сильным поверхностным взаимодействием. На гладких, напротив, капля равномерно сжимается при неизменном контактом угле.

Установлено, что для режима высыхания на более гладкой поверхности зависимость проводимости образца от площади капли с высокой точностью линейна. Данное обстоятельство будет полезно при развитии приборов, использующих сенсорные свойства графена. Эффект изменения сопротивления в среднем составляет 6–7 % от общего сопротивления композита (подложки, покрытой графеном) для капли объемом 0,5 мкл и графенового чипа площадью 0,5 см². Повышение сопротивления образца при высыхании капли можно объяснить легированием образца всевозможными органическими примесями.

1. Andryushchenko V.A. et al. Graphene-polymer composite conductivity in air and water // Appl. Surf. Sci. 2021. Vol. 567. P. 150843.
2. Andryushchenko V.A., Sorokin D.V., Betke I.A. et al. Control of graphene adhesion to substrate during transfer through liquid // J. Mol. Liquids. 2024. Vol. 395. P. 123827.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Андриющенко

Влияние структуры CVD-графена и подложки на его сенсорные свойства

А. И. Богомолова

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Графен — это моноатомный слой углерода, на сегодняшний день являющийся самым известным двумерным материалом. Благодаря высокой доле удельной поверхности, возможности функционализации и высокой электропроводности графен является превосходным материалом для создания чувствительных и высокоэффективных газовых датчиков. Графеновые газовые датчики обладают высокой чувствительностью, селективностью и быстрым временем реагирования на изменения концентрации газов в окружающей среде. Они могут использоваться для обнаружения токсичных и загрязняющих веществ, что делает их незаменимыми в различных областях, таких как медицина, промышленность, экология и безопасность. Благодаря своим уникальным электронным свойствам графеновые газовые датчики также обладают потенциалом для создания портативных и миниатюрных устройств, которые могут быть интегрированы в различные устройства микроэлектроники и электромеханические системы для мониторинга окружающей среды.

Цель настоящего исследования — изучить сенсорные свойства ХОГФ графена и их зависимости от структуры графенового покрытия. Синтез графена производился методом химического парофазного осаждения из метана на медной подложке. В качестве подложек, на которые осуществлялся перенос, были использованы пластины кремния. Сенсорные свойства газовых датчиков исследовались при комнатной температуре (25 ± 3 °C). Калибровка датчиков производилась с использованием синтетического воздуха. Проведены эксперименты на графеновых чипах в диапазоне концентраций 25, 50 и 100 ppm для NO₂. Показано, что максимальной чувствительностью графеновые чипы обладают к содержанию в атмосфере оксида азота, при этом отклик R/R₀ составляет 4,5 % при концентрации газа-аналита 25 ppm. Таким образом, предложенный в работе способ позволяет создавать графеновые сенсоры, для повышения чувствительности и селективности которых можно использовать функционализацию наночастицами металлов.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Д. В. Смовж

УДК 536.7

Исследование влияния геометрии параллельных прямоугольных микроканалов на эффективность охлаждения

В. А. Бодина, П. С. Басова, А. Ф. Волохов

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»

Вследствие развития микроэлектроники растет плотность теплового потока в современных устройствах. Требуются инновационные способы охлаждения, так как отвод тепла существующими воздушным и однофазным жидкостным охлаждениями становится недостаточно эффективным. Перспективным решением данной проблемы является использование микроканального испарителя с принудительной прокачкой жидкости в двухфазной системе охлаждения.

Геометрические параметры микроканалов определяют интенсивность отвода теплоты, поэтому проектирование испарителя является основным этапом разработки системы охлаждения. На основе анализа литературы [1] были определены оптимальные размеры микроканалов: высота канала — 1,5 мм, толщина ребер и межреберное расстояние — по 200 мкм. С целью обеспечения равномерности распределения потока внутри испарителя была спроектирована трехмерная модель для визуализации течения жидкости. По результатам моделирования была получена соответствующая нашим требованиям гидродинамическая картина течения. Для проведения экспериментальных исследований с помощью аддитивных технологий были напечатаны шесть образцов испарителя из алюминиевой бронзы: пять образцов с высотой ребер 0,5; 0,8; 1; 1,2; 1,5 мм и один образец без ребер. В ходе разработки модели были также учтены особенности 3D-печати и был подобран режим печати, обеспечивающий целостность конструкции образца.

В результате экспериментального исследования микроканальных испарителей в двухфазной системе охлаждения были получены данные, позволяющие оценить влияние высоты ребер микроканалов на эффективность теплоотвода.

1. Xiao Cheng, Junjun Wu. Geometry-metrics-dependent flow boiling characteristics in rectangular microchannels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. Vol. 218.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Люлин

Двумерная дифракция волн горения и детонации в водородных смесях

А. А. Борискин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Традиционно большую часть генерируемой электроэнергии, используемой в промышленности и быту, получают за счет сжигания различных углеводородных топлив. Однако в качестве одной из альтернатив рассматривается водородно-кислородная смесь. Использование данной смеси, в свою очередь, сталкивается на практике с рядом проблем, связанных с высокой взрывоопасностью, дороговизной получения водорода. Хотя применение водородно-кислородных смесей в чистом монотопливном виде является спорным вопросом, использование водорода в качестве добавки к газообразным углеводородным смесям можно рассматривать как перспективное направление. Так, установлено, что добавление некоторой концентрации водорода в горючую углеводородно-кислородную смесь может привести к уменьшению энергии, затрачиваемой на инициирование горючей смеси. Однако с экспериментальной точки зрения водородно-кислородные смеси (особенно нестехиометрические составы) слабо изучены по сравнению с углеводородными топливами, что связано с плохой светимостью детонации в видимом диапазоне. Поэтому прежде чем приступить к серьезному изучению многотопливных смесей, необходимо сначала подробно исследовать водородные смеси. Данная работа посвящена изучению условий инициирования стационарных и нестационарных процессов горения и детонации в водородно-кислородных смесях с различным соотношением концентраций компонент (коэффициент стехиометрии ϕ).

Из существующих экспериментальных методик для исследования условий инициирования детонационных волн наиболее пригодна в лабораторных условиях методика дифракции многофронтной детонационной волны в квазиплоских каналах. Суть методики состоит в том, что в узкой части канала создается квазистационарная детонационная волна, которая при дифракции в широкую область срывается и служит инициатором для смеси, находящейся в широкой части канала. Как результат, наблюдаются различные стационарные и нестационарные процессы в широкой части канала.

Цель данной работы — изучить в водородных смесях критические условия распространения двумерной волны и инициирования детонации в зависимости от ϕ и геометрии используемых каналов. Для эксперимента применялись смеси с $\phi = 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2$.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. Васильев

УДК 536.242

Исследование способов управления движением падающей капли наножидкости в постоянном электрическом поле

П. А. Бороздин

Новосибирский государственный университет

Управление движением капель различных жидкостей представляет интерес во многих научных сферах. К таким сферам можно отнести распыление топлива в камерах сгорания, струйное нанесение покрытий, испарение в теплообменниках. Исследование методов управления траекторией капель может помочь в повышении эффективности разделения водонефтяных эмульсий. Во многих промышленных процессах капли жидкости несут на себе электрический заряд, что позволяет управлять их движением с помощью электрического поля. Кроме того, электрическое поле может быть использовано в качестве инструмента для деформации капель и для разрушения крупных капель на более мелкие [1, 2]. Интерес также представляет изучение взаимодействия капель друг с другом под действием электрического поля [3].

Исследований, посвященных изучению деформации капель с помощью электрического поля, значительно больше, чем работ, в которых электрическое поле рассматривается как механизм управления движением капель. Цель данной работы — исследовать метод управления движением капель жидкости, основанный на использовании горизонтального однородного электрического поля. Помимо этого, в работе были рассмотрены способы измерения удельного заряда капли с помощью электрического поля.

Полученные в ходе данной работы результаты имеют значения для развития промышленности и свидетельствуют о том, что электрическое поле может быть использовано в качестве эффективного инструмента для управления движением заряженных капель различных жидкостей, а также для определения электрического заряда капель.

1. Ghasemi E. et al. Simulation of deformation and fragmentation of a falling drop under electric field // Powder Technol. 2018. Vol. 325. P. 301–308.
2. Bararnia H., Ganji D. D. Breakup and deformation of a falling droplet under high voltage electric field // Adv. Powder Technol. 2013. Vol. 24, № 6. P. 992–998.
3. Chiesa M. et al. Forces acting on water droplets falling in oil under the influence of an electric field: Numerical predictions versus experimental observations // Eur. J. Mech., B/Fluids. 2005. Vol. 24, № 6. P. 717–732.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. М. Старинская

Синтез 0D–2D-наноструктур методом HiPIMS

Т. И. Гареев

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

В последнее время значительное внимание уделяется созданию и исследованию наноструктур различной размерности. Актуальность использования графена и композитов на его основе обусловлена его превосходными электрическими свойствами: высокой проводимостью и низким уровнем тепловых флуктуаций сигнала. Функционализация графена наночастицами олова и титана [1] может привести к возникновению новых свойств нанокompозитов благодаря сенсорным свойствам TiO_2 и SnO . Согласно некоторым работам, например [2], магнетронные системы позволяют получать наночастицы различного размера в зависимости от условий синтеза: давления в рабочей камере, типа источника, мощности, подводимой на мишень, времени процесса.

Данная работа посвящена получению композитов на основе структур разных размерностей — нульмерных Ti , Sn на 2D-графене. Графен синтезировался методом CVD на медной пластине и далее переносился на подложки кремния или SiO_2 . Для производства медных контактов и частиц на графене применялся метод магнетронного распыления с источником HiPIMS. Получены композиты титан-графен, олово-графен с разным временем процесса: 5, 10 и 30 с; определены их электрические свойства. Величина относительного увеличения сопротивления для образцов с Ti составила –4,5 % при 5 с, что говорит об улучшении проводимости, 18 и 7 % для 10 и 30 с соответственно времени синтеза. Аналогично для Sn — 46, 75 и 53 %. Композиты, полученные на кремниевой подложке, проявляют фоточувствительность, величина относительного уменьшения составила 3, 12, 31 % при увеличении времени напыления. По итогу исследования подобран режим формирования и напыления частиц, который приводит к незначительному разрушению графенового слоя. Полученные образцы обладают сенсорными свойствами. Предложенная технология может применяться для получения композитов графен-наночастицы для сенсорных приложений.

1. Zhang Y. et al. TiO_2 -graphene nanocomposites for gas-phase photocatalytic degradation of volatile aromatic pollutant: is TiO_2 -graphene truly different from other TiO_2 -carbon composite materials? // ACS nano. 2010. Vol. 4, No. 12. P. 7303–7314.
2. Mayoral A. et al. Tuning the size, composition and structure of Au and $\text{Co}_{50}\text{Au}_{50}$ nanoparticles by high-power impulse magnetron sputtering in gas-phase synthesis // Nanotechnology. 2018. Vol. 30, No. 6. P. 065606.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Д. В. Смовж

УДК 62-144.3

Верификация результатов моделирования рабочего цикла поршневого двигателя, работающего на разных видах топлива, посредством стендовых испытаний

Д. А. Давыдов

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

Перспективной целью развития двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является применение альтернативных источников энергии природного происхождения и синтезированных человеком. При переводе ДВС на нетрадиционные топлива технико-экономические показатели изменяются в зависимости от их физико-химических свойств.

На начальном этапе для сравнения базовых характеристик энергетической установки осуществлено моделирование рабочего цикла одноцилиндрового 4-тактного ДВС, работающего на бензине. Для верификации математической модели получены аналогичные данные на нагрузочном стенде. Например, значение удельного расхода топлива при моделировании составило 553,5 г/кВт·ч, результаты эксперимента — 634,3 г/кВт·ч (отличие 12,7 %).

Далее выполнено моделирование рабочего цикла двигателя при работе на пропан-бутановой смеси, а также получены нагрузочные характеристики двигателя в ходе испытаний. Установлено, что по результатам моделирования КПД имеет значения 0,155; в эксперименте — 0,144 (расхождение 7,3 %).

Также было проведено моделирование и стендовые испытания работы ДВС на синтез-газе, получаемом из опила. Выявлено, что часовой расход топлива по результатам моделирования составил 2,5 м³/ч, при эксперименте — 2,2 м³/ч (отклонение 12,0 %).

Следует отметить, что при переводе ДВС с бензина на пропан-бутановую смесь его мощность уменьшается на 3,4 %, а переход с бензина на синтез-газ вызывает падение мощности на 37,9 %, что согласуется с данными [1].

Таким образом, верификация математической модели выполнена успешно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

1. Thi T. X. N., Bui T. M. T., Truong L. B. T. Effects of Syngas from Various Biomass Gasification on Combustion of Spark Ignition Engine // GMSARN Int. J. 2024. Vol. 18 (1). P. 123–129.

Научный руководитель — д-р техн. наук, доц. Л. В. Плотников

Динамика пузырьков и сухих пятен под нагреваемой подложкойИ. А. Деревянников^{1,2}, А. С. Мунгалов²¹Новосибирский государственный университет²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Задачи по изучению кипения и испарения становятся все более актуальными в современном мире ввиду широкого применения данных процессов в промышленности. В пузырьках в районе тройной контактной линии существует микрослой, который испаряется более интенсивно. В данной работе исследовались пузырьки, образующиеся под горизонтально ориентированной прозрачной нагреваемой подложкой. Данная конфигурация позволяет приблизиться к условию микрогравитации, поскольку пузырьки в процессе роста не отрываются от нагревателя. В результате неравномерного нагрева в жидкости возникали конвективные потоки, приводящие к хаотическому движению пузырьков вдоль подложки. В работе представлены результаты динамики сухих пятен, пузырьков, а также микрослоев, образованных при коалесценции.

Исследование проводилось в закрытом прямоугольном резервуаре, на верхнюю стенку которого нанесен ИТО-нагреватель размером 11×6 мм². В качестве рабочей жидкости используется диэлектрическая фторуглеродная жидкость FC-72. В результате совместного использования с теневым методом метода интерферометрии удалось визуализировать динамику пузырьков и сухих пятен. Также интерферометрия использовалась для анализа микрослоя, образовывавшегося в результате коалесценции двух пузырьков.

В работе показано, что за счет смачиваемости поверхности во время движения на границе пузырька образуется микрослой. В результате происходит более активный рост пузырька. Получен результат, в котором при слиянии двух пузырьков образовывался микрослой. Впервые была исследована динамика микрослоя, образовавшегося в результате коалесценции. Данный процесс может значительно интенсифицировать теплопередачу. Обнаружено, что с увеличением мощности нагрева скорость испарения микрослоя, образованного после коалесценции пузырьков, значительно возрастает.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. Ю. Кочкин

УДК 533.599, 533.17, 536.511, 539.198, 544.277.6

Об измерении поступательной температуры в неравновесном сверхзвуковом потоке

Е. Д. Деринг

Новосибирский государственный университет

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений исследований в газодинамике является изучение сверхзвуковых неравновесных потоков с развитой конденсацией. Интерес представляют как фундаментальные исследования кластеров Ван-дер-Ваальсова, так и прикладные применения сверхзвуковых кластированных струй (например, для сверхгладкой полировки различных поверхностей).

Известно, что развитие процесса конденсации в потоке приводит к изменению его газодинамических параметров. Так, в частности, с помощью электронно-пучковой диагностики было показано, что при увеличении среднего размера кластеров, образующихся при расширении, наблюдается искажение адиабатичности истечения (например, уширение потока). Одной из наиболее вероятных причин возникновения подобного изменения параметров является выделение в потоке в процессе конденсации скрытой теплоты фазового перехода. Для детального изучения данных процессов необходима постановка экспериментальных методов определения температуры в потоке разреженного газа.

Существуют различные методики определения температуры частиц в сверхзвуковом газовом потоке:

- метод электронно-пучковой спектроскопии, позволяющий определять вращательную температуру частиц из вращательного спектра молекул;
- времяпролетный метод измерения функции распределения частиц по скоростям, из которой вычисляется поступательная температура;
- метод доплеровского уширения спектральных линий, также позволяющий вычислить поступательную температуру.

В настоящей работе рассмотрен метод определения перпендикулярного скоростного отношения S_{\perp} ($S_{\perp} = \frac{W}{\sqrt{2kT_{\perp}/m}}$, W — направленная скорость потока) из поперечных профилей плотности частиц в молекулярном пучке. В докладе изложены основы метода, проведена верификация полученных результатов для неконденсирующихся струй, представлены первые результаты, полученные в сверхзвуковых кластированных струях аргона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант FSUS-2020-0039), на оборудовании ЦКП «Прикладная физика» НГУ.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук А. Е. Зарвин, К. А. Дубровин

Влияние малого анода на магнетронный разряд и свойства тонких пленок нитрида титана

О. В. Зайцев

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Цель работы — изучить влияние малого анода на магнетронный разряд и свойства пленок нитрида титана, синтезированных методом реактивного магнетронного распыления титановой мишени в атмосфере Ar и N₂. Пленки нитрида титана применяются как защитный и декоративный слой для режущих поверхностей и бижутерии, а также для легирования контактов в интегральных микросхемах и в качестве коллектора заряда в сенсibilизированных красителем солнечных элементах. Малый анод выступает как дополнительный источник электронов, что позволяет увеличить ионный ток к подложке — один из ключевых параметров, влияющих на свойства получаемых покрытий.

Эксперименты проводились в вакуумной камере объемом 100 л, оснащенной магнетроном с кольцевым анодом, питаемым источником в режиме высокоомощной импульсной генерации, подложкодержателем, дополнительным малым анодом вблизи подложки, на который подавалось положительное, относительно стенок камеры, напряжение. Камера оснащена насосной и газовой системой, получение пленок происходит при давлении в 0,3 Па. Исследование пленок проводилось методами РФА, СЭМ, измерения оптической прозрачности и сопротивления.

Формирование пленок происходит в результате распыления катода магнетрона в аномальном тлеющем разряде. Распыленные в разряде частицы взаимодействуют с атмосферой камеры и в дальнейшем осаждаются на поверхности подложки. При этом, помимо основного разряда магнетрона, появляется дополнительный разряд между стенками и малым анодом, который повышает степень ионизации разряда, увеличивающий ионный ток к подложке.

Приведены результаты исследования влияния малого анода на свойства магнетронного разряда и пленок TiN, такие как прозрачность и ширина запрещенной зоны. В результате были выявлены различия между пленками, полученными с током на аноде 0 и 20 мА. Ширина запрещенной зоны составила 0,76 и 0,86 эВ соответственно, после отжига пленок в атмосфере воздуха и N₂ значения стали одинаковыми — 3,22 и 2,62 эВ соответственно для обоих видов пленок. Данные результаты показывают, что введение дополнительного анода позволяет изменять свойства пленок.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. З. Сахапов

УДК 536.26

Исследование тепловых потоков в области контактной линии при росте одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации

А. И. Зорькина

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Кипение является неотъемлемой частью во многих отраслях промышленности. С целью лучшего понимания процессов теплопередачи при кипении и дальнейшего приложения в космической индустрии на МКС проведен многомасштабный эксперимент по исследованию роста одиночного парового пузыря в строго контролируемых условиях. За счет отсутствия плавучести в условиях микрогравитации в несколько раз увеличивается пространственное и временное разрешение, что позволяет тщательно изучить быстротечные эффекты, в земных условиях маскируемые силой Архимеда. Детальное описание установки и обработки скоростной черно-белой визуализации представлено в [1].

В настоящем исследовании рассматривается влияние следующих параметров эксперимента: p — давление жидкости, t_{wait} — время между включением нагревателя и инициализацией пузыря. Для определения локальных тепловых потоков в жидкость с поверхности нагрева численно решается трехмерное уравнение теплопроводности в подложке. Проведено сравнение данных с результатами, полученными другой исследовательской группой отличным от представленной в настоящей работе способом [2].

Определено количество теплоты, переносимое с границы раздела «жидкость — пар», с области контактной линии и с центра под пузырем при различных p и t_{wait} : при увеличении давления количество теплоты уменьшается за счет уменьшения коэффициента удельной теплоты парообразования и уменьшения площади поверхности, с которой происходит испарение жидкости (объем пузыря уменьшается с увеличением p); при увеличении времени предварительного нагрева количество теплоты увеличивается за счет увеличения площади поверхности, с которой происходит испарение жидкости (объем пузыря увеличивается с увеличением t_{wait}) и увеличения градиента температуры.

1. Sielaff A. et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview // Appl. Therm. Eng. 2022. P. 117932.
2. Schinnerl M. et al. Heat transfer in single bubble nucleate boiling within the multiscale boiling project onboard the International Space Station // Proc. of the 17th Int. Heat Transfer Conf. 14–18 August 2023. Cape Town, 2023.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ф. В. Роньшин

Отладка двухцветного ПЛИФ-метода для измерения температуры в жидкости

А. А. Зотьева

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Большинство методов измерения температуры, такие как ИК-детекторы, термопары и т. д., не имеют возможности измерения мгновенных температурных полей в определенном сечении потока. Данное преимущество дает метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ), основанный на естественной флуоресценции органических красителей, которая возбуждается с помощью лазерного ножа. Но и этот метод имеет ряд проблем, например зависимость от пространственного распределения энергии лазерного ножа. Для корректировки данной особенности был использован метод двухцветного ПЛИФ: добавлен краситель, не зависящий от измеряемого параметра (температуры). Отношение интенсивности зависящего красителя к интенсивности независимого позволяет узнать изменение температурного поля. В данной работе проведена отладка данного метода на подогретой стоячей воде в кювете с использованием двух флуоресцентных красителей.

Рассмотрен раствор родаминов В и 6G в подогретой дистиллированной воде при остывании от 38,8 до 21,4 °С. Флуоресценция родаминов регистрируется с помощью двух камер PCO EDGE 5.5 (16 бит), что повышает точность измерений в сравнении с ранними исследованиями [1, 2]. Такое преимущество дает возможность использовать в качестве красителей довольно близкие по спектру флуорофоры — родамины В и 6G в пропорции 1 : 4. Выбор пропорций связан с экспериментальным исследованием интенсивностей спектров родаминов. Сигнал флуоресценции был зарегистрирован двумя камерами со светофильтрами, один из которых пропускает излучение родамина В, а другой — сумму излучений родаминов В и 6G.

1. Rochlitz H., Scholz P. Application of laser-induced fluorescence technique in a duct flow with one heated wall // Published Online 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2508-1> (дата обращения: 26.02.2024).
2. Chaze W., Caballina O., Castanet G, Lemoine F. The saturation of the fluorescence and its consequences for laser-induced fluorescence thermometry in liquid flows // Published Online 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2142-8> (дата обращения: 26.02.2024).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. М. Дулин

УДК 532.57

Разработка метода ультразвуковой диагностики двухфазного потока

К. С. Зубанов¹, М. Р. Гордиенко²,
С. В. Какаулин², В. Е. Ледовский³, А. Т. Янчат³

¹Новосибирский государственный университет

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Новосибирский государственный технический университет

Работа направлена на развитие ультразвукового метода диагностики двухфазных потоков. Высокая химическая активность, давление и температура, затрудненный доступ к исследуемым средам делают данную задачу диагностики нетривиальной. Существует множество оптических неинвазивных методов для исследования потоков, но для оптически непрозрачных сред они не могут быть применены. В таком случае ультразвуковой метод может оказаться более эффективным по сравнению с другими методами.

В работе предложен ультразвуковой метод оценки скорости расхода двухфазного потока. Используя ультразвуковые преобразователи в роли передатчика и приемника акустических волн, можно получить сигнал с начальной и измененной частотой, которые в дальнейшем подвергаются обработке. Анализ спектра сигнала с разностной частотой позволяет определить скорость расхода потока в измеряемом объеме.

В ходе эксперимента было выявлено, что ультразвуковой метод является эффективным средством для измерения скорости расхода двухфазного потока. Разработан зонд для измерения скорости расхода потока с погрешностью не более 10 %. Дальнейшие исследования направлены на уменьшение размеров зонда и поиск более эффективных способов диагностики многофазных потоков.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Научный руководитель — канд. техн. наук И. К. Кабардин

Исследование процессов осаждения капли коллоидного раствора в магнитном поле

А. А. Иванова

Новосибирский государственный университет

Исследование процесса осаждения наножидкостей представляет интерес, поскольку он применяется во многих областях промышленности, медицины, химической отрасли, например: при доставке лекарств, струйной печати и т. п. [1–3] Существующие исследования свидетельствуют о растущем внимании к изучению испарения капель ферромагнитной жидкости под действием магнитного поля [2–4]. Тем не менее влияние различных величин магнитного поля на процессы испарения и осаждения капель ферромагнитных жидкостей не полностью изучено [2].

В настоящей работе были изучены характеристики осаждения капель ферромагнитной наножидкости на различных подложках в магнитном поле. Цель исследования — проанализировать влияние смачиваемости поверхности и напряженности магнитного поля на характер осаждения твердых частиц. В результате выполнения работы были исследованы принципы воздействия магнитного поля на каплю наножидкости оксида железа (III). Исследованы взаимодействия жидкости с разными видами поверхностей с различными свойствами (стекло, фторопласт, бифильная поверхность). По полученным данным можно сделать вывод, что с помощью магнитного поля можно управлять осаждением ферромагнитных частиц в процессе испарения, тем самым получая различные формы и конфигурации осадков на сложных структурированных поверхностях.

1. Zaaroura I., Harmand S., Carlier J. et al. Experimental studies on evaporation kinetics of gold nanofluid droplets: Influence of nanoparticle sizes and coating on thermal performance // *Appl. Therm. Eng.* 2021. Vol. 183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116180>.
2. Liu Z., Zhou J., Li Y. et al. Evaporation and drying characteristics of the sessile ferrofluid droplet under a horizontal magnetic field // *Fundam. Res.* 2022. Vol. 2. P. 222–229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.08.016>.
3. Saroj S. K., Panigrahi P. K. Drying pattern and evaporation dynamics of sessile ferrofluid droplet on a PDMS substrate // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2019. Vol. 580. 123672. UR: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123672>.
4. Chattopadhyay A., Dwivedi R. K., Hari Krishnan A. R., Dhar P. Ferro-advection aided evaporation kinetics of ferrofluid droplets in magnetic field ambience // *Phys. Fluids.* 2020. Vol. 32. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0018815>.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. М. Старинская

УДК 532.52, 537.29

**Влияние электрического поля на поведение капли наножидкости
диоксида титана, полученной методом
наносекундной импульсной лазерной абляции**

А. М. Каргина

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Фотокаталитические процессы привлекают все больший интерес. Одним из наиболее широко используемых фотокатализаторов является диоксид титана, что обусловлено его высокой фотокаталитической активностью, химической стабильностью и относительно низкой стоимостью. В настоящее время актуальным направлением исследований является изучение влияния внешнего электрического поля на поведение капель жидкости. Это вызвано тем, что электрические поля способны оказывать существенное воздействие на свойства и поведение жидкостей, включая их поверхностное натяжение, форму, размер, а также на возникновение дополнительных сил внутри капель, включая капиллярные. Таким образом, цель данной работы — изучить влияние внешнего электрического поля на поведение коллоидных растворов диоксида титана, синтезированных методом импульсной наносекундной лазерной абляции в жидкости.

Синтез коллоидных растворов диоксида титана осуществлялся методом импульсной наносекундной лазерной абляции (ИЛА) титана в жидкости. Одним из главных преимуществ ИЛА в жидкости является простота создания экспериментальной установки и высокая чистота синтезируемых растворов. Лазерное воздействие осуществлялось основной гармоникой твердотельного Nd:YAG-лазера. Для исследования поведения капель в электрическом поле был использован экспериментальный стенд, состоящий из обкладок конденсатора, высоковольтного источника постоянного напряжения и высокоскоростной камеры. Для фиксации положения капли была использована бифильная поверхность.

Исследовано поведение раствора диоксида титана в электрическом поле. Определена величина напряженности поля, при которой происходит пробой. Проведено сопоставление результатов чистой жидкости с коллоидным раствором. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии наночастиц оксида титана на поляризацию капли жидкости.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800214-7).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук С. В. Старинский

Влияние характеристик фрагментации капель при соударении водоугольных суспензий с пиролизирующимися частицами угля

А. Клименко

Томский политехнический университет

Исследование процессов столкновения капель суспензий с твердыми частицами находит свою практическую значимость в вопросах сжигания угольного топлива. Ранее установлено, что применение суспензий для выработки тепловой энергии позволяет снизить антропогенные выбросы в окружающую среду [1]. На практике в котельных агрегатах капля суспензии сталкиваются с уже нагретыми и пиролизирующимися частицами угля. Как правило, в котельных установках сжигание водоугольного топлива происходит при температуре около 950–1050 °С. При этом температура воспламенения лежит в диапазоне от 450 до 650 °С (в зависимости от марки угля и массовой доли в суспензии) [2]. Цель настоящего исследования — определить основные характеристики процесса взаимодействия капель водоугольных суспензий с пиролизирующимися частицами угля.

Экспериментальные исследования проводились при помощи стенда и методики, используемых в ранней работе [3]. В настоящей работе угольная частица нагревалась до 700 °С с помощью спиртовой горелки. Определено, что режим агломерации реализуется в малом диапазоне чисел Вебера (от 0,1 до 10,0) и линейного безразмерного параметра (от 0 до 0,2). Такой эффект объясняется тем, что при взаимодействии капли жидкости с пиролизирующейся частицей жидкость мгновенно прогревается, уменьшается поверхностное натяжение и вязкость суспензии. Ввиду того что дисперсионная фаза с водой обладает слабым взаимодействием и суспензия термодинамически неустойчива, после столкновения капля разрушается.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-71-10040).

1. Zhou Z., Guo L., Chen L. et al. Study of pyrolysis of brown coal and gasification of coal-water slurry using the ReaxFF reactive force field // Int. J. Energy Res. 2018. Vol. 42, No. 7. P. 2465–2480.
2. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // Fuel. 2011. Vol. 90, No. 2. P. 865–877.
3. Klimenko A., Shlegel' N. E., Strizhak P. A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis // Energy. 2023. Vol. 283. P. 128480.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. Н. Е. Шлегель

УДК 536.24

**Экспериментальное исследование теплообмена
в пленке жидкости, стекающей по вертикальному цилиндру
с однослойным и двухслойным сеточными покрытиями**

С. В. Конев

Новосибирский государственный университет

Модификация поверхности стенки для интенсификации теплообмена в стекающей пленке жидкости является быстроразвивающейся технологией в последние годы — появляются новые исследования, в том числе с использованием сеточных покрытий, их комбинаций друг с другом и с другими видами измененных поверхностей. К преимуществам этой технологии можно отнести простоту монтажа сеток на тепловыделяющую поверхность, низкую стоимость производства, а также доступность широкого спектра микросеток.

В настоящей работе применялись однослойное сеточное покрытие из меди с апертурой 240 мкм и диаметром проволоки 80 мкм и двухслойное градиентное покрытие из меди, первый слой которого с апертурой 240 мкм и диаметром 80 мкм и второй — 500 и 130 мкм соответственно. В качестве рабочей жидкости для эксперимента была выбрана бинарная смесь хладонов R114-R21 с мольной долей летучего компонента R114, равной 12 %.

Показано, что для однослойной сетки теплообмен при кипении увеличился до 2 раз по сравнению с гладкой поверхностью в области малых тепловых потоков (0,5–1,7 Вт/см²). Также было установлено, что для двухслойного градиентного сеточного покрытия коэффициент теплоотдачи снижается до 30 % в сравнении с однослойным. Несмотря на наблюдаемое ухудшение теплоотдачи, многослойные сеточные покрытия, приближаясь по структуре к иерархическим пористым покрытиям, могут достигать лучших результатов, в сравнении с однослойными [1]. Однако для тонкопленочных теплообменников, для рабочих режимов которых характерны невысокие значения отводимых тепловых потоков, эффективное применение мультимасштабных покрытий в целом осложняется реализацией невысоких температурных напоров «стенка — жидкость», недостаточных для активации всего диапазона искусственных пор/шероховатостей.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение 075-15-2021-575).

1. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N. Heat Transfer Enhancement at Boiling and Evaporation of Liquids on Modified Surfaces — A Review // High Temp. 2021. Vol. 59, No. 2–6. P. 405–432.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О. А. Володин

Исследование влияния давления на структуру и эволюцию микрослоя при кипении жидкости

И. А. Косовских

Новосибирский государственный университет

Кипение является эффективным способом теплообмена и применяется в различных областях. В данной работе изучается влияние давления на структуру и эволюцию микрослоя — тонкого слоя жидкости, образующегося под паровыми пузырями при кипении. Проведено экспериментальное исследование тепловых и геометрических характеристик микрослоя при кипении воды в условиях большого объема в диапазоне давлений 12–101,3 кПа. Эксперименты были проведены с использованием установки и специальной конструкции тепловыделяющей поверхности на основе ИТО-нагревателя. Описание экспериментальной установки представлено в [1]. Для определения профиля и толщины микрослоя и скорости испарения микрослоя в работе был использован метод LED-интерферометрии [2].

Анализ полученных результатов показывает, что с понижением давления максимальная плотность теплового потока, отводимого за счет испарения микрослоя, заметно снижается. Полученные в настоящей работе результаты дают новую информацию об особенностях локального теплообмена в области тройной контактной линии, а также об эволюции и структуре микрослоя при кипении жидкости при варьировании давления.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00174).

1. Serdyukov V., Malakhov I., Surtaev A. The influence of pressure on local heat transfer rate under the vapor bubbles during pool boiling // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 9. P. 3918.
2. Сердюков В. С., Косовских И. А., Малахов И. П., Суртаев А. С. Исследование структуры микрослоя при кипении жидкости с помощью светодиодной интерферометрии // *Теплофизика и аэромеханика*. 2024. (Принята в печать.)

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. С. Сердюков

УДК 62-144.3

Влияние формы поперечного сечения канала на структуру стационарного потока в цилиндре и интенсивность теплоотдачи во впускной системе поршневого двигателя

Д. Н. Красильников, В. А. Следнев

Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) остаются незаменимыми преобразователями энергии и используются практически во всех сферах жизнедеятельности человека [1]. Улучшение эксплуатационных показателей ДВС является актуальной задачей в развитии теплофизики и энергетики. Одно из перспективных направлений в достижении этой задачи состоит в тепломеханическом совершенствовании процессов газообмена [2].

Исследования проводились на натуральных экспериментальных стендах, имитирующих процесс впуска (наполнение цилиндра воздухом) ДВС. Опыты выполнялись при стационарном движении воздуха со скоростью от 5 до 55 м/с. С целью улучшения процесса наполнения цилиндра канал в головке блока цилиндра выполнялся в форме квадрата и треугольника. Для оценки газодинамики и теплообмена использовались следующие параметры: структура потока в цилиндре, степень турбулентности и коэффициент теплоотдачи во впускной системе. Измерения проводились на основе метода тепловизиализирующей съемки (тепловизор и сетка) и метода тепловой анемометрии (термоанемометр и два типа датчиков).

Основные результаты исследования:

- обнаружено наличие застойных зон при наполнении цилиндра воздухом через базовую впускную систему с круглым поперечным сечением канала;
- установлено, что применение профилированных каналов приводит к более равномерному распределению потока воздуха по всему объему цилиндра и существенному уменьшению застойных зон;
- показано, что применение квадратных и треугольных каналов приводит к росту интенсивности турбулентности потока на 3–30 %, а также росту коэффициента теплоотдачи в среднем на 25 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00022).

1. Ganesan V. IC Engines. New Delhi: Tata McGraw Hill, 2012. 765 p.
2. Плотников Л. В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.

Научный руководитель — д-р техн. наук, доц. Л. В. Плотников

Моделирование работы теплообменного аппарата регенеративного типа с разной формой поперечного сечения каналов

Н. В. Кутузова, С. И. Мезенцев, Д. А. Усов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Для жителей Западной Сибири требуются значительные энергетические затраты на отопление помещений в зимний период. При этом значительная часть затрат обусловлена расходом энергии на нагрев наружного воздуха в системе вентиляции жилых и производственных помещений. Одним из наиболее перспективных решений проблемы с точки зрения энергосбережения в системе вентиляции является использование теплоты вытяжного воздуха для нагрева приточного, т. е. принцип рекуперации. Рекуператоры относятся к энергосберегающим приборам, так как они позволяют экономить до 45 % денежных средств от общих затрат на отопление. Другой важный аспект связан со здоровьем человека, который находится больше 80 % своего времени в закрытых помещениях, в которых чаще всего отсутствует вентиляция. Это значит, что человек может испытывает кислородное голодание, сигналами которого являются: головная боль, апатия, сонливость и слабость. Использование рекуператоров позволяет установить комфортный микроклимат в помещении.

Теплообменная насадка — один из ключевых элементов рекуператора. Она представляет собой цилиндр с каналами различной формы сечения. Исследуемая насадка работает в двух циклах, попеременно отдавая и получая тепло от вытяжного воздуха.

В данной работе сделаны цифровые модели теплообменников с тремя различными сечениями: квадратное, гексагональное и круглое. При этом эквивалентные диаметры сечений и длина каналов равны. Моделировалось попеременное течение воздуха в канале при постоянных комнатной и уличной температурах. Получены данные и графически интерпретированы зависимости температуры на входе и выходе, коэффициента теплоутилизации от номера цикла.

Научный руководитель — канд. техн. наук В. Е. Жуков

УДК 536.4

Экспериментальное исследование влияния электрического поля на распределение температуры в пламени в форме конуса

К. Д. Лавронов

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Разработка систем стабилизации пламени в горелочных устройствах является актуальной задачей. Принцип работы систем управлением процессами горения заключается в регулировании количества, состава и скорости подачи топлива и окислителя, а также управление воздействием на область горения с помощью внешних факторов, таких как электрическое поле. Таким образом, помещение пламени во внешнее электрическое поле позволит добиться улучшения перемешивания топлива и окислителя, организации более интенсивного процесса сжигания, улучшения устойчивости фронта пламени, а также снижения вредных выбросов в горелочных устройствах.

Цель данной работы — экспериментально исследовать влияние постоянного электрического поля на ламинарное пламя предварительно перемешанной смеси в форме конуса. Акцент в работе сделан на количественной оценке распределения температуры при отсутствии и при электрического поля. В работе представлена визуализация отклонения фронта пламени под действием электрического поля, представлены оценки поля температуры, полученные на основе применения метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции молекул ОН. В предварительно перемешанной смеси в качестве топлива использовались метан и пропан, в качестве окислителя — воздух. Число Рейнольдса составляло $Re = 1000$, коэффициент избытка топлива был равен $\varphi = 0,95; 0,85$ для метана и пропана соответственно. Электрическое поле было организовано двумя параллельными металлическими пластинами, установленными вблизи сопла, расстояние между которыми варьировалось от 40 до 70 мм, меняя тем самым напряженность электрического поля между пластин. С помощью высоковольтного источника питания на электроды подавалось постоянное напряжение $U = 2,5$ кВ. В результате эксперимента были получены реализации среднего поля температуры для пламени пропано- и метановоздушной смесей без наложения внешнего электрического поля и с его наличием. В дальнейшем полученные данные могут быть использованы для верификации методов численного моделирования.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. РАН В. М. Дулин

Изучение гидродинамической кавитации на основе алгоритмического анализа экспериментальных данных

Д. В. Литвинова

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Кавитация возникает в потоке жидкости при понижении давления ниже порогового значения давления насыщенных паров воды. Схлопывание кавитационных пузырей вызывает эрозию поверхностей гидротехнического оборудования и разрушительно влияет на работу механизмов. Для понимания происходящих процессов требуется определять место локализации кавитационных пузырей и каверн, их размерные и частотные характеристики. Алгоритмический анализ данных позволяет значительно сократить время обработки входной информации.

В работе анализировались данные высокоскоростной визуализации кавитационного обтекания крыла НАСА 0012 (длина хорды 60 мм), расположенного в канале шириной 120 мм и высотой 1,2 мм. Расход воды в канале варьировался в диапазоне от 5,6 до 7,8 м³/с. Для обработки экспериментальных данных был разработан код в среде MATLAB для вычисления длины и определения частотных характеристик кавитационных полостей с помощью быстрого преобразования Фурье и последующего анализа полученных результатов. На первом этапе выполняется удаление крыла с изображения с помощью функции, включающей в себя способ детектирования объекта с использованием порогового метода по интенсивности. Второй шаг — это вычисление порога бинаризации каждого изображения согласно OTSU-методу с дальнейшим усреднением по всему видеоряду. Далее производилась бинаризация каждого кадра с использованием среднего порога бинаризации. Затем выполняется поиск внешней границы прикреплённой к крылу парогазовой полости. Координаты границы хранятся в виде массива целочисленных значений. Наименьшее расстояние между первой и последней точкой массива данных принято считать длиной каверны. Далее были построены графики зависимости мгновенной длины кавитационной полости от времени.

Замечена тенденция увеличения средней длины каверны с ростом скорости потока и уменьшением чисел кавитации (3,74–2,73). Значение безразмерных частотных характеристик лежит в диапазоне 0,29–0,6.

В работе проведена оценка скорости возвратного течения вблизи крыла. Построены поля скоростей внутри суперкавитационных полостей.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Ю. Кравцова

УДК 532.1

Ламинаризация турбулентного течения в цилиндрическом канале путем создания М-образного профиля средней скорости

А. А. Лукьянов, С. А. Пантелеев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Существует множество методов снижения сопротивления трения при движении текучих сред в каналах. Большинство из них основано на частичной ламинаризации той или иной области турбулентного пограничного слоя. Недавно в работе [1] при помощи специального устройства, представляющего собой систему направленных вдоль потока сот, удалось полностью ламинаризовать исходно развитое турбулентное течение и тем самым уменьшить гидравлическое сопротивление за этим устройством. Однако вопрос гидравлической эффективности всего участка трубы остается открытым, поскольку используемое в [1] устройство оказывало местное сопротивление такого же порядка величины. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка разработки устройства с большей гидравлической эффективностью.

Рассмотрено развитое турбулентное течение воды в прямом оптически прозрачном цилиндрическом канале диаметром 0,016 м и длиной 5 м при $Re < 5000$, где $Re = U_b D / \nu$ — число Рейнольдса, U_b — среднерасходная скорость, D — диаметр канала, ν — коэффициент кинематической вязкости. Предварительные эксперименты показали, что течение было симметричным относительно оси канала в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса. При исследовании механизма ламинаризации рассматривалось несколько устройств, характеризующихся различными диаметром и удлинением сот поперек канала.

С использованием одного из устройств удалось сформировать ламинарный, т. е. параболический, профиль скорости на всех рассматриваемых расстояниях (до $150D$) вниз по потоку вплоть до $Re = 3800$. Также результаты эксперимента показали, что существует оптимальный гидравлический диаметр сот. Анализ профилей скорости и турбулентных пульсаций показал, что наибольшая эффективность работы устройства с точки зрения ламинаризации наблюдается при формировании М-образного профиля продольной скорости за устройством.

1. Kühnen J., Scarselli D., Hof B. Relaminarization of pipe flow by means of 3d-printed shaped honeycombs // J. Fluids Engineering. 2019. Vol. 141, No. 11.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Д. И. Зарипов

Численное моделирование газового пузырька Тейлора в нагреваемой трубке при учете зависимости вязкости воды от температуры

Ан. А. Лукьянов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Одной из важных проблем двухфазных потоков является интенсификация тепло- и массообмена. Существует множество режимов двухфазных потоков в каналах, диаметр которых сопоставим с капиллярной постоянной. Одним из наиболее применимых является поток Тейлора. В этом случае поток разделяется на пузырьки и жидкие пробки. Пузырьки могут занимать практически все поперечное сечение канала [1]. Проблемы с теплопередачей связаны с большими перепадами температур. Теплофизические свойства среды могут значительно изменяться в зависимости от температуры. Существуют температурные диапазоны, в которых вязкость воды уменьшается в 6 раз: от 0 до 100 °С. В литературе широко изучается эффект переменной вязкости. Этому посвящено большое количество работ по ламинарному однофазному течению в круглых, прямоугольных и плоских каналах.

В данной работе было проведено моделирование движения пузырька Тейлора в круглом нагретом канале с использованием метода VOF [2]. В ходе расчета была установлена зависимость вязкости воды от температуры, полученная в результате аппроксимации табличных данных. Показано, что измеренная толщина пленки жидкости вокруг пузырька согласуется с теоретическими предсказаниями теорий [3]. В результате изменения вязкости от температуры скорость газового пузырька увеличивается в два раза по сравнению со случаем постоянной вязкости. Показано, что трение вблизи пузырька выше, чем в однофазной области.

1. Angeli P., Gavriilidis A. Hydrodynamics of Taylor flow in small channels: a review // Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mechanical Eng. Sci. 2008. Vol. 222, No. 5. P. 737–751.
2. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. Vol. 39, No. 1. P. 201–225.
3. Bretherton F.P. The motion of long bubbles in tubes // J. Fluid Mech. 1961. Vol. 10, No. 2. P. 166–188.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Вожаков

УДК 532.5

**Численное исследование подавления
прецессирующего вихревого ядра в модельной гидротурбине
Френсиса с помощью активных методов**

И. И. Лутченко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Гидроэнергетика играет важную роль в мировом энергетическом балансе. Для преобразования энергии потока воды в электрическую энергию применяются различные типы гидротурбин. Наиболее распространенными среди них являются турбины Френсиса. Тем не менее эти гидроагрегаты часто подвергаются неоптимальным режимам нагрузки, что ведет к формированию когерентной вихревой структуры в отсасывающей трубе (ОТ) гидротурбины — прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Данный спиральный вихрь генерирует пульсации давления высокой амплитуды. Существующие при этом вибрации негативно сказываются на конструкции гидротурбины. Следовательно, возникает необходимость научиться воздействовать на поток таким образом, чтобы уменьшить влияние ПВЯ.

Данная работа посвящена численному вихреразрешающему моделированию закрученного потока воздуха в модельной гидротурбине Френсиса и использованию активных методов подавления ПВЯ [1], а именно: инъекции струй воздуха постоянного расхода в осевом и радиальном направлении. Расчеты были проведены в программном комплексе OpenFOAM [2]. В докладе будет представлена стратегия управления и демонстрирующие ее эффект распределения скорости в ОТ и изоповерхности давления, изображающие структуру ПВЯ.

1. Litvinov I. et al. Active Control of the Vortex Induced Pressure Fluctuations in a Hydro Turbine Model via Axial and Radial Jets at the Crown Tip // Int. J. Fluid Machinery Syst. 2023. Vol. 16, No. 4. С. 320–331.
2. OpenFOAM. URL: <http://www.openfoam.com> (дата обращения: 14.02.2024).

Научный руководитель — Е. В. Палкин

Исследование эффективности теплообменной насадки сложной структуры

С. И. Мезенцев, Н. В. Кутузова, Д. А. Усов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В современном мире человек в среднем проводит в помещении 80 % своего времени. При этом в закрытых помещениях чаще всего отсутствуют системы принудительной вентиляции, вследствие чего происходит накопление углекислого газа, частиц пыли, бактерий и летучих органических соединений. На рынке существует много различных устройств, обеспечивающих поступление «нового» воздуха в помещение, но наиболее перспективным является рекуператор. Принцип работы рекуператора следующий. В первом полуцикле осуществляется приток свежего воздуха в помещение, а во втором происходит вытяжка отработанного воздуха. Приточный воздух нагревается теплотой уходящего воздуха. Обмен теплотой осуществляется в теплообменном модуле, который поставляется в комплекте с таким устройством.

В представленной работе исследуется эффективность теплообменной насадки сложной структуры. Поверхность теплообменной насадки описывается аппроксимированным уравнением: $\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0$. Для подбора оптимальной конфигурации теплообменной насадки необходимо определить зависимость коэффициента теплоутилизации, расхода и скорости выходящего воздуха от длины и размера структурного элемента насадки.

Установка представляет собой трубу, в которой устанавливались различные теплообменные насадки. Исследуемые образцы теплообменников сложной структуры изготавливались с помощью 3D-печати. Такая технология изготовления имеет преимущество ввиду послойного формирования насадки и позволяет изготавливать изделия сложной структуры и формы. Образец представляет собой цилиндр диаметром 140 мм и высотой не более 150 мм. Установка была оборудована измерительной системой: восьмиканальный измеритель ТРМ 148, преобразователь АС-4, хромель-копелевые термопары, анемометр и компьютер. Исследования были проведены в натуральных условиях при различных температурных режимах. Построены графики зависимости скорости выходящего воздуха, расхода воздуха и коэффициента теплоутилизации в зависимости от варьируемых параметров теплообменной насадки и начальных условий эксперимента.

Научный руководитель — канд. техн. наук В. Е. Жуков

УДК 662.7

Использование гидрата метана для интенсификации горения низкосортных угольных топлив

П. С. Нагибин

Томский политехнический университет

Ежегодно образуются сотни миллионов тонн отходов добычи и переработки угля и нефти, которые складываются [1]. Это вызывает риск их самовозгорания, а также приводит к загрязнению окружающей среды. Отходы угольной промышленности являются альтернативным источником энергии. Однако при их прямом сжигании образуется значительное количество твердых и газовых антропогенных выбросов [2]. Также вследствие высокой зольности для инициирования горения отходов углеобогащения требуются повышенные температуры, тепловые потоки и темпы нагрева. Для снижения антропогенных выбросов и повышения характеристик горения отходов углеобогащения в настоящей работе предлагается их совместное сжигание с гидратным газом. На сегодняшний день отсутствуют технологии использования гидратного газа для термической утилизации отходов угольной промышленности. Цель работы — определить характеристики совместного сжигания гидратного газа с отходами угольной промышленности.

По результатам выполненного исследования получено математическое выражение для прогностического определения размеров пламенной зоны горения. Этот параметр важен при проектировании камер сгорания. Использование гидрата метана позволило обеспечить повышение температуры горения и полноты выгорания топлива. Зафиксировано существенное снижение газовых антропогенных выбросов за счет наличия водяного пара в зоне горения и более полного выгорания твердого топлива. По результатам выполненных исследований разработан концепт технологической схемы совместного использования газогидрата с углем и отходами его обогащения. Использование такой технологии позволит решить три задачи: теплофикацию населения в труднодоступных районах, очистку воды от примесей для нужд оборудования и населения, утилизацию шламовых отходов.

Исследование выполнено в рамках проекта Приоритет-2030-НИП/ЭБ-006-375-2023 при финансовой поддержке НИ ТПУ.

1. Xinjie L. et al. Co-combustion of wheat straw and camphor wood with coal slime: Thermal behaviour, kinetics, and gaseous pollutant emission characteristics // Energy. 2021. Vol. 234. P. 121292.
2. Hosseini S. E. Fossil fuel crisis and global warming // Fundam. Low Emission Flameless Combust. Appl. Academic Press, 2022. P. 1–11.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. Н. Е. Шлегель

Управление охлаждением поверхности многокомпонентным импульсным спреем

А. Б. Науменко

Новосибирский государственный университет

Метод охлаждения нагретых поверхностей газочапельным потоком является одним из наиболее эффективных с точки зрения доли отводимой тепловой энергии. При таком методе охлаждения жидкость распыляется под высоким давлением через форсуночное устройство и образует тонкий слой пленки на нагретой поверхности. Сформированная пленка жидкости прогревается и испаряется с поглощением тепла от этой поверхности.

Процесс прогрева и испарения тонкой пленки жидкости зависит от ряда ключевых факторов, включая параметры спреинового распыления, тип и теплофизические свойства нагретой поверхности, тепловой напор, физико-химические свойства, а также параметры распыляемой жидкости. Из-за роста числа характеристик процессов испарения и прогрева тонкой жидкостной пленки активно развиваются различные математические модели [1]. С использованием методов математического моделирования динамики спреинового охлаждения удается определить целый ряд дополнительных характеристик протекающих процессов. Основная цель данного исследования — усовершенствовать существующий математический алгоритм для измерения динамики испарения и нагрева тонкой жидкостной пленки [2] с применением таких моделей неидеальных растворов, как уравнение Ван Лаара, UNIQUAC, UNIFAC и сравнение результатов теоретического моделирования с экспериментальными данными. В качестве охлаждающей жидкости использованы дистиллированная вода и растворы этанола. Имеющиеся данные позволяют установить теоретические и экспериментальные зависимости теплообмена.

1. Oubella M., Feddaoui M., Mir R. Numerical study of heat and mass transfer during evaporation of a thin liquid film // Thermal Sci. Serb. Soc. Heat Transfer Eng. 2015. Vol. 19, No. 5. P. 1805–1819.
2. Sazhin S. S., Rybdylova O., Crua C. A mathematical model for heating and evaporation of a multi-component liquid film // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd. 2018. Vol. 117. P. 252–260.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. М. Старинская

УДК 539.213.27

Влияние отношения толщин пленок α -Ge/Au на золото-индуцированную кристаллизацию аморфного германия

В. А. Непомнящих

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Тонкие пленки поликристаллического германия (poly-Ge) на низкотемпературных подложках представляют собой перспективный материал для использования в нано- и микроэлектронике. Одним из актуальных подходов для получения poly-Ge является металл-индуцированная кристаллизация (МИК). В данном исследовании была изучена золото-индуцированная кристаллизация аморфного германия (α -Ge) в зависимости от соотношения толщин пленок германия и золота.

Для эксперимента были изготовлены образцы в компоновке «кварц/Au/GeO_x/ α -Ge». Пленки Au толщиной 55 нм были нанесены на кварцевые подложки методом термовакуумного напыления. Затем с использованием метода магнетронного распыления были синтезированы слои α -Ge толщиной 2 нм. Образцы выдерживались в окружающей атмосфере в течение 72 ч для окисления и образования оксидных пленок германия в качестве мембранных слоев. Затем на структуру осаждались пленки α -Ge толщиной 60, 72, 96 и 140 нм. Отжиг образцов проводился в вакуумной камере при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Па и температуре 300 °С в течение 24 ч. Вакуумная камера была оснащена оптической системой для проведения *in situ* наблюдений за изменением морфологии полученных структур.

С помощью изображений поперечного среза образцов, полученных на сканирующем электронном микроскопе, было показано, что процесс МИК происходит в режиме обмена слоями. На спектрах комбинационного рассеяния света, как со стороны подложки, так и со стороны пленки, наблюдается интенсивный пик poly-Ge на 300 см^{-1} , что свидетельствует о формировании кристаллитов Ge. Можно сделать предположение, что лимитирующим фактором процесса обмена слоями является кристаллизация исходного слоя α -Ge. Установлено, что увеличение отношения толщины германия к золоту с 1 до 2,3 приводит к увеличению покрытия подложки пленкой poly-Ge с 20 до 100 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10079).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. А. Баранов

Изучение эффективности теплопередачи при некипящем распылительном охлаждении

К. А. Павленко

Новосибирский государственный технический университет

Спрейное охлаждение на данный момент является одним из наиболее эффективных методов охлаждения в таких отраслях, как электроника, аэрокосмическая промышленность и биомедицина, где имеются высокие тепловые нагрузки [1, 2].

В данном докладе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при спрейнном охлаждении с помощью однофазных форсунок с разными углами распыла (30–90°) и различных режимных параметрах, включая расстояние от форсунки до нагревателя (2–35 мм), плотность теплового потока (до 6,9 МВт/м²), скорость потока жидкости (8,8–25,2 мл/с) и начальную температуру жидкости (20 и 80 °С). Данное исследование посвящено всестороннему экспериментальному изучению влияния этих параметров.

Теплоотдающая поверхность представляла собой монокристаллическую кремниевую подложку (46 × 36 мм², толщина 460 мкм) с тонкопленочным нагревателем из оксида индия-олова (ИТО) (толщина 1 мкм, площадь 13 × 13 мм²). Поля температур были получены при использовании высокоскоростной инфракрасной камеры FLIR X6530sc с частотой съемки 1,5 кГц, разрешением 128 × 160 пикселей. Погрешности измерений составляют менее 1,8 % для плотности теплового потока q , 3,6 % для температуры импактной поверхности T_s и 5,4 % для коэффициента теплоотдачи h .

На основе анализа экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

– Теплообмен и равномерное распределение температуры по поверхности зависят от расстояния между соплом и поверхностью, и для каждого сопла и размера нагревателя существует оптимальное расстояние, которое максимизирует теплоотдачу в процессе некипящего спрейнного охлаждения.

– В некипящем режиме коэффициент теплоотдачи для глубоко недогретой жидкости ($\Delta T_{\text{sub}} = 80$ К) при различных расстояниях и для всех сопел остается практически неизменным от теплового потока.

– При увеличении начальной температуры жидкости до температуры 80 °С коэффициент теплоотдачи возрастает с увеличением плотности теплового потока.

1. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling — Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 115. P. 1174–1205.
2. Gao X., Li R. Spray impingement cooling: The state of the art // Adv. Cooling Technol. Appl. 2018. Vol. 5. P. 27–51.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. С. Суртаев

УДК 532.1

Влияние формы специального устройства-ламинаризатора на режим течения жидкости в цилиндрической трубе

С. А. Пантелеев, А. А. Лукьянов

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Существует множество методов активного и пассивного управления турбулентным потоком, в том числе с целью снижения гидравлического сопротивления. В основном эти методы направлены на частичную ламинаризацию потока. Недавно в работе [1] был предложен метод пассивного управления потоком, основанный на использовании специального устройства-ламинаризатора, представляющего систему направленных по потоку сот, с помощью которого удалось достичь полной ламинаризации турбулентного течения при $Re < 40000$. Принцип работы этого устройства заключается в создании М-образного профиля средней скорости на его выходной границе, что, согласно работам [1, 2], по-видимому, является одним из условий ламинаризации турбулентного течения. Интересно отметить, что течение за устройством не сразу ламинаризовалось, а наблюдался плавный переход от М-образного профиля скорости к параболическому по мере течения жидкости вниз по потоку на расстоянии $\sim 150D$, где D — диаметр цилиндрической трубы. В настоящей работе исследуется возможность формирования параболического профиля средней скорости непосредственно за устройством.

Для этого рассматривалось развитое турбулентное течение воды в цилиндрической трубе со встроенным модифицированным устройством, геометрия которого была аналогична рассмотренным в работах [1, 2], однако отличалась длиной сот поперек трубы: соты, расположенные в ядре потока, были короче сот, расположенных вблизи стенок трубы. Рассматривалось несколько устройств с различными удлинениями сот. С использованием метода PIV получены и далее проанализированы профили продольной и радиальной составляющих вектора скорости, а также турбулентных пульсаций, вдоль трубы.

1. Kühnen J. и др. Relaminarization by Steady Modification of the Streamwise Velocity Profile in a Pipe // *Flow, Turbul. Combust.* 2018. Vol. 100, No. 4. P. 919–943.
2. Лукьянов А. А., Ничик М. Ю., Пантелеев С. А., Зарипов Д. И. Экспериментальное исследование влияния специальных устройств на процесс ламинаризации развитого турбулентного течения в трубах // *Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики.* 2023. С. 69–73.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Д. И. Зарипов

Исследование влияния сильного электрического поля на конденсацию парогазовой смеси

В. Д. Пестрецова

Новосибирский государственный университет

Конденсация лежит в основе таких процессов, как производство аммиака, метанола, очистка отходящих газов, работа холодильных устройств, сушильных машин, а также многих фармацевтических производств. Постоянное совершенствование технологических процессов требует создания все более эффективных устройств. Одно из решений в этом направлении — метод интенсификации конденсации. Одним из способов является использование специальных структур на поверхности конденсации [1]. Другой метод — применение электрического поля [2, 3], который и будет рассмотрен в данной работе.

Для исследования влияния электрического поля на скорость конденсации была собрана установка, состоящая из внутреннего и внешнего короба из оргстекла. Во внутреннем коробе установлена емкость с жидкостью, емкость для сбора сконденсированной жидкости и плоский конденсатор, одна из обкладок которого охлаждается при помощи теплообменника. В течение эксперимента во внешнем коробе поддерживается повышенная температура для предотвращения конденсации пара на стенках внутреннего короба. Во внутренней, внешней полости и на электроде установлены термомпары для поддержания одинаковых условий эксперимента. Скорость конденсации устанавливается по объему жидкости, собранной в емкость под электродом.

1. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А. Эффективные поверхности теплообмена // Энергоатомиздат. 1998. С. 84–103.
2. Bologa M. K., Grosu F. P., Polikarpov A. A., Motorin O. V. Condensation of a Gas-Vapor Mixture in an Electric Field // Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2009. P. 125–127.
3. Didkovsky A. B., Bologa M. K. Vapour film condensation heat transfer and hydrodynamics under the influence of an electric field // Int. J. Heat Mass Transfer. 1981. P. 811–819.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Чеверда

УДК 532.542.3, 532.5.032

Линейная устойчивость ламинарной затопленной струи: непараллельные эффекты

А. Е. Саввинов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Объектом исследования работы является ламинарная затопленная струя Ландау — Сквайра. Затопленная струя представляет собой струю, истекающую из круглого сопла в неограниченное пространство, заполненное той же жидкостью. Базовое автомодельное решение уравнения Навье — Стокса для аксиально-симметричной струи известно. Возмущение базового решения рассматривается в дальнем поле струи при непараллельном подходе, учитывающем турбулентные эффекты. Вид возмущений поля скорости и давления взят из работы Р. И. Мулляджанова и Н. И. Яворского [1]. Для нахождения решения для возмущений и построения спектральной задачи был использован метод коллокаций с полиномами Чебышева в качестве ортогональных функций. Метод реализовывался с помощью программы, написанной в среде Matlab версии R2020b, что обусловлено удобством работы с матрицами. Исследовалась зависимость спектра значений продольного волнового числа возмущений от параметров: числа точек коллокаций, обобщенной частоты и числа Рейнольдса; находились собственные функции.

Струйные течения имеют место во множестве технологических задач, что делает их одним из базовых объектов исследования в гидродинамике. Знание зависимости параметров струйного течения от начальных условий дает возможность контролировать струю для дальнейших практических применений.

1. Яворский Н. И., Мулляджанов Р. И. Линейная гидродинамическая устойчивость дальнего поля затопленной ламинарной струи // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2018. Т. 11, № 3. С. 108–121.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

УДК 544.032.65

Металл-индуцированная кристаллизация аморфного кремния, инициированная наносекундными импульсами лазерного излучения

Ф. А. Самохвалов, М. М. Васильев, Н. И. Смирнов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Тонкопленочные поликристаллические кремниевые структуры — это основные материалы для современных технологий в таких областях, как микроэлектроника, наноэлектроника, оптоэлектроника, фотовольтаика. Для промышленности очень важно получение подобных структур на дешевых, легкоплавких подложках, таких как стекло или пластик. Традиционные методы получения поликремния включают в себя переход предварительно осажденного аморфного кремния в поликристаллическое состояние путем длительного отжига в вакууме. Такой процесс требует высоких температур, более 600 °С, при которых неизбежно повреждается подложка.

Существуют альтернативные методы, например, металл-индуцированная кристаллизация (МИК) позволяет снизить характерные температуры процесса на сотни градусов, до 175 °С в случае использования золота. Но МИК — длительный процесс, он занимает десятки часов и требует глубокого вакуума. Другой подход — лазерно-индуцированная кристаллизация (ЛИК). К ее основным преимуществам можно отнести высокую скорость процесса, возможность исключить глубокий вакуум. Однако локальность поглощения лазерного излучения приводит к неравномерной кристаллизации пленки.

Цель данной работы — исследовать метод лазерной металл-индуцированной кристаллизации, включающей в себя достоинства МИК и ЛИК. В качестве донорного металла выбрано золото, так как это один из самых популярных металлов для металл-индуцированной кристаллизации, который образует с кремнием точку эвтектики с самой низкой температурой, не окисляется, не образует силициды, используется для синтеза плазмонных наночастиц. В ходе исследования лазерной металл-индуцированной кристаллизации были изучены два режима облучения: в первом поглощающим слоем был аморфный кремний, во втором — золото. Проведены эксперименты с разной морфологией золота, а также при разных фоновых условиях: в воздухе и вакууме.

Проведенное исследование показало, что метод лазерной золото-индуцированной кристаллизации нестехиометрического субоксида кремния позволяет кристаллизовать кремний в широком диапазоне условий. Добавление слоя золота значительно понижает энергетический порог кристаллизации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10079).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук С. В. Старинский

УДК 536.242

Исследование поведения капли водно-спиртового раствора в электрическом поле

Е. А. Сендир

Новосибирский государственный университет

Изучение взаимодействия жидкости с электрическим полем является важной фундаментальной задачей гидродинамики и электрофизики. Понимание механизмов деформации и движения капель в электрическом поле имеет большое практическое значение для создания и оптимизации различных технологических процессов и устройств [1]. Особый интерес представляют исследования поведения капель водно-спиртовых растворов. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью проведения систематических, экспериментальных и теоретических исследований зависимости траектории и формы капли при ее движении от параметров жидкости и напряженности электрического поля.

Цель данной работы — определить принципы воздействия электрического поля на каплю жидкости, построить графики зависимости высоты падения капли от напряженности поля. Методика эксперимента заключалась в следующем: на экспериментальном стенде устанавливалась напряженность электрического поля конденсатора, с помощью шприца с поршневым механизмом производился запуск капель жидкостей, а именно: дистиллированной воды, этилового спирта и водно-спиртового раствора с массовой долей спирта 50 %. Процесс падения капли фиксировался высокоскоростной камерой Phantom VEO710.

В ходе эксперимента было выдвинуто предположение о причине изменения траектории капли: причиной стало явление ионизации и последующей поляризации молекул жидкостей [2]. Также рассматривалось изменение формы капли вследствие образования конуса Тейлора, особой пространственной конфигурации капли электропроводящей жидкости [3]. Результаты работы могут быть полезны для понимания физических свойств жидких растворов. Также результаты могут быть использованы при создании различных устройств, применяющихся в разнообразных сферах.

1. Bararnia H., Ganji D. D. Breakup and deformation of a falling droplet under high voltage electric field // *Adv. Powder Technol.* 2013. Vol. 24 (6). P. 992–998.
2. Хомченко И. Г. *Общая химия: учебник. 2-е изд., испр. и доп.* М.: Новая волна, 2021. 463 с.
3. Luo X., Huang X., Yan H. et al. Breakup modes and criterion of droplet with surfactant under direct current electric field // *Chem. Eng. Res. Design.* 2018. Vol. 132. P. 822–830.

Научные руководители — канд. физ-мат. наук Е. М. Старинская,
канд. техн. наук Н. Б. Миськив

Численное исследование эффекта резкого увеличения обратного потока при сверхзвуковом истечении газа из двух соосных кольцевых сопел в камеру низкого давления

А. И. Скорюпин

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Применение сверхзвуковых течений актуально для различных аэрокосмических приложений и вакуумных технологий. Так, в последнее время активно развивается газоструйный плазмохимический метод с использованием электронного пучка, проходящего через осевой канал с откачкой газа. В данном методе подача газа в реактор осуществляется через два соосных кольцевых сопла: через внешнее сопло подается рабочий газ, тогда как через внутреннее сопло подается защитный газ, который обеспечивает защиту осевого канала электронного пучка от действия фонового газа. Оптимизация параметров работы кольцевых сопел является сложной многопараметрической задачей, актуальной для многих практических приложений. В данной работе исследуется эффект резкого увеличения обратного потока аргона через осевой канал при увеличении расхода через внешнее сопло.

Для расчета сверхзвукового истечения в камеру с низким давлением использовалось решение уравнений сплошной среды в рамках пакета ANSYS Fluent. Рабочий объем задается в виде цилиндра длиной 170 мм и диаметром 40 мм. На одном из торцов расположены два кольцевых сопла с высотой критического сечения 0,1 мм. Соосно соплам расположен обратно направленный осевой канал электронной пушки диаметром 9 мм. Через внутреннее сопло задавался фиксированный расход аргона ($1 \text{ м}^3/\text{ч}$). Тогда как через внешнее сопло расход варьировался в диапазоне от 0 до $9 \text{ м}^3/\text{ч}$. Рассматривалось два случая: с открытым и закрытым осевым каналом.

Проведен анализ влияния расхода газа на обратный поток в осевой канал электронного пучка. При заданном фиксированном расходе через внутреннее сопло при изменении расхода через внешнее сопло от 0 до $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ обратный поток является постоянным. При дальнейшем увеличении расхода через внешнее сопло ($> 5 \text{ м}^3/\text{ч}$) наблюдается резкое увеличение обратного потока. Аналогичный эффект наблюдается при течении с закрытым осевым каналом: при повышении расхода наблюдается резкое увеличение давления в осевом канале электронного пучка. Величина обратного потока напрямую влияет на параметры работы электронной пушки. Полученные результаты позволяют проводить исследования эффекта резкого увеличения давления с закрытым осевым каналом, что значительно упрощает задачу.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. А. Морозов

УДК 536.242

Эволюция геометрии капли жидкости на природных и биомиметических поверхностях в постоянном электрическом поле

Н. И. Смирнов

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Исследование процесса испарения капель с различных поверхностей является актуальной задачей, которая широко исследуется и имеет множество технических приложений (интенсификация теплообмена, осаждение коллоидных растворов) [1]. Особый интерес представляют биомиметические поверхности, которые повторяют свойства некоторых природных поверхностей. В данной работе использовались бифильные поверхности — супергидрофобные поверхности с супергидрофильными участками, на которых располагались капли. Подобные поверхности имеют большой потенциал в различных приложениях, так как могут быть использованы для контролируемого движения жидкостей, управляемого осаждения и интенсификации теплообмена. Также большой интерес представляют исследования изменения геометрии капель в электрическом поле [2]. В настоящей работе проведено исследование эволюции геометрии капель воды, находящихся на бифильной поверхности [3] и лепестке розы при испарении в постоянном электрическом поле различной напряженности. Получены данные о динамике геометрии капель от напряженности поля для используемых поверхностей. Найдено, что с увеличением напряженности поля высота капли растет нелинейно. Результаты данной работы позволят расширить представления о кинетике испарения, динамике геометрии капель при воздействии электрического поля.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800214-7).

1. Vancauwenberghe V., Di Marco P., Brutin D. Wetting and evaporation of a sessile drop under an external electrical field: A review // Colloids Surf. A: Physicochemical Engineering Aspects. 2013. Vol. 432. P. 50–56.
2. Wang B. B. et al. Molecular dynamics simulation on evaporation of water and aqueous droplets in the presence of electric field // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. Vol. 73. P. 533–541.
3. Starinskaya E. et al. Evaporation dynamics of sessile and suspended almost-spherical droplets from a biphilic surface // Water. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 273.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук С. В. Старинский

Экспериментальное исследование структуры вихревого течения в газовихревом биореакторе с плавающей шайбой

М. В. Тинтулова^{1,2}, Б. Р. Шарифуллин¹

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

Исследование структуры течения в газовихревом биореакторе актуально для развития методов выращивания клеточных культур [1, 2]. Особенно это важно в том случае, когда при росте культуры в биореакторе могут существенно изменяться такие параметры среды, как плотность и вязкость культуральной среды, что, соответственно, приводит к изменению характерных режимов течения. Возникает проблема установки оптимальных режимов течения без высокотурбулентных пульсаций и застойных зон. Поэтому детальное исследование закономерностей режимов течения в газовихревом реакторе имеет большой фундаментальный и прикладной интерес.

Исследования проводились в стеклянном универсальном газовихревом биореакторе объемом 8,5 л, со стабилизирующей движение рабочей жидкости шайбой, свободно плавающей на поверхности рабочей жидкости. Определены закономерности вихревого движения культуральной среды в зависимости от ее объема и интенсивности вращения активатора, генерирующего вихревое движение в воздухе. Экспериментально показано, что при вращении активатора под шайбой возникает центробежная меридиональная циркуляция, вблизи оси биореактора формируется восходящая закрученная струя, а при увеличении угловой скорости вращения активатора формируется пузырьревидный распад вихря в приосевой области биореактора.

Установлено, что, несмотря на сложную конфигурацию стабилизирующего поток устройства — свободно плавающей шайбы, наблюдаемая вихревая структура и ее динамика при увеличении интенсивности закрутки потока совпадает со структурой ограниченного вихревого потока в цилиндрическом контейнере как для одножидкостных, так и для несмешиваемых двухжидкостных конфигураций.

1. Мертвецов Н., Рамазанов Ю., Репков А. и др. Газовихревые биореакторы «Биок»: Использование в современной биотехнологии. Новосибирск: Наука, 2002. 118 с.

2. Naumov I. V., Gevorgiz R. G., Skripkin S. G., Sharifullin B. R. Experimental investigation of vortex structure formation in a gas-vortex bioreactor // Thermophys. Aeromech. 2022. Vol. 29 (5). P. 719–724.

Научный руководитель — д-р техн. наук И. В. Наумов

УДК 532.5, 004.89

**Предсказание длины и скорости снарядов
при течении несмешивающихся жидкостей в микроканалах
с использованием методов машинного обучения**

Г. Р. Туркия

Новосибирский государственный университет
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

В последнее время в науке и промышленности активно используются микроканалы. Они получают довольно широкое распространение, так как их использование позволяет существенно увеличить отношение площади поверхности к заключенному в ней объему по сравнению с крупными реакторами, что, в свою очередь, приводит к интенсификации процессов тепло- и массообмена. Данный эффект используется, в частности, в химических реакторах, при работе с биологическими объектами малых размеров, для охлаждения процессоров и т. д. Однако, несмотря на уже довольно широкое применение, в настоящее время гидродинамика двухфазных течений в микроканалах еще не до конца изучена. В частности, довольно слабо изучены зависимости длин и скоростей снарядов от геометрических параметров канала, физических свойств фаз, расходов фаз и других параметров. Эти зависимости необходимы для проектирования микрофлюидных систем, эффективного расчета их рабочих параметров, контроля течений жидкостей в микроканалах и, следовательно, для интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Цель данной работы — применить методы машинного обучения для предсказания длин и скоростей снарядов при течении несмешивающихся жидкостей в микроканалах в широком диапазоне физических свойств фаз, при вариации геометрии микроканала, а также расходов фаз. Для решения поставленной задачи была создана база данных значений длины и скорости снарядов при вариации расходов фаз, геометрии канала и физических свойств жидкостей, полученных в результате визуализации течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах. Проведено исследование возможности применения различных подходов машинного обучения для решения поставленной задачи: линейной регрессии, нелинейной регрессии, градиентного бустинга, искусственных нейронных сетей. На основе метрик была выбрана наилучшая модель и установлены ее оптимальные параметры.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Ягодницына

Осаждение наноструктур вольфрама методом импульсного лазерного осаждения из газовой фазы

Т. И. Харченко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

За последнее десятилетие аддитивные технологии приобрели значительное распространение и применяются в различных отраслях, включая авиацию, медицину, автомобильную промышленность и производство оборудования. Несмотря на это, существующие методы изготовления ограничены в выборе материалов и размеров изделий. Для преодоления подобных ограничений активно используется метод лазерного химического осаждения из газовой фазы, который особенно перспективен для производства в условиях космоса.

Процедура осаждения проходила в реакторе, нагретом до определенной температуры, в результате чего пары прекурсора, в качестве которого был использован $W(CO)_6$, переносились к мишени под воздействием непрерывной прокачки аргона. Лазерное излучение импульсного твердотельного Nd:YAG-лазера фокусировалось на мишени, что приводило к росту наноструктур в результате воздействия лазера. Наблюдение за динамикой роста проводилось с помощью системы визуализации. Для анализа морфологии и состава образцов использовались методы сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

В ходе работы была отработана методика осаждения наноструктур методом LCVD, а также собрана система для непосредственного наблюдения за процессами роста. Установлено время образования зародыша с заданной плотностью энергии и длиной волны лазерного излучения. Проанализирован состав осаждаемых структур. Выращены наноструктуры вольфрама согласно заданному шаблону.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800214-7).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук С. В. Старинский

УДК 544.72

Взаимодействие капель и частиц перспективных компонентов композиционных топлив

С. А. Шуляев

Томский политехнический университет

Столкновение капель с частицами в воздухе является обычным явлением в различных отраслях промышленности, таких как распылительная сушка и охлаждение [1], нанесение покрытий на медицинские изделия [2], очистка дымовых газов [3]. Столкновениям частиц и капель также уделяется большое внимание в области охраны окружающей среды [3]. Цель работы — установить основные закономерности столкновения капель и твердых частиц при различных условиях их взаимодействия и варьирования параметров окружающей среды, соответствующих топливным технологиям.

Изучались столкновения капель жидкостей (вода, моторное масло) с угольными частицами (размеры капель и частиц 0,1–3 мм). Экспериментальные исследования проведены согласно методике, представленной в работе [3]. В результате экспериментальных исследований установлены режимы взаимодействия (агломерация, разрушение), построены режимные карты. Определены коэффициенты аппроксимационных выражений, описывающих границы режимов взаимодействия, с помощью которых возможно прогнозировать их смещения между режимами агломерация и разрушение для различных компонентов топливных смесей. Показано, что для достижения устойчивой агломерации капли воды и угольной частицы требуется небольшая относительная скорость движения, которую можно получить путем изменения угла атаки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-71-10040).

1. Cotabarren I. M., Bertín D. Modelling of the spray drying process for particle design // Chem. Eng. Res. Design. 2018. Vol. 132. P. 1091–1104.
2. Bolleddula D. A., Berchielli A., Aliseda A. Impact of a heterogeneous liquid droplet on a dry surface: Application to the pharmaceutical industry // Adv. Colloid Interface Sci. 2010. Vol. 159. P. 144–159.
3. Islamova A., Tkachenko P., Pavlova K., Strizhak P. Interaction between Droplets and Particles as Oil–Water Slurry Components // Energies. 2022. Vol. 15, No. 21. P. 8288.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Г. Исламова

УДК 536

Вскипание перегретой воды, истекающей через короткий овалный канал

В. А. Шурупов

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург
Институт теплофизики УО РАН, Екатеринбург

Актуальность исследования взрывного вскипания струй жидкостей обусловлена их широким использованием в различных технических приложениях, в частности в двигателях внутреннего сгорания, где требуется организация высокоточной подачи топлива, а также качественного смесеобразования для улучшения топливной экономичности двигателя и снижения токсичности отработавших газов [1].

Проведено экспериментальное изучение динамики вскипания струи перегретой воды, истекающей из камеры высокого давления через короткий овалный канал длиной $l = 1$ мм и гидравлическим диаметром, равным $d = 0,4$ мм. Истечение жидкости происходило в неподвижную воздушную среду при комнатной температуре и атмосферном давлении. Начальные параметры жидкости в рабочей камере соответствовали условиям бинодали и изменялись в соответствующих пределах: $T = 383\text{--}573$ К, $p = 0,1\text{--}8,6$ МПа.

Ранее были проведены опыты с каналами различного поперечного сечения: прямоугольник, квадрат [2], полуцилиндр, круг. Исследования позволили выявить некоторые особенности в поведении истекающей среды, в частности полное раскрытие вскипающей жидкости.

В данной работе, являющейся продолжением комплексного изучения динамики вскипания сильно перегретой воды, истекающей через каналы некруглого сечения, были изучены форма, изменение угла раскрытия и капельный состав струи. В ходе опытов было выявлено проявление инверсии струи. Установлено отсутствие полного раскрытия потока во всем исследованном температурном интервале.

1. Марков В. А., Савельев М. А., Селиванов А. В. Способ улучшения экологических показателей дизелей // Автомобильная промышленность. 2014. № 8. С. 8–10.
2. Бусов К. А., Мажейко Н. А. Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал квадратного сечения // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 2. С. 316–320.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук К. А. Бусов,
д-р техн. наук, доц. Л. В. Плотников

УДК 536.25

Влияние нестационарного набегающего потока нагретой жидкости на поле температуры в тонкой стенке в режимах тепловой гравитационно-капиллярной конвекции

Е. А. Юровских^{1,2}, А. В. Михайлов²¹Новосибирский государственный университет²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Многие технические тонкостенные конструкции могут работать в режимах разогрева или охлаждения. Например, при нестационарных условиях нагрева или охлаждения обшивки летательных аппаратов (ЛА) в полостях с жидкостями возникают существенные перепады температуры и развивается нестационарная конвекция. Для расчетов термических напряжений в стенках и оценок ресурса любой тонкостенной конструкции требуются достоверные знания о теплообмене и о распределениях градиентов температуры.

Экспериментально исследовано развитие нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в прямоугольной полости, заполненной имитатором топлива — этиловым спиртом. Конвективное течение возникает после включения нагрева одной из вертикальных стенок. После нагрева критической массы жидкости у стенки формируется подъемный поток жидкости под действием сил плавучести, затем нагретый этиловый спирт поднимается к свободной верхней поверхности и начинает двигаться вдоль нее. Природа развивающегося течения тепловая гравитационно-капиллярная из-за наличия свободной границы слоя жидкости, где при наличии градиента температуры действует термокапиллярный эффект. Нагретая жидкость натекает на противоположную холодную вертикальную стенку.

Проведена тепловизионная съемка полей температуры на свободной поверхности и на внешней стороне тонкой стенки. Гидродинамика исследовалась с помощью цифровой видеосъемки с визуализацией течения добавлением в жидкость частиц-трассеров. Обработка тепловизионных фильмов позволила получить распределения температуры вдоль свободной поверхности жидкости и по высоте тонкой стенки в различные моменты времени. Получены спектры мощности пульсаций температуры на поверхности набегающего потока и на внешней поверхности тонкой металлической стенки. Изучена эволюция во времени конвективных ячеек на свободной поверхности этилового спирта как источника пульсаций температуры в набегающем потоке. Исследовано развитие пограничных слоев на вертикальных стенках прямоугольной полости, построены профили горизонтальной и вертикальной компонент скорости жидкости в различные моменты времени.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. С. Бердников

Влияние постоянного электрического поля на скорость испарения капли воды

А. Д. Юсупова

Новосибирский государственный университет

Электрическое поле оказывает влияние на динамику испарения жидкости, что открывает новые возможности для контроля и управления этим процессом [1–4]. Работы [1–5] предоставляют важные данные о влиянии электрического поля на процессы испарения капель и подчеркивают роль поверхностных свойств.

Недавние исследования подчеркивают значительное влияние поверхностных свойств и электрического поля на процессы испарения капель [2]. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию испарения капли дистиллированной воды в условиях наличия и отсутствия постоянного электрического поля.

Основная цель — исследовать влияние электрического поля на кинетику испарения капли на различных поверхностях.

Экспериментальное исследование процесса естественного испарения капли дистиллированной воды было проведено на бифильной и кремниевой поверхностях. На бифильной поверхности электрическое поле замедляет процесс испарения, изменяя размер капли и ее вертикальное положение. Результаты указывают на потенциальные перспективы использования бифильных поверхностей в различных приложениях, где требуется контроль над процессами испарения. Подобные исследования могут способствовать развитию новых методов управления испарением жидкости и созданию функциональных поверхностей в различных технологических областях.

1. Almohammadi H., Amirfazli A. Sessile drop evaporation under an electric field // *Colloids Surf. A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2018. Vol. 555. P. 580–585.
2. Pan Z., Weibel J.A., Garimella S.V. Influence of surface wettability on transport mechanisms governing water droplet evaporation // *Langmuir*. 2014. Vol. 30, No. 32. P. 9726–9730.
3. Manoudis P.N., Gemenetzi D., Karapanagiotis I. A comparative study of the wetting properties of a superhydrophobic siloxane material and rose petal // *Sci. Cult.* 2017. Vol. 3, No. 7.
4. Wang B.B. et al. Molecular dynamics simulation on evaporation of water and aqueous droplets in the presence of electric field // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 533–541.
5. Qi W., Li J., Weisensee P.B. Evaporation of sessile water droplets on horizontal and vertical biphobic patterned surfaces // *Langmuir*. 2019. Vol. 35, No. 52. P. 17185–17192.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. М. Старинская



ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук, проф. *С. В. Цыбуля*

Ответственный секретарь секции — *В. В. Никулин*

Экспертный совет подсекции «Биомедицинская физика»:

д-р физ.-мат. наук, проф. *В. П. Мальцев*; д-р хим. наук *Н. Э. Поляков*;
д-р физ.-мат. наук *О. А. Крумкачева*; канд. физ.-мат. наук *В. М. Некрасов*;
канд. физ.-мат. наук *В. В. Яньшолё*; канд. физ.-мат. наук *Д. И. Строкотов*;
канд. физ.-мат. наук *А. Г. Марьясов*; канд. физ.-мат. наук *А. В. Чернышев*

Экспертный совет подсекции «Физические методы исследования функциональных материалов и наносистем»:

акад. РАН *В. В. Болдырев*; д-р физ.-мат. наук, проф. *С. В. Цыбуля*;
д-р хим. наук, проф. *Е. В. Болдырева*; д-р физ.-мат. наук *Я. В. Зубавичус*;
д-р физ.-мат. наук *С. А. Громилов*; д-р физ.-мат. наук *А. Н. Шмаков*;
д-р хим. наук *Б. А. Захаров*; д-р хим. наук *В. А. Садыков*;
канд. физ.-мат. наук *Д. А. Яценко*; канд. физ.-мат. наук *С. Н. Трухан*;
канд. хим. наук *О. А. Булавченко*; канд. хим. наук *С. Г. Архипов*;
канд. геол.-минерал. наук *С. В. Ращенко*; канд. физ.-мат. наук *И. В. Яковлев*;
канд. хим. наук *Е. А. Лосев*; канд. хим. наук *И. А. Туманов*; *В. В. Никулин*

Экспертный совет подсекции «Химическая и биологическая физика»:

д-р физ.-мат. наук, проф. *С. А. Дзюба*; д-р физ.-мат. наук *С. Л. Вебер*;
канд. физ.-мат. наук *А. М. Дмитриев*; канд. физ.-мат. наук *А. Э. Художитков*;
канд. физ.-мат. наук *В. М. Голышев*; канд. физ.-мат. наук *И. В. Жуков*;
канд. физ.-мат. наук *К. С. Ершов*; канд. физ.-мат. наук *К. А. Окотруб*

PHYSICAL METHODS IN NATURAL SCIENCES

Section Head — Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *S. V. Tsybulya*

Responsible Secretary — *V. V. Nikulin*

Section scientific committee “Biomedical Physics”:

Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *V. P. Maltsev*; Dr Chem. Sci. *N. E. Polyakov*;
Dr Phys.-Math. Sci. *O. A. Krumkacheva*; Cand. Phys.-Math. Sci. *V. M. Nekrasov*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Chernyshev*; Cand. Phys.-Math. Sci. *V. V. Yanshole*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *D. I. Strokotov*; Cand. Phys.-Math. Sci. *A. G. Maryasov*

Section scientific committee “Physical methods of functional materials and nanosystems”:

Acad. *V. V. Boldyrev*; Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *S. V. Tsybulya*;
Dr Chem. Sci., Prof. *E. V. Boldyreva*; Dr Phys.-Math. Sci. *Ya. V. Zubavichus*;
Dr Phys.-Math. Sci. *S. A. Gromilov*; Dr Phys.-Math. Sci. *A. N. Shmakov*;
Dr Chem. Sci. *B. A. Zakharov*; Dr Chem. Sci. *V. A. Sadykov*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *S. N. Trukhan*; Cand. Chem. Sci. *O. A. Bulavchenko*;
Cand. Chem. Sci. *I. A. Tumanov*; Cand. Geol.-Miner. Sci. *S. V. Rashchenko*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *D. A. Yatsenko*; Cand. Phys.-Math. Sci. *I. V. Iakovlev*;
Cand. Chem. Sci. *S. G. Arkhipov*; Cand. Chem. Sci. *E. A. Losev*; *V. V. Nikulin*

Section scientific committee “Chemical and Biological Physics”:

Dr Phys.-Math. Sci., Prof. *S. A. Dzyuba*; Dr Phys.-Math. Sci. *S. L. Veber*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *A. M. Dmitriev*; Cand. Phys.-Math. Sci. *A. E. Khudozhitkov*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *V. M. Golyshev*; Cand. Phys.-Math. Sci. *I. V. Zhukov*;
Cand. Phys.-Math. Sci. *K. S. Ershov*; Cand. Phys.-Math. Sci. *K. A. Okotrub*

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

УДК 577.359

Use sliding window to detect burst and pause in spike trains of patients with movement disorders

Houchun Zhou

Moscow Institute of Physics and Technology

Movement disorders are categorized as a group of neurological symptoms or diseases, such as Parkinson disease, tics, and dystonia [1]. The basal ganglia are an important part of the human brain involved in the coordination of movements. A neuronal spike train is a sequence of action potentials produced by a neuron, and this is a kind of time series, each spike has a unique timestamp. Burst is several spikes in a short time, and pause is no spike in a period of time [2]. Burst and pause are important pattern in spike trains, their accurate detection would be very helpful for human understanding of brain activity [3], especially specific types of neuronal activity in patients with movement disorders.

In this work, we analyze the spike train with sliding window, a classical method used to analyze time series. The aim is to use the changing tendency of spike in spike train to identify the burst and pause, and to detect them.

We tested this method to analysis basal ganglia spike train in patients with movement disorders. The results shows that use slide window to do burst and pause detection task, is more objective than other methods exist, because this method don't rely on too many parameters, moreover this method considers the time structure of spike train.

Next, we are going to test this method on different basal ganglia spike trains.

1. Abdo W. F., Van De Warrenburg B. P. C., Burn D. J. et al. The clinical approach to movement disorders // *Nat. Rev. Neurology*. 2010. Vol. 6 (1). P. 29–37.
2. Ko D., Wilson C. J., Lobb C. J. et al. Detection of bursts and pauses in spike trains // *J. Neurosci. Meth.* 2012. Vol. 211 (1). P. 145–158.
3. Morozova E. O., Myroshnychenko M., Zakharov D. et al. Contribution of synchronized GABAergic neurons to dopaminergic neuron firing and bursting // *J. Neurophysiology*. 2016. Vol. 116 (4). P. 1900–1923.

Scientific supervisor — Dr Biol. Sci., Assoc. Prof. A. S. Sedov

УДК 531.7

Физико-математическая схема замещения вестибулярного аппарата для многоканальной стимуляции органов внутреннего уха

М. Д. Акинина

Томский государственный университет

Новое понимание вестибулярной сенсорной системы и ее функционального значения значительно улучшалось на протяжении многих лет при помощи экспериментальных исследований с использованием различных видов позвоночных, как следствие, понимание их анатомии и физиологии. Ключевую роль в механизме механоэлектрической трансдукции у позвоночных играют волосковые клетки, которые находятся во всех периферических структурах, отвечающих за слух и равновесие.

Для исследования спектральной чувствительности волосковых клеток нами разработана физико-математическая модель распространения электрического гармонического сигнала через ткани отолитовой системы. Актуальность частотного анализа реакции отолитовых структур на внешний электрический стимул обусловлена наличием в их функционировании двух главных физиологических механизмов: внешнего механизма, в котором внешний стимул фильтруется до трансдукции волосковой клетки, и внутреннего, в котором фильтрация присуща самой волосковой клетке.

Разработана физико-математическая модель распространения электрического гармонического сигнала через ткани отолитовой системы. Электрофизическая модель замещения отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного (крысы) представлялась в виде совокупности проводящих и диэлектрических областей на основе анатомической структуры, определенной из МРТ/КТ-снимков. Эквивалентная электрическая схема замещения отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного (крысы) представлялась на основе измеренных удельных электрофизических характеристик тканей отолитовых структур с учетом изменяющейся ионной проводимости и колебательного характера рецепторного потенциала волосковых клеток.

Результаты работы подтверждают, что исследования на животных моделях эффективны для разработки новых методов лечения, лекарств и имплантатов для пациентов с вестибулярной дисфункцией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-25-00259).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин

УДК 615.8

Применение источника генерации рентгеновского излучения X-RAD 320 для изучения радиопротекторных и радиосенсибилизирующих эффектов соединений в экспериментах *in vivo* и *in vitro*

М. А. Алешкова

Новосибирский государственный университет

Рак остается одной из ведущих причин смерти во всем мире. Для борьбы с онкологией были разработаны различные методы лечения, среди которых лучевая терапия (ЛТ) получила широкое распространение и считается эффективным способом уничтожения опухолей за счет повреждения ДНК клеток и снижения их способности к делению. Однако многие опухоли чрезвычайно радиорезистентны, что обуславливает актуальность поиска соединений, увеличивающих чувствительность раковых клеток к воздействию ионизирующего излучения. Кроме того, защита нормальных тканей во время проведения курса ЛТ также является важной стратегией для улучшения прогноза и качества жизни онкологических больных, обуславливая актуальность поиска радиопротекторов.

Цель работы — поиск препаратов с радиопротекторными и радиосенсибилизирующими эффектами.

Нами были изучен препарат «Димефосфон» на наличие потенциальных радиопротекторных свойств. Для этого было сформировано 3 группы мышей ($n = 7$) линии CD-1 (группа 1 — получали препарат в дозе 750 мг/кг, группа 2 — препарат + тотальное облучение 5 Гр, группа 3 — облучение 5 Гр), у которых забиралась кровь на протяжении 14 дней, и на 14-й день тонкий кишечник и селезенка были забраны на гистологическое исследование. Кроме того, нами были изучены потенциальные радиосенсибилизирующие эффекты соединений ингибиторов TDP1 (фермента репарации ДНК) на раковых клеточных линиях (Hela, U87).

По полученным результатам было показано, что препарат «Димефосфон» в дозе 750 мг/кг не оказывает влияния на выживаемость животных после воздействия ионизирующего излучения в дозе 5 Гр, однако по данным гистологии оказывает местное радиопротекторное действие в тонком кишечнике, снижая выраженность радиационно-индуцированного поражения кишечного эпителия. Радиосенсибилизирующие эффекты ингибиторов TDP1 требуют дальнейших исследований.

Научный руководитель — д-р хим. наук, доц. О. И. Яровая

УДК 538.61

Кластеризация и локализация спин-меченого диклофенака в модельной биологической мембране

А. Н. Атюкова

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Биологическая мембрана — важный структурный компонент клетки, который выполняет множество функций. Нестероидные противовоспалительные препараты (НПВП) являются наиболее часто используемыми безрецептурными терапевтическими средствами. НПВП могут проявлять свою терапевтическую активность за счет взаимодействия с мембранами клеток, однако механизмы этого взаимодействия во многом пока не поняты и требуют изучения.

В данной работе изучаются кластеризация и локализация НПВП диклофенака в модельной биологической мембране POPC (пальмитоил-олеоил-sn-глицерофосфохолин). Особенностью работы является использование моно-спин-меченых молекул диклофенака (диклофенак-SL, синтезирован Д. С. Барановым), что позволило изучать механизмы его взаимодействия с мембраной на молекулярном уровне с применением метода модуляции огибающей сигналов электронного спинового эха (ESEEM), метода усиления парамагнитной релаксации в ЯМР и спектроскопии двойного электрон-электронного резонанса (PELDOR). Метод усиления парамагнитной релаксации в комбинации с методом ESEEM дает полную информацию о локализации спин-меченых молекул в бислое. Метод PELDOR используется для изучения нанокластеризации спиновых меток.

Данные CW ЭПР показывают, что молекулы диклофенака-SL встраиваются в модельную мембрану POPC [1]. С помощью метода PELDOR было обнаружено, что при концентрации $\chi < 1$ мол.% поверхностная концентрация диклофенака-SL в два раза превышает χ . С опорой на литературные данные [2] была предложена модель распределения диклофенака-SL по типу шахматной шкатулки с попеременным чередованием нанокластеров в двух листках бислоя. При $\chi > 2$ мол.% эти кластеры сливаются. С помощью метода усиления парамагнитной релаксации было обнаружено, что спиновая метка локализуется в гидрофобной части бислоя. Это согласуется с данными, полученными методом ESEEM [1].

1. Baranov D. S., Kashnik A. S., Atnyukova A. N., Dzuba S.A. Spin-Labeled Diclofenac: Synthesis and Interaction with Lipid Membranes // *Molecules*. 2023. Vol. 28. P. 5991.
2. Kashnik A. S., Baranov D. S., Dzuba S.A. Ibuprofen in a Lipid Bilayer: Nanoscale Spatial Arrangement // *Membranes*. 2022. Vol. 12. P. 1077.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, проф. С. А. Дзюба, А. С. Кашник

УДК 576.08, 53.086

**Поиск сигнатурных метаболических путей методом ВЭЖХ-МС/МС
для изучения биологических эффектов ТГц-излучения
в клетках меланомы**

Е. А. Бутикова

Новосибирский государственный университет

Терагерцевое излучение находится между микроволновой и инфракрасной областями электромагнитного спектра, диапазон которого определяется от частот 100 ГГц до 10 ТГц [1]. Одним из наиболее эффективных методов выявления ранних изменений в клетках в ответ на внешние воздействия является таргетированный метаболомный скрининг методом ВЭЖХ-МС/МС.

В данном исследовании было проведено облучение клеток линии SK-MEL-28 на НЛСЭ [2] с параметрами: 2,3 ТГц, длина волны 130 мкм в течение 10 и 45 мин. Облученные клетки сравнивали с ИК-облученными клетками. Контроль температуры во время облучения проводился с помощью высокоточного тепловизора. Проведены МТТ и клоногенный тесты, а также таргетированный метаболомный скрининг всех клеточных образцов методом ВЭЖХ-МС/МС.

В работе показано, что воздействие ТГц-излучения на клетки линии меланомы человека не приводит к значимому изменению выживаемости как по результатам МТТ (не более 10 % при облучении 45 мин), так и по результатам клоногенного теста. С использованием таргетированного метаболомного скрининга методом ВЭЖХ-МС/МС было установлено изменение содержания в клетках значительного числа метаболитов, относящихся к путям метаболизма пиримидиновых азотистых оснований и липидов.

Как при 10-, так и при 45-минутном облучении зафиксировано увеличение содержания конечных метаболитов пути пиримидинов, таких как уридин и урацил, при этом содержание липидов как при ИК-, так и при ТГц-излучении было на одном уровне.

Полученные результаты могут свидетельствовать как об опосредованном генотоксическом эффекте, так и о нарушении функций энергетических систем клеток.

1. Ghann W., Uddin J. Terahertz (THz) spectroscopy: a cutting-edge technology // Terahertz Spectroscopy. A Cutting-Edge Technology / ed. by J. Uddin. USA: Coppin State University, 2017. Ch. 1. P. 3–20.
2. Kulipanov G. N. et al. Novosibirsk Free Electron Laser-Facility Description and Recent Experiments // IEEE Trans Terahertz Sci. Technol. 2015. Vol. 5, No. 5.

Научные руководители — д-р биол. наук И. А. Разумов,
канд. физ.-мат. наук В. М. Попик

УДК 004.3

Неинвазивная оценка метаболизма биологических тканей с использованием ближней инфракрасной спектроскопии: результаты экспериментов и перспективы применения

Д. А. Буянов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва
Медицинские компьютерные системы, Москва

Организация жизненных процессов связана с химическими реакциями метаболизма, где ключевым аспектом является окисление углеводов, липидов и аминокислот с выделением энергии в форме углекислого газа и воды. Кровь переносит кислород, связанный с гемоглобином, от легких к тканям, где гемоглобин переходит от оксигенированного к дезоксигенированному состоянию. В данной работе рассмотрена возможность неинвазивной оценки метаболизма тканей с использованием ближней инфракрасной спектроскопии и спектрометра NIRS4 (ООО «Медицинские компьютерные системы», Россия).

В результате исследований, направленных на артериальную окклюзию и физическую нагрузку, спектрометр продемонстрировал высокую точность измерений динамики оксигенации. Сравнение с данными аналогичных устройств подтвердило сопоставимость результатов и надлежащую степень достоверности. Цифровые показатели, такие как абсолютные значения интенсивности падающего света, коэффициенты динамического освещения, концентрации Hb и HbO гемоглобина, обеспечивают количественные характеристики исследуемых процессов.

Проведено исследование, включающее 47 мужчин среднего возраста, подвергнутых интервальной гипоксической тренировке и электростимуляции мышц. Результаты выявили изменения в группе с электростимуляцией: увеличение концентрации Hb и HbO, а также снижение уровня сатурации тканей в левой области префронтальной коры. Сопутствующим эффектом было снижение концентрации гемоглобина в правой области префронтальной коры [1].

Полученные результаты подтверждают точность измерений и открывают новые возможности для применения NIRS4 в научных исследованиях, обеспечивая важный вклад в разработку методов диагностики и мониторинга состояния организма.

1. Reganova E., Solovyeva K., Buyanov D. et al. Effects of Intermittent Hypoxia and Electrical Muscle Stimulation on Cognitive and Physiological Metrics // Bioengineering. 2023. Vol. 10, No. 5. P. 536.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Селищев

УДК 614.485

Оценка чувствительности спор *Penicillium nalgiovense* к широкополосному импульсному ультрафиолетовому излучению

С. А. Быстров

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Борьба с грибковой инфекцией актуальна практически во всех сферах деятельности человека: в быту, промышленности и медицине. Грибковые колонии часто объединяются в биопленки, являющиеся резервуарами с возбудителями микозов — заболеваний человека и животных.

Также известно, что грибковая микрофлора представляет опасность как среда, вызывающая биодеградацию конструкционных материалов, в том числе важных элементов космических станций. Рост плесневых грибов обнаружен на станции «Мир», где колонии пеницилла распространялись в системе терморегулирования и в блоке электролиза кислорода [1].

Некоторые виды плесени применяются в пищевой промышленности, но даже среди них наблюдаются штаммы, токсичные для человека. В [2] описан случай возникновения астмы у работника мясного цеха, вдыхавшего пыль от колбасных оболочек, покрытых пенициллом.

В настоящее время в качестве эффективного инструмента антигрибковой защиты рассматривают импульсные ксеноновые лампы (ИКЛ), достоинствами которых являются возможность получения больших доз за короткое время, высокая интенсивность и сплошной спектр излучения. Цель работы — оценить чувствительность спор пеницилла к импульсному ультрафиолетовому (УФ) излучению. В качестве объекта исследования выбраны споры *Penicillium nalgiovense*, чувствительность которых к УФ-излучению еще не исследовалась.

Посев спор осуществлялся методом Коха в чашки Петри из суспензий с различными разведениями. Для облучения чашек использовалась установка на основе ИКЛ ИНП-5/60 с энергией вспышки порядка 20 Дж. Исходная контаминация чашек Петри составляла $3 \cdot 10^5$ спор.

Установлено, что доза УФ-излучения в диапазоне длин волн 200–280 нм, необходимая для инактивации 90 % спор исследуемой культуры, составляет приблизительно 15 мДж/см^2 , что согласуется с имеющимися данными по резистентности к УФ-излучению спор некоторых других видов пеницилла.

1. Hupka M., Kedia R., Schauer R. et al. Morphology of *Penicillium rubens* Biofilms Formed in Space. Basel: Life, 2023. Vol 13, No. 4. 28 p.
2. Brito F. F. et al. *Penicillium nalgiovense* as an Occupational and Contact Allergen // J. Allergy Clinical Immunology. 2003. Vol. 112, No. 1. P. 213–215.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. А. С. Камруков

УДК 536.3; 535.2

Программа расчета тепловых полей при лазерном воздействии на живые биологические ткани

Х. Диаб¹, А.М. Гончаренко²

¹Новосибирский государственный университет

²Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Использование лазеров в медицине требует понимания механизмов теплопередачи в биологических тканях для минимизации термических повреждений при проведении лазерных процедур на теле человека. Моделирование теплового распределения при проведении лазерных процедур необходимо для оптимизации протоколов лечения и исключения термических повреждений, а также для достижения нужных терапевтических эффектов.

Ключевая задача работы — разработка компьютерной программы, моделирующей динамику температурного поля, возникающего при облучении лазером биологической ткани. Созданная программа основана на использовании метода Монте-Карло и предназначена для расчета теплового поля в живой ткани при воздействии на ткань лазерного излучения. Разработанная на языке Python программа учитывает параметры излучения и характеристики живой ткани, относящиеся к используемому лазерному излучению. Моделируя тепловые поля при лазерном воздействии, мы можем предсказать распределение тепла, как на поверхности живой ткани, так и в ее глубине.

Практическая проверка разработанной программы осуществлялась в «Клинике Пасман» с использованием медицинского лазера «ИРЭ-Полюс» и медицинских тепловизоров СВИТ и IRV. Измерения проводились на открытых участках человеческого тела (мочка уха, щека и ладонь), оптические параметры взяты из научных публикаций [1, 2]. Мы вносили в программу параметры лазера и усредненные оптические параметры открытых частей тела и сравнивали температуру, предсказанную программой, с фактической температурой, показываемой тепловизорами. Анализ результатов показал достоверность работы программы, которая может быть использована для моделирования тепловых полей и подготовки протоколов лечения в области лазерной фотодинамической терапии и гипертермии.

1. Kono T., Yamada J. In Vivo Measurement of Optical Properties of Human Skin for 450–800 nm and 950–1600 nm Wavelengths // Int. J. Thermophys. 2019. Vol. 40, No. 5. P. 51.
2. Marchesini R. et al. Reflectance measurements can be used to estimate optical characteristics of in-vivo tissue / ed. by R. J. Nossal, R. Pecora, A. V. Priezzhev. 1993. P. 273.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф., акад. С. Н. Багаев

УДК 54.06:615:615.849.12:616-073.8

**Бор-гадолиний-содержащие нанокompозиты арабиногалактана
для мультиканальной тераностики**

И.Д. Евсеев

Новосибирский государственный университет

Развивается методология синтеза биосовместимых гибридных неорганo-органических нанобиокompозитов, представляющих собой инкапсулированные в макромолекулы бионацеливающих полимеров различные многоэлементные неорганические наночастицы с комплексом нейтронзахватных, магнитных, фотоактивных и других свойств [1–4].

Так, синтезирован одновременно магнитный и нейтронзахватный нанобиокompозит. Он представляет собой наночастицы бората гадолиния, инкапсулированные в макромолекулы арабиногалактана лиственницы сибирской, способные проходить через гематоэнцефалический барьер. Таким образом, полученный нанокompозит является перспективным средством многоканальной тераностики (магниторезонансной томографии с контрастным усилением, нейтронстимулированной *in vivo* однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, магнитной гипертермии, двухканальной бор-, гадолиниевой нейтронзахватной терапии), в том числе опухолей головного мозга.

1. Petrova M. V., Kiryutin A. S., Savelov A. A. et al. A theoretical and experimental study of NMR contrasting properties of nanocomposites based on ferric oxides stabilized by arabino-galactan matrix // Appl. Magnetic Resonance. 2011. Vol. 41, No. 2–4. P. 525–536.
2. Лесничая М. В., Александрова Г. П., Долмаа Г. и др. Синтез серебросодержащих нанокompозитов на основе гуминовых веществ бурого угля и их антиоксидантная активность // ДАН. 2014. Т. 456, № 1. С. 56–57.
3. Прозорова Г. Ф., Коржова С. А., Конькова Т. В. и др. Особенности формирования наночастиц серебра в полимерной матрице // ДАН. 2011. Т. 437, № 1. С. 50–52.
4. Мячина Г. Ф., Коржова С. А., Ермакова Т. Г. и др. Нанокompозиты серебра и сополимера 1-винил-1,2,4-триазола с натриевой солью метакриловой кислоты // ДАН. 2009. Т. 427, № 6. С. 790–792.

Научный руководитель — канд. хим. наук Б.Г. Сухов

УДК 539.1; 615.8

Разработка ряда дозиметрических методик метода БНЗТ и их верификация на установке источника нейтронов на базе ускорителя VITA

И. С. Ибрагим

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Метод бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) сочетает в себе два вида лучевой терапии: внешнюю лучевую терапию, заключающуюся в облучении тела пациента в месте опухоли пучками эпитепловых нейтронов, и внутреннюю лучевую терапию, заключающуюся в излучении (альфа-частицы, ядра лития и гамма-излучение), т. е. в результате взаимодействия тепловых нейтронов с атомами бора, накопленными в опухолевых клетках, что приводит к гибели этих клеток.

В клиническую практику начинает входить метод БНЗТ злокачественных опухолей, предложенный в 1936 г. Для развития методики БНЗТ в ИЯФ СО РАН был предложен и разработан ускорительный источник нейтронов VITA [1]. Этот источник нейтронов используют в ИЯФ СО РАН для проведения научных исследований, а в клинике г. Сямынь (Китай) — для проведения клинических испытаний методики БНЗТ с целью получения лицензии и последующего лечения больных.

В настоящее время ускорительный источник нейтронов VITA изготавливают для Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина (Москва) с целью внедрения методики БНЗТ в клиническую практику в Российской Федерации. БНЗТ отличается от обычного излучения (фотонной и электронной терапии) наличием четырех компонент доз с различной относительной биологической эффективностью (RBE): борной дозы, азотной дозы, дозы быстрых нейтронов и дозы гамма-излучения.

Десять лет назад считалось, что борная доза и азотная доза неизмеримы [2]. Однако за прошедшее время в нашей лаборатории был разработан малогабаритный детектор нейтронов для измерения борной дозы и дозы гамма-излучения [3]. Также разработан клеточный дозиметр для измерения суммы эквивалентной дозы быстрых нейтронов и эквивалентной дозы азота [4]; γ -спектроскопия для измерения дозы бора *in situ* в режиме реального времени [5]; монитор потока эпитепловых нейтронов для измерения потока эпитепловых нейтронов [6]. В докладе мы поговорим об этих дозиметрических методах и о результатах их проверки, которая была проведена на установке источника нейтронов на базе ускорителя VITA.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

1. Taskaev S. et al. Neutron source based on vacuum insulated tandem accelerator and lithium target // *Biology*. 2021. Vol. 10, No. 5. P. 350.
2. Sauerwein W.A. G. et al. (ed.). *Neutron capture therapy: principles and applications* // Springer Sci. Business Media. 2012.
3. Bykov T.A. et al. Initial trials of a dose monitoring detector for boron neutron capture therapy // *J. Instrum.* 2021. Vol. 16, No. 01. P. P01024.
4. Taskaeva I., Taskaev S. Method of measuring of dose produced by recoil nuclei // *Patent Invention*. 2021. No. 2743417.
5. Bikchurina M. et al. Dosimetry for boron neutron capture therapy developed and verified at the accelerator based neutron source VITA // *Frontiers Nuclear Eng.* 2023. Vol. 2. P. 1266562.
6. Byambatseren E. et al. Validation and optimization of the epithermal neutron flux detector using the $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$ reaction // *J. Instrum.* 2023. Vol. 18, No. 02. P. P02020.

Научный руководитель — д-р физ.-мат наук, проф. С. Ю. Таскаев

УДК 577.323.24

Исследование устойчивости самоограниченных комплексов РНК к действию искусственных рибонуклеаз

М. А. Канарская

Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Вторичные структуры нуклеиновых кислот (НК) влияют на регуляторные функции в клетке. Ранее в ИХБФМ СО РАН были детально исследованы самоограниченные комплексы, сформированные парой ДНК/ДНК и РНК/РНК олигонуклеотидами, которые имеют два попарно комплементарных участка, соединенных гибким линкером. В данной работе были исследованы аналогичные комплексы, сформированные парой ДНК/РНК-олигомеров. Помимо изучения физико-химических свойств и влияния на молекулярно-биологические процессы различных вторичных структур, важной задачей является поиск подходов для изменения структуры комплексов НК. Одним из таких подходов является применение нуклеаз, расщепляющих НК. Сегодня разрабатываются различные искусственные нуклеазы. Большой интерес представляют рибонуклеазы (РНКазы) — нуклеазы, расщепляющие цепи РНК.

Цель данной работы — исследовать устойчивость самоограниченных комплексов ДНК/РНК к действию искусственных рибонуклеаз.

Объектом исследования являлись ДНК- и РНК-олигонуклеотиды, состоящие из 10 звеньев, соединенных нуклеотидным линкером различной длины.

Ранее были получены данные о температурах плавления и типах структур, формируемых цепями ДНК и РНК с различными длинами линкеров. На основании этих результатов были отобраны комплексы и выбраны условия для проведения исследования расщепления цепей РНК рибонуклеазами. В качестве модели РНКазы выбран раствор имидазола. Проведен анализ эффективности и скорости расщепления РНК. Для этого гибридные ДНК/РНК-комплексы были инкубированы в растворе имидазола в течение разных промежутков времени (до 16 ч). Установлена различная скорость и эффективность расщепления одноцепочечных участков РНК, которая зависит от типа комплекса и длины линкера. В дальнейшем планируется изучить специфичность расщепления и провести аналогичные эксперименты с другими искусственными РНКазами.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИХБФМ СО РАН (№ 1211129 00217-3) и проекта Министерства науки и высшего образования (№ 075-15-2022-263).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Ломзов

УДК 550.835.232

Метод мгновенной гамма-спектрометрии для контроля терапевтической дозы при бор-нейтронозахватной терапии

В. Д. Коновалова

Новосибирский государственный университет

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) — перспективный метод лечения злокачественных опухолей, принцип которого заключается в облучении нейтронами клеток опухоли, в которых предварительно был накоплен изотоп ^{10}B . В настоящее время вопрос генерации нейтронов для БНЗТ успешно решен. Источник нейтронов ВИТА, использовавшийся в данной работе, позволяет генерировать нейтроны широкого диапазона энергий: от тепловых до быстрых нейтронов. Однако важной нерешенной проблемой для введения БНЗТ в клиническую практику является контроль доз, получаемых при облучении.

Доза при проведении БНЗТ — многокомпонентная, она состоит из дозы от продуктов реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ (борная доза), вносящей основной вклад в суммарную дозу при облучении, а также дозы сопутствующего гамма-излучения, быстрых нейтронов и реакций нейтронов с ядрами водорода, азота и др. Перспективным решением проблемы измерения борной дозы является метод мгновенной гамма-спектрометрии, основанный на регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ, которые мгновенно испускают ядра лития, образующиеся в 94 % случаев в результате реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. До настоящего времени метод не был внедрен в практику из-за сложности его реализации.

В данной работе реализован метод мгновенной гамма-спектрометрии на ускорительном источнике нейтронов ВИТА. Создан спектрометрический комплекс для регистрации гамма-квантов, устойчивый к высокому нейтронному потоку. Произведена абсолютная калибровка детектора в существующей геометрии. Представлены и обсуждены результаты экспериментов по регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ с предсказанным доплеровским уширением. Представлена зависимость интенсивности излучения от концентрации изотопов бора-10.

Экспериментально продемонстрирована возможность использования метода мгновенной гамма-спектрометрии для определения дозы при лечении домашних животных (кошки и собаки) со спонтанными злокачественными новообразованиями методом БНЗТ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Касатов

УДК 577.323.57

Моделирование механизмов укладки хроматина в хромосомах типа ламповых щеток

В. В. Константинов, Т. А. Лагунов, А. Р. Нурисламов

Новосибирский государственный университет
Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск

Хромосомы типа ламповых щеток (*lampbrush chromosome*, LBC) представляют собой мейотический бивалент из четырех сестринских хроматид (по две для каждого гомолога), с большой степенью деконденсации хроматина и стабильной хромомерно-петлевой организацией. Такие хромосомы характерны для определенных стадий развития ооцитов большинства животных, за исключением плацентарных млекопитающих. Сестринские хроматиды в таких бивалентах соединены между собой когезинами, а хроматин в хромомерах упакован с участием комплекса конденсин.

Благодаря их гигантским размерам LBC можно изучать даже с помощью световой микроскопии, сопровождаемой достаточно простыми методами визуализации хроматина. Более того, недавнее появление методов анализа конформации хромосом в единичных клетках позволило нам вместе с коллегами получить уникальную информацию о паттернах трехмерных контактов хроматина в LBC в ооцитах курицы. Несмотря на это, а также на длительную историю изучения хромосом типа ламповых щеток, механизмы их формирования все еще остаются слабо изученными и не объясняются в рамках существующих моделей. Например, согласно полученным нами данным, в границах контактных доменов хромосом этого типа отсутствует обогащение сайтами посадки белка CTCF, обычно отвечающего за их формирование.

В нашей работе мы предлагаем механизм формирования доменов хроматина в LBC путем смещения экструдеров активной транскрипцией из конденсированного состояния. Для проверки этого механизма мы провели моделирование хромосомы как гетерополимера методами молекулярной динамики. Для проверки адекватности модели была смоделирована 11-я хромосома курицы и проведено сравнение карты контактов хроматина, полученной в модели, с экспериментальной картой контактов, полученной методом Hi-C для одиночных клеток/ядер (англ. *single cell Hi-C*). Мы продемонстрировали, что возможно образование временных доменов (не привязанных к последовательности ДНК) путем активной экструзии хроматина экструдерами без барьерных белков и что активная транскрипция [1] может выступать фактором формирования стабильных доменов хроматина.

1. Krasikova A. et al. The first chicken oocyte nucleus whole transcriptomic profile defines the spectrum of maternal mRNA and non-coding RNA genes transcribed by the lampbrush chromosomes // bioRxiv. 2024. P. 2024.02.05.577752.

Научный руководитель — канд. биол. наук В. С. Фишман

УДК 543.421/.424

Создание дозиметра Фрикке для бор-нейтронозахватной терапии

К. С. Кузьмина

Новосибирский государственный университет
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) — одна из перспективных методик лечения злокачественных опухолей, которая основана на избирательном уничтожении клеток опухоли путем накопления в них стабильного изотопа ^{10}B и последующего облучения эпителивыми нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ с большим выделением энергии именно в той клетке, которая содержала ядро бора, что приводит к ее гибели. Клинические испытания методики проведены на ядерных реакторах, получены положительные результаты. Однако для широкого внедрения методики в клиническую практику требуются компактные источники нейтронов, эффективные препараты адресной доставки бора, а также система планирования терапии, включая дозиметрический контроль.

В настоящее время не существует клинически применяемых методов дозиметрии, которая учитывала бы все пять основных доз в БНЗТ. На установке VITA при терапии домашних животных со спонтанными опухолями используются такие методы дозиметрии, как активационные фольги, prompt gamma спектроскопия, водный фантом и расчеты на программном комплексе на основе NMC.

Для измерения полной дозы предлагается использовать химический дозиметр, а именно ферросульфатную систему, или дозиметр Фрикке.

Цель работы — разработать ферросульфатную дозиметрическую систему для БНЗТ в диапазоне дозы от 1 до 40 Гр.

В ходе работы был разработан и оптимизирован состав ферросульфатных дозиметров: «обычного» и «нейтроночувствительного», определен оптимальный метод измерения концентрации ионов Fe^{3+} , также проведена калибровка дозиметра с помощью источника цезия-137 и определен дальнейший пересчет в дозу.

Научный руководитель — А. И. Касатова

УДК 543.427.4

Количественное определение химических элементов в биологических образцах методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения

К. А. Лапшин

Новосибирский государственный университет

Энергодисперсионным методом рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении (РФА-СИ) получены панорамные спектры химических элементов от стандартных биологических образцов: NIST-BM8414 (мышечная ткань быка), NCS DC 73347 и NCS ZC 81002b (человеческий волос), NIST-1566 (мышечная ткань устрицы). По экспериментальным спектрам РФА-СИ определены минимальные пределы обнаружения химических элементов от флуоресцентных линий К-серии, возбуждаемых монохроматическими фотонами с энергией 45 и 60 кэВ. Проанализированы фоновые факторы в экспериментальных спектрах, ограничивающие пределы обнаружения для различных химических элементов в энергодисперсионном методе РФА-СИ. Получена зависимость между значением минимального предела обнаружения химического элемента и толщиной исследуемого образца. Рассчитанные минимальные пределы обнаружения химических элементов широко варьируются: от нескольких сотен ppm (мкг/г) для элементов с $Z < 18$ (сера, хлор) до нескольких десятков ppb (нг/г) для элементов с $Z > 35$ (рубидий, сурьма, йод).

Также методом РФА-СИ количественно определялся йод в мышечных тканях лабораторных мышей. Выбрана оптимальная монохроматическая энергия возбуждения для определения йода в образцах, которая составляла 38 кэВ. Количественное определение йода в биологических тканях было проведено по методу внешнего стандарта. В качестве образца сравнения использовался стандартный биологический образец (эталон) OT (*Oyster Tissue*) — NIST-1566a. Количественное определение йода в мышечных тканях лабораторных мышей отвечает на вопрос о целесообразности в дальнейшем проводить эксперименты по визуализации опухолевых онкологических клеток методами разностной радиографии на СИ.

Все эксперименты проводились на станции синхротронного излучения накопителя ВЭПП-4М в Сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения (СЦСТИ) в ИЯФ СО РАН.

Научный руководитель — А. А. Легкодымов

УДК 544.522 + 546.93

**Фотохимия и фотофизика диродиевого комплекса,
перспективного для применения в фотохимиотерапии**

В. А. Мещерякова

Новосибирский государственный университет

Противораковая фотохимиотерапия (ФХТ) является интересным и перспективным предметом исследования. Химические соединения, используемые в традиционной химиотерапии (цисплатин и его аналоги), обладают высокой токсичностью и малым терапевтическим индексом. Эти препараты вызывают побочные эффекты в виде различных заболеваний [1]. Альтернативным методом лечения онкологических заболеваний является фотодинамическая терапия (ФДТ). Данный метод основан на применении фотосенсибилизаторов, которые накапливаются в пораженных тканях и за счет фотохимических превращений разрушают раковые клетки. Традиционная ФДТ основана на реакциях синглетного кислорода. Однако многие опухоли являются гипоксичными, что требует разработки альтернативных подходов.

ФХТ основана на фотопревращениях комплексов платиновых металлов, которые под действием света образуют соединения, близкие по свойствам к цисплатину, т. е. являются ингибиторами транскрипции ДНК. Применение ФХТ не требует наличия растворенного кислорода. Диродиевые комплексы Rh(II,II)-полипиридил обладают двойным цитотоксическим действием: как по кислород-зависимому механизму, характерному для ФДТ, так и по кислород-независимому механизму, характерному для ФХТ [2].

В работе исследованы фотофизика и фотохимия лиганда dppn (бензо[і]дипиридо[3,2-а:2',3'-h]феназин) и диродиевого комплекса $[Rh_2(\mu-O_2CCH_3)_2(dppn)_2](O_2CCH_3)$ с доказанной светоиндуцированной цитотоксичностью [2]. Измерены фотофизические характеристики растворов dppn в ацетонитриле (спектры и время жизни люминесценции, кинетические характеристики триплетного состояния, квантовый выход образования синглетного кислорода). Для водных растворов комплекса показано, что первичной фотореакцией является обмен ацетатного лиганда на молекулу воды.

1. O'Dwyer P. J., Stevenson J. P., Johnson S. W. Clinical Status of Cisplatin, Carboplatin, and Other Platinum-Based Antitumor Drugs // *Cisplatin. Chemistry and Biochemistry of a Leading Anticancer Drug*. Lippert, B., Ed.; Wiley-VCH, Weinheim, Germany. 1999. P. 31–69.
2. Knoll J. D., Turro C. Control and utilization of ruthenium and rhodium metal complex excited states for photoactivated cancer therapy // *Coordination Chem. Rev.* Elsevier, 2015. Vol. 282–283. P. 110–126.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Е. М. Глебов

УДК 544.032.732

Гибридизационные свойства бензозольных производных олигодезоксирибонуклеотидов в присутствии соразтворителей

Ф. В. Морозова

Новосибирский государственный университет
Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск

На сегодняшний день множество научных задач и исследований задействуют олигонуклеотиды — короткие синтетические фрагменты нуклеиновых кислот (НК). Олигонуклеотиды специфически связываются с комплементарными одноцепочечными нуклеиновыми кислотами с образованием антипараллельной двойной спирали. Они могут быть использованы для синтеза генов, при анализе нуклеотидных последовательностей методом полимеразной цепной реакции (ПЦР), в качестве молекулярных зондов и др. Свойства олигонуклеотидов могут быть направленно изменены, а области их применения расширены путем введения химических модификаций в структуру нуклеотидов. Объектом исследования является новый класс аналогов НК — олигонуклеотиды, имеющие бензоимидазольные модификации фосфатных групп (ФАО), недавно разработанные и впервые синтезированные в ИХБФМ СО РАН. На гибридизационные свойства олигонуклеотидов влияет множество факторов: нуклеотидная последовательность и ГЦ-состав, длина цепи, наличие модификаций, а также условия, в которые они помещены: концентрации ионов, рН раствора, наличие соразтворителей и др.

Цель данной работы — исследовать влияние соразтворителей на гибридизационные свойства дуплексов, образованных олигодезоксирибонуклеотидами, частично модифицированными бензоазольными группами с комплементарными цепями ДНК.

В данной работе в качестве соразтворителей использовали этиленгликоль, этанол, глицерин и трифторэтанол. Методом термической денатурации с оптической регистрацией сигнала получены данные о температуре плавления и термодинамических параметрах формирования комплексов при различных концентрациях соразтворителей как для совершенных комплексов, так и для комплексов, имеющих нуклеотидные несоответствия (мисматчи). Исследовано влияние данных модификаций на изменения гидратации при образовании дуплекса. Методом спектроскопии кругового дихроизма исследовано влияние соразтворителей на вторичную структуру изучаемых комплексов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-74-01116).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. М. Голышев

УДК 577

Получение *de novo* нуклеопротеина нового ортонайровируса *Yezo virus* и изучение его пространственной структуры

А. А. Цишевская

Новосибирский государственный университет
ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, р. п. Кольцово

Новые ортонайровирусы (семейство *Nairoviridae*), переносимые клещами и способные приводить к смертельным лихорадочным заболеваниям у людей и животных, одним из которых является недавно обнаруженный на территории Японии, Китая и РФ *Yezo virus* (YEZV), могут представлять серьезную угрозу для общественного здравоохранения. При этом информация о структурных особенностях вириона и функциях вирусных белков YEZV, являющаяся необходимой для рационального создания противовирусных препаратов и диагностических тест-систем, отсутствует.

В ходе данного исследования с помощью нейросети AlphaFold2 была получена модель пространственной структуры нуклеопротеина (N) YEZV с коэффициентом достоверности rLDDT 86,85. Основываясь на полученной модели, установили, что N YEZV является высокоструктурированным и имеет два пространственно разделенных домена (d1 и d2), в основном представленных альфа-спиралями и соединенных между собой свободными петлями. Данные результаты указывают на пригодность N YEZV, d1 и d2 для рентгеноструктурного анализа. При этом N YEZV и его домены не имеют аналогов структуры в PDB с уровнем идентичности более 35 %.

На основе данных моделирования собраны *de novo* искусственные гены, кодирующие полноразмерный N YEZV и d1, d2 длиной 1537, 403 и 1159 п. н. соответственно. Созданы рекомбинантные плазмиды 6xHis-pET-3C-Yezo_virus_d1N и 6xHis-pET-3C-Yezo_virus_N, обеспечивающие стабильную экспрессию искусственных генов в прокариотической системе *E. Coli*. Для d1 N YEZV получен штамм-продуцент *E. coli* BL-21/pET200_Yezo_virus_d1_N-dop и рекомбинантный белок d1 N Yezo virus с молекулярной массой 14,2 кДА без аффинных меток и белков слияния с чистотой в SDS-PAGE более 95 %, пригодный для дальнейшей кристаллизации. Размер биомолекулы составил 3,84 нм, а значение дзета-потенциала — 0,63 мВ, что указывает на необходимость подбора условий буферной системы.

Таким образом, в данной работе были получены уникальные данные и синтезирован рекомбинантный белок d1 N Yezo virus, которые далее будут использованы для экспериментального решения структуры нуклеопротеина YEZV, что является принципиально важным для установления функций вирусных белков и медицинской диагностики нового ортонайровируса YEZV.

Научный руководитель — канд. биол. наук А. В. Гладышева

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

УДК 666.3-13

Стойкость к высокотемпературному окислению функциональных ламинированных композитов Nb/Ti₃Al(Si)C₂-TiC

А. В. Абдульменова

Томский политехнический университет

Композиты на основе МАХ-фаз, где в основном М — переходный металл, А — элемент IIIA–IVA подгруппы, X — углерод или азот, являются перспективными функциональными материалами. В то же время данные соединения демонстрируют хрупкое разрушение при повышенных температурах. Для улучшения механических характеристик может быть использован подход, основанный на формировании металлокерамических композитов. Ранее было установлено, что новые ламинированные композиты Nb/Ti₃Al(Si)C₂-TiC демонстрируют хрупко-пластичный характер разрушения [1]. Однако окислительное поведение данных материалов при высоких температурах остается неясным. Таким образом, цель настоящей работы — исследовать стойкость к высокотемпературному окислению ламинированных композитов Nb/Ti₃Al(Si)C₂-TiC.

Чередующиеся слои прекерамических бумаг с порошковым наполнителем на основе МАХ-фазы Ti₃Al_{0,75}Si_{0,25}C₂ (ТАС) и фольги Nb синтезировались искровым плазменным спеканием. Испытания на высокотемпературное окисление проводились на воздухе при температуре 800–1300 °С. Фазовый состав и микроструктуру оксидных слоев анализировали с помощью рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии соответственно.

Окисление поверхностных керамических слоев ламинированных композитов приводит к образованию тонкого слоя TiO₂/Al₂O₃ при температурах до 1100 °С. При более высоких температурах образовывается оксидная структура, состоящая из фаз TiO₂, Al₂TiO₅, Al₂O₃ и SiO₂. Окисление слоев Nb с боковой поверхности оказывает существенное влияние на стойкость к окислению композитов. Нестабильное поведение, вызванное окислением внутренних слоев Nb, может быть смягчено созданием композита Nb/Ti₃Al(Si)C₂-TiC с керамическим слоем ТАС на боковой поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00109).

1. Kashkarov E. B., Krotkevich D. G., Abdulmenova A. V. et al. Spark plasma sintering of Nb/Ti₃Al(Si)C₂-TiC laminated composites // Materialia. 2023. Vol. 27. P. 101673.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Б. Кашкаров

УДК 544.2

**Квантово-химическое исследование влияния допирования
дисульфида молибдена (MoS_2) атомами азота
на электрохимические свойства**

В. А. Алексеев

Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Дисульфид молибдена (MoS_2) является перспективным анодным материалом благодаря слоистой структуре и большой теоретической емкости в $670 \text{ мАм} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$. Однако из-за низкой электропроводности и плохой обратимости реакции конверсии чистый MoS_2 требует модификации, простейшей из которых является допирование.

Атом N может выступать в качестве примесного атома из доступных прекурсоров, подходит для допирования MoS_2 по существующим методикам [1, 2]. Показано увеличение емкости MoS_2 за счет введения примесного азота [2]. Наблюдаемое увеличение может быть связано как с увеличением проводимости, так и с созданием дополнительных высокоэнергетических положений связывания атомов лития. В данной работе было проведено более глубокое исследование роли азота в наблюдаемом увеличении емкости с помощью квантово-химических расчетов, проведения симуляций методом молекулярной динамики из первых принципов.

В работе показано, что допирование MoS_2 атомами азота приводит к большей химической активности и более раннему разрушению MoS_2 в ходе литирования по сравнению с чистым MoS_2 . Наличие атомов азота в структуре не приводит к существенному уплотнению возможных центров связывания атомов лития, однако способствует увеличению проводимости. В связи с этим увеличение емкости экспериментальных азот-допированных образцов MoS_2 можно связать с повышенной электронной проводимостью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-73-00048).

1. Azcatl A. et al. Covalent Nitrogen Doping and Compressive Strain in MoS_2 by Remote N_2 Plasma Exposure // Nano Letters. 2016. Vol. 16, No. 9. P. 5437–5443.
2. Liu Q. et al. The origin of the enhanced performance of nitrogen-doped MoS_2 in lithium ion batteries // Nanotechnology. 2016. № 17 (27).

Научный руководитель — д-р хим. наук Л. Г. Булушева

УДК 537.533

Изучение автоэмиссионных свойств полиакрилонитрила и углеродных нанотрубок

А. А. Алябьев, А. Д. Кибирский

Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Углеродная нанотрубка (УНТ) обладает уникальными свойствами, такими как чрезвычайно высокая механическая прочность и большая электро- и теплопроводность, которые важны для различных применений [1]. В настоящее время основные работы направлены на изучение синтеза и физико-химических свойств УНТ [2].

В настоящей работе получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) для УНТ и полиакрилонитрила (ПАН) с целью исследования их деградаций от времени и вследствие изучения деградации никелевого анода. Для каждого вещества сначала снималась ВАХ с шагом в 10 мин при увеличении напряжения, после снималась ВАХ для исследования деградации вещества в течение 800 мин при напряжении $U = 1000$ В, после повторно снималась ВАХ с шагом 10 мин при увеличении напряжения для сравнения результатов.

Изучение деградации ПАН и УНТ в качестве катода проводилось при постоянном напряжении $U = 1000$ В. ПАН-волокно показало начальное сильное падение силы тока (с 0 до 200 мин), при этом скорость деградации вещества практически не менялась с 350 мин до окончания эксперимента. УНТ перешло к стадии деградации с 200 мин, при этом скорость изменения силы тока после 200 мин на порядок отличается от скорости падения силы тока для ПАН, что показывает разительные преимущества и перспективы использования УНТ в качестве катода. Начальный рост силы тока для УНТ (с 0 до 180 мин) объясняется наличием различных эмиссионных центров в начале эксперимента.

Деградация никелевого анода изучалась с помощью микроскопа и ВАХ. С учетом изменения силы тока пришли к заключению, что 1150 мин — нижняя граница работоспособности никелевого анода при напряжении $U = 1000$ В для ПАН, УНТ показало стабильное значение, анод практически не изменился, что подтверждает данные микроскопии.

1. Ехменина И. В., Шешин Е. П., Чадаев Н. Н. Автоэмиссионный источник ультрафиолетового излучения с автокатодом из наноструктурированного углеродного материала // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2011. № 1. С. 3–8.
2. Бугаев А. С. и др. Маломощные рентгеновские трубки (современное состояние) // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 727–740.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Е. П. Шешин

УДК 544.2

Моделирование размещения катионов в структуре цеолитов FAU

М. Е. Бобков

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Цеолитные адсорбенты с топологией FAU широко используются в задачах газоразделения и очистки. Возможность вариации модуля и катионного состава цеолита позволяет настраивать адсорбционные свойства материала под конкретные задачи. Целью данной работы является моделирование размещения катионов в структуре цеолита типа FAU на основе его химического состава.

Моделирование размещения катионов в цеолите проводилось с помощью репличного обменного метода Монте-Карло с использованием двух различных моделей силовых полей при вариации моделей размещения Al в структуре. Построены модели каркаса цеолита с кластеризованным, дисперсным и случайным размещением атомов алюминия для структур с Si/Al от 1 до 3,92. На основе литературных экспериментальных данных была собрана собственная база данных, которая содержит информацию о 65 моно- и бикатионных формах цеолитов типа FAU с катионами щелочных и щелочноземельных металлов. В базе данных указаны химический состав, заселенность катионных позиций, размеры элементарной ячейки, условия дегидратации.

Для каждой системы, содержащей только катионы щелочных металлов, из полученной базы данных расчетным способом определены заселенности катионных позиций. Для сопоставления расчетных результатов и литературных данных был предложен количественный метод оценки MPS. Показано, что тип размещения Al в структуре цеолита с топологией FAU слабо влияет на размещение катионов. Продемонстрировано, что использование обоих силовых полей позволяет предсказывать размещение катионов Na, K, Cs и Rb. В случае Li и Li-Na форм цеолита типа FAU модельные катионные заселенности существенно отличаются от экспериментальных. По всей видимости, для таких систем необходимо также учитывать изменение размеров элементарной ячейки в зависимости от катионного состава. Показана возможность применения методов машинного обучения для создания суррогатных моделей, позволяющих предсказывать заселенности катионных позиций от катионного состава.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Грнев

УДК 543.429.3

Алгоритм *unfolding-synthesis* в некорректных задачах обработки мессбауэровских спектров

А. И. Брущенко

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Аморфные металлические сплавы — сравнительно новый класс материалов, которые обладают неупорядоченной структурой и в связи с этим уникальными свойствами. Такие материалы представляют класс локально неоднородных систем, и интерпретация мессбауэровских спектров по восстановленной функции плотности вероятности сверхтонких параметров представляет собой некорректную задачу, которую решают методами, часто основанными на регуляризации Тихонова [1].

Один из вариантов метода Тихонова реализован Хессе и Рубарчом в применении к мессбауэровской спектроскопии. На данный момент есть усовершенствованные методы на основе метода Хессе — Рубарча [2].

В 2016 г. был предложен метод *unfolding-synthesis*. Он используется для преобразования формы импульсов с детекторов ионизирующего излучения [3]. Отличительной чертой метода является преобразование сигналов с детекторов в короткие импульсы, за которым следует свертка с желаемой формой импульса. Этот метод неявно содержит способ решения некорректно поставленной задачи, по результату схожий с методом регуляризации Тихонова.

В данной работе показано, что метод *unfolding-synthesis* имеет ряд преимуществ и может быть использован для восстановления функции плотности вероятности сверхтонкого магнитного поля аналогично методу Тихонова.

1. Тихонов А. Методы решения некорректных задач. М., 1979. 283 с.
2. Hesse J. Model independent evaluation of overlapped Mossbauer spectra // J. Phys. E. 1974. P. 526–532.
3. Jordanov T. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing. 2016. P. 63–71.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Е. Н. Дулов

УДК 538.9

Структурные характеристики вольфраматов лантаноидов $\text{Ln}_{14}\text{W}_4\text{O}_{33}$ (Ln = La, Nd, Ho, Yb, Tm)

А. А. Булатов

Новосибирский государственный университет

Физико-химические свойства вольфраматов лантаноидов, в том числе зависимость типа проводимости от входящего в состав лантаноида, привлекают возможностью использования этих систем в качестве электролитов в твердооксидных топливных элементах, мембранах [1]. Так, твердые растворы $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ обладают высокой протонной проводимостью [2], у вольфрамата неодима $\text{Nd}_{14}\text{W}_4\text{O}_{33}$ проводимость становится кислород-ионной. С точки зрения кристаллохимии интересно исследовать изменения структур и свойств таких соединений в зависимости от используемого лантаноида, в том числе его ионного радиуса.

Информации о данных системах и их структурах немного. Имеются два набора параметров для ромбических ячеек соединений $\text{La}_6\text{WO}_{12}$ и их структурные данные. Предпринято несколько попыток индцировать пики дифрактограмм $\text{Ho}_{14}\text{W}_4\text{O}_{33}$ в рамках предполагаемой ромбоэдрической ячейки [3]. Исследован фазовый переход для $\text{Yb}_6\text{WO}_{12}$ и термическая эволюция параметров [4]. Установлено, что многие свойства стабильных соединений зависят от типа катиона.

В данной работе проведено исследование структуры вольфраматов лантаноидов состава $\text{Ln}_{14}\text{W}_4\text{O}_{33}$, где Ln = La, Nd, Ho, Yb, Tm. Образцы синтезированы из смеси простых оксидов соответствующих катионов методом механической активации. Проведено индцирование дифрактограмм исследуемых соединений в программах X'Pert HighScorePlus и Topas. Также проведен полнопрофильный анализ структуры методом Ритвельда и Ле-Бейла на основе данных рентгеновской дифракции и дифракции нейтронов.

1. Escolastico S., Seeger J., Roitsch S. et al. Enhanced H-2 separation through mixed proton-electron conducting membranes based on $\text{La}_{5.5}\text{W}_{0.8}\text{M}_{0.2}\text{O}_{11.25-6}$ // Chem. Sus. Chem. 2013. Vol. 6. P. 1523–1532.
2. Shimura T., Fujimoto S., Iwahara H. Proton conduction in non-perovskite-type oxides at elevated temperatures // Solid State Ionics. 2001. Vol. 143. P. 117–123.
3. McCarthy G. J., Fischer R. D. Synthesis and x-ray study of fluorite related phases in the system $\text{Ho}_2\text{O}_3\text{WO}_3$ // Mater. Res. Bull. 1971. Vol. 6. P. 591–602.
4. Shen Rong, Wang Cong, Wang Tianmin et al. Crystal Structures of $\text{Dy}_2(\text{WO}_4)_3$ and $\text{GdY}(\text{WO}_4)_3$ // Rare Metals. 2003. Vol. 22. P. 49.

Научный руководитель — канд. хим. наук К. И. Шефер

УДК 620.22

Титаноматричные композиты, упрочненные наночастицами нитрида титана

Н. Ю. Бурхинова

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Титаноматричные композиты, упрочненные керамическими наночастицами, отличаются низкой плотностью, жаропрочностью и жаростойкостью, сопротивлением ползучести, а также коррозионно- и износостойкостью, поэтому в настоящее время из данных материалов изготавливают различные изделия для космических и авиационных областей [1]. В настоящем исследовании в качестве упрочняющей фазы титаноматричного композита использовались ультрадисперсные частицы нитрида титана. В данной работе показано влияние температурных режимов спекания и концентрации нитрида титана на физико-механические свойства композита Ti/TiN.

Композит Ti/TiN был изготовлен методом горячего прессования с предварительной механической обработкой в высокоэнергетической планетарной мельнице, которая обеспечивает равномерное распределение наночастиц нитрида титана по поверхности и объему частиц титана [2]. Полученную механическую смесь порошков Ti + n об.% TiN ($n = 4, 8, 12, 21$ об.%) спекали в диапазоне температур 1200–1400 °С с шагом 100 °С при максимально прикладываемом давлении 30 МПа.

Фазовый состав материала представляет α -Ti, β -Ti и TiN. Микроструктура спеченных композитов представляет собой зерна $\alpha + \beta$ -Ti и эвтектоида α -Ti + TiN. Результаты гидростатического взвешивания показали увеличение относительной плотности с 97 до 99 % с повышением температуры спекания. Равномерное распределение нитрида титана и высокая относительная плотность спеченных композитов повлияли на повышение микротвердости материала на 97 %, модуля Юнга — на 63 %. Получена экспериментальная зависимость модуля упругости от объемного содержания нитрида титана, показывающая, что полученные результаты описываются уравнением Хашина — Штрикмана.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00353) с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

1. Hayat M. D. Titanium metal matrix composites: An overview // Compos. Part A: Appl. Sci. Manufacturing. 2019. Vol. 121. P. 418–438.
2. Drozdov V. O., Chesnokov A. E. Study of the influence of the time of mechanical processing of powder mixture of composition Ti–25 wt.% TiN in a planetary mill on the characteristics of composite particles // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publishing, 2021. Vol. 1945, No. 1. P. 012005.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Филиппов

УДК 637.12.04/07

Исследование влияния комплексов эссенциального микроэлемента цинка с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами на дисперсный состав молока

А. А. Гвозденко, А. Б. Голик, Н. М. Бочаров, С. В. Артюшин

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

Цинк — эссенциальный микроэлемент, второй после железа по распространенности среди микроэлементов в организме. Цинк участвует во многих процессах организма: росте и развитии костной и мышечной тканей, иммунном ответе организма (в составе супероксиддисмутазы), секреторной активности сальных желез.

Цель данной работы — исследовать влияние комплексов эссенциального микроэлемента цинка с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами на дисперсный состав молока.

Для исследования влияния комплексов эссенциального микроэлемента цинка с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами на дисперсный состав молока использовали пастеризованное молоко с жирностью 3,2 %. Для исследования образцы комплексов эссенциального микроэлемента цинка с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами разбавляли в 10 (концентрация 0,05 моль/л), 100 (концентрация 0,005 моль/л), 1000 (концентрация 0,0005 моль/л) и 10 000 (концентрация 0,00005 моль/л) раз пастеризованным молоком. Исследование среднего гидродинамического радиуса мицелл казеина в молоке проводили методом динамического рассеяния света на приборе *Photocor-Complex*. Титруемую кислотность определяли согласно ГОСТ 3624-92 «Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности».

При концентрации 0,05 моль/л наблюдалось увеличение среднего гидродинамического радиуса мицелл казеина с 27 до 250 нм (для аскорбатоваляната цинка) и увеличение титруемой кислотности до 29 °Т (для аскорбатоваляната цинка). При концентрации 0,005; 0,0005 и 0,00005 моль/л значительных изменений среднего гидродинамического радиуса мицелл казеина не наблюдалось. Средний гидродинамический радиус находился в диапазоне от 15 до 25 нм (для аскорбатоваляната цинка), а титруемая кислотность — от 17 до 19 °Т (для аскорбатоваляната цинка). Анализ полученных данных показал, что для обогащения молочной продукции комплексами эссенциального микроэлемента цинка с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами необходимо использовать концентрации 0,005 моль/л и меньше.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. А. В. Блинов

УДК 620.3

Изучение фазового состава наноразмерного карбоната меди, стабилизированного гидроксиэтилцеллюлозой

А. А. Гвозденко, З. А. Рехман, А. Б. Голик, М. В. Вакуленко

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

Одной из ключевых проблем на сегодняшний день являются отторжение имплантов организмом человека и регенерация костных тканей после операций. Актуальной областью исследований является получение и изучение наночастиц карбоната меди, которые могут применяться в имплантологии для повышения скорости регенерации тканей [1].

Цель данного исследования — изучить фазовый состав наноразмерного карбоната меди, стабилизированного гидроксиэтилцеллюлозой.

Наночастицы карбоната меди получали методом химического осаждения в водной среде. В качестве прекурсора был выбран ацетат меди. В качестве осадителя использовали карбонат аммония, а в качестве стабилизатора — гидроксиэтилцеллюлозу. Методика синтеза наноразмерного карбоната меди состоит в следующем: на первом этапе с помощью метода точной навески готовили растворы карбоната аммония и ацетата меди с концентрацией 0,8 М. Далее в раствор ацетата меди добавляли 0,4 % стабилизатора [2]. На следующем этапе в раствор прекурсора по каплям добавляли раствор осадителя. Полученные золи отмывали методом центрифугирования. Отмытые осадки высушивали в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 24 ч.

На последнем этапе полученные образцы наночастиц карбоната меди измельчались и исследовались рентгенодифрактометрическим методом на рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean (фирма-изготовитель PANalytical B.V, Нидерланды).

Анализ полученной дифрактограммы показал, что фазовый состав образца наноразмерного карбоната меди составляет основной карбонат меди с химической формулой $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FSRN-2023-0037).

1. Ершов В. А. Гидрозоль серебра, стабилизированный карбонат-ионами: оптические характеристики наночастиц, окислительное растворение и антибактериальные свойства: дис. ... канд. хим. наук. 2023.
2. Блинов А. В., Рехман З. А., Гвозденко А. А. и др. Синтез и стабилизация наноразмерного карбоната кальция метилцеллюлозой // Наноиндустрия. 2023. Т. 16, № 7-8 (124). С. 408-415.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. А. В. Блинов

УДК 538.9

Исследование структурно-фазового состава титаноматричных композитов с использованием синхротронного излучения и сканирующей электронной микроскопии

И. С. Герцель^{1,2}, И. Е. Витошкин^{1,2}, А. А. Филиппов¹¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск²Новосибирский государственный университет

Сплав ВТ-6 широко используется в аэрокосмической, автомобильной промышленности и др. из-за высокой удельной прочности, жесткости, хорошей обрабатываемости и коррозионной стойкости. Актуальной проблемой авиастроения является износ лопаток деталей газотурбинного двигателя в силу длительной эксплуатации в условия повышенных температур и взаимодействии с потоком частиц, попавших в рабочую область двигателя [1].

Метод прямого лазерного выращивания, основанный на подаче порошковых смесей через коаксиальное соосно с лазерным излучением, создающим динамическую область ванны расплава, является перспективным методом получения металлокерамических композитов с повышенными механическими характеристиками [2, 3].

В качестве армирующих компонентов в работе используются керамические частицы B_4C . Система Ti-B-C заслуживает столь подробного исследования в силу образования большого количества вторичных фаз, таких как TiB, TiB_2 , TiC и др. Связанно это с растворением карбида бора за счет образования конвективных потоков в ванне расплава а также диффузии в матрицу Ti-6Al-4V [4–6].

Методы электронной микроскопии позволяют изучать микроструктуру материалов, а благодаря EDX анализу — выявлять химический состав различных фаз. Однако синхротронное излучение (СИ) за счет высокого разрешения и интенсивности позволяют проводить более точный анализ кристаллических структур и фазовых составов в объеме, что крайне важно для выявления наноразмерных частиц и интерметаллидных соединений [7, 8].

В работе впервые получены металлокерамические покрытия с 15%-м содержанием карбида бора без структурных дефектов. Параметры установки (P — мощность лазера, V — скорость сканирования, D — размер пятна лазера) обобщены с помощью параметра $E = P/(D \cdot V)$ [Дж/мм²].

Картирование снимков со сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показало, что предварительный нагрев подложки способствует растворению керамических частиц в матрице Ti-6Al-4V при одинаковом параметре E . При снижении энергии до $E = 12,9$ [Дж/мм²] получен композит с максимальным содержанием карбида бора в матрице и минимальной степенью растворения.

Дифрактограммы, полученные с помощью СИ, показали снижение интенсивности пиков вторичных фаз, что свидетельствует о снижении растворения керамических частиц. Также зафиксировано образование частиц TiB_2 , которое не было обнаружено с помощью СЭМ.

Установлено, что предварительный нагрев способствует образованию интерметаллида α^2-Ti_3Al , но оказывает незначительное влияние на интенсивность пиков, соответствующих как первичным элементам, так и вторичным фазам.

1. Liu Z. et al. A Review on Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Aerospace Applications: Directed Energy Deposition and Beyond Ti-6Al-4V // JOM. Springer US. 2021. Vol. 73, No. 6. P. 1804–1818.
2. Lee H. et al. Lasers in additive manufacturing: A review // Int. J. Precision Eng. and Manuf. Green Technol. Korean Soc Precision Eng 2017. Vol. 4, No. 3. P. 307–322.
3. Li N. et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review // J. Mater. Sci. Technol. Chin. Soc. Metals. 2019. Vol. 35, No. 2. P. 242–269.
4. Nartu M. S. K. K. Y. et al. In situ reactions during direct laser deposition of Ti-B4C composites // Scr Mater. Acta Materialia Inc. 2020. Vol. 183. P. 28–32.
5. Golyshev A., Orishich A. Microstructure and mechanical characterization of Ti6Al4V-B4C metal ceramic alloy, produced by laser powder-bed fusion additive manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020. Vol. 109, No. 1. P. 579–588.
6. Fomin V. M. et al. Structural-Phase State and Mechanical Properties of a Laser Cladding Titanium Matrix Composite Based on Ti64 Alloy and TiB2 Ceramics // Phys. Mesomechanics. 2024. Vol. 27, No. 1. P. 1–15.
7. Chen Y. et al. Synchrotron X-ray imaging of directed energy deposition additive manufacturing of titanium alloy Ti-6242 // Addit Manuf. Elsevier B. V. 2021. Vol. 41.
8. Pegues J. W. et al. In situ synchrotron X-ray imaging and mechanical properties characterization of additively manufactured high-entropy alloy composites // J. Alloys Compd. Elsevier Ltd. 2021. Vol. 876.

Научный руководитель — д-р техн. наук А. Г. Маликов

УДК 538.911

Влияние высокого и низкого содержания Nb на водородную проницаемость многокомпонентных сплавов системы Nb-Ni-Ti-Zr-Co

К. С. Гусев

Томский политехнический университет

Одним из наиболее эффективных способов разделения и очистки водорода является технология мембранного разделения, которая имеет такие преимущества, как низкие эксплуатационные затраты, минимальное количество операций и низкое энергопотребление [1]. Мембраны на основе Pd с гранцентрированной кубической решеткой обладают способностью диссоциировать и растворять молекулярный водород и, таким образом, демонстрируют превосходные свойства водородной проницаемости. Однако ввиду высокой стоимости Pd ученые развивают направление создания новых, альтернативных и эффективных мембран для очистки и разделения водорода. Металлы V группы (V, Nb, Ta) с более открытой объемно-центрированной кубической решеткой более проницаемы для водорода. Они являются многообещающими материалами-кандидатами для водородопроницаемых мембран. Многокомпонентные сплавы системы NbNiTiCoZr были выбраны для испытания на водородопроницаемость. Изучение водородопроницаемости этого сплава поможет в создании мембраны с высокой проницаемостью.

Образцы синтезировались из металлических порошков Nb, Ni, Ti, Zr, Co. Образцы отжигались в вакууме при 800 °С в течение 10 ч. Полученные сплавы разрезались на диски диаметром 10 мм и толщиной 0,7 мм. Измерение водородной проницаемости проводилось на некоммерческой газореакционной автоматической установке (ГРАМ, ТПУ, Томск).

Установлено, что синтезированные сплавы $Nb_{15}Ni_{20}Ti_{15}Zr_{30}Co_{20}$ и $Nb_{20}Ni_{20}Ti_{20}Zr_{20}Co_{20}$ имеют высокую водородную проницаемость при 400 °С, что делает их перспективными для мембран очистки и разделения водорода. Многокомпонентный эквимоллярный сплав демонстрирует высокую водородную проницаемость и устойчивость к водородному охрупчиванию, в то время как сплавы с высоким содержанием Nb ($Nb_{74}Ni_6Ti_9Zr_5Co_6$) подвергаются водородному охрупчиванию и разрушаются во время эксперимента на проницаемость.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FSWW-2024-0001).

1. Ockwig N. W., Nenoff T. M. Membranes for Hydrogen Separation // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 4078–4110.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. Б. Кашкаров

Керамика на основе карбида бора с добавкой дихорида хрома

Д. В. Дик

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Керамика на основе карбида бора из-за уникальных физико-механических свойств является привлекательным материалом для применений в различных отраслях промышленности [1]. Однако области ее применения ограничены сопротивлением ударным нагрузкам материалов на ее основе. Расширить технические характеристики керамических материалов с матрицей из B_4C можно добавлением частиц более пластичных материалов [2] и созданием немонотонности концентрации этих добавок в объеме изделия.

В данной работе такой добавкой является дихорид хрома, рассматриваются микроструктура и некоторые механические свойства керамики, полученной *in situ* горячим прессованием одновременно с химической реакцией карбидоборного восстановления оксида хрома с присутствием углеродного материала.

Шихты для изготовления керамики смешивали в стехиометрических коэффициентах в планетарной мельнице. Материалы с гомогенной концентрацией прессовали на лабораторном горячем прессе (разработки КТИ НП СО РАН) при максимальном усилии прессования 17,5 МПа, максимальной температуре 2000 °С с выдержкой максимальных параметров в течение 10 мин в атмосфере аргона. Слоистые материалы прессовали при температурах от 1875 до 2000 °С и спекали при 2000 °С.

Рентгенофазовый анализ полученных образцов показывает присутствие на дифрактограммах пиков только целевых фаз при заданных и меньших температурах, что подтверждает полноту протекания реакции. На снимках растровой электронной микроскопии наблюдается равномерное распределение частиц CrB_2 в объеме материала. Построены кумулятивные кривые распределения частиц по размерам в зависимости от концентрации добавки. Получены зависимости микротвердости, трещиностойкости и модуля упругости от содержания CrB_2 и плотности от времени выдержки при максимальных параметрах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00353) с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

1. Suzuya Yamada, Kiyoshi Hirao, Yukihiro Yamauchi S. K. B_4C-CrB_2 composites with improved mechanical properties // J. Eur. Ceram. Soc. 2003. Vol. 23. P. 561–565.
2. Wang S., Xing P., Gao S., Yang W., Zhuang Y. Effect of *in situ* formed CrB_2 on pressureless sintering of B_4C // Ceram. Int. 2018. Vol. 44, No. 16. P. 20367–20374.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Филиппов

УДК 542.8

**Разработка эффективных поверхностных контактов
на полимерных композитах, модифицированных
однослойными углеродными нанотрубками**

Н. А. Золотарев

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Композиционные материалы на основе полимерных матриц в наше время находят широкое применение. Введение многослойных и однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в полимерные матрицы позволяет получить композиты с комплексом улучшенных свойств (поверхностная прочность, устойчивость к нагрузкам, высокая электропроводимость и т. д.). Одно из направлений использования токопроводящих композитов, модифицированных ОУНТ, связано с изготовлением чувствительных элементов различных сенсоров (тензодатчики, искусственная сенсорная кожа, датчики для мониторинга старения материалов и конструкций и др.), для которых важным элементом является наличие эффективных контактов. За счет высокого поверхностного натяжения, как правило во всех композитах на основе полимерных матриц, ОУНТ находятся под поверхностным слоем. Для того чтобы обеспечить выход нанотрубок на поверхность, мы испаряли поверхностный слой полимера за счет лазерной обработки, тем самым обеспечивая хороший поверхностный контакт.

Цель данной работы — создать эффективные контакты на полимерных (полиметилметакрилат — ПММА, полипропилен — ПП) композитах, модифицированных ОУНТ, для улучшения работы сенсоров, используя лазерную обработку поверхности композита с контролем аморфного углерода. В работе использовались образцы Matrix 815/ПП и ОУНТ/ПММА с варьируемым содержанием ОУНТ (0,4; 0,5; 0,75; 1; 2 вес %).

Исследование влияния параметров обработки на изменение поверхностного сопротивления композитных пленок показало, что для всех образцов характерно монотонное уменьшение поверхностного сопротивления с увеличением плотности энергии при обработке. Также в ходе выполнения данной работы было установлено, что контакты, полученные обработкой композитов «полимер/ОУНТ» лазерным излучением, обеспечивают снижение контактного сопротивления в 2–3 раза, что может обеспечивать практическое использование лазерной обработки для создания эффективных устройств на основе таких композитов. По данным КР-спектров лазерная обработка привела к изменению доли аморфного углерода, появляющейся при термической деструкции полимера.

Научный руководитель — канд. хим. наук В. Л. Кузнецов

УДК 544.2

Методы машинного обучения при исследовании пористой структуры адсорбентов и катализаторов

А.Д. Иванов

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Основным экспериментальным методом исследования текстуры адсорбентов и катализаторов являются адсорбционные методы, которые позволяют определять удельную площадь поверхности, объемы пор и распределение пор по размерам. Однако ни один из методов расчета текстурных параметров не может претендовать на полное описание эксперимента из-за использования унифицированных модельных допущений. Существующие методы определения распределения пор по размерам фиксируют форму и химический состав стенок пор (или же его вовсе игнорируют). В связи с этим цель данной работы — разработать метод на основе машинного обучения, позволяющий исследовать пористую структуру адсорбентов и катализаторов при вариации геометрических и химических свойств поверхности.

Метод функционала плотности (DFT) позволяет рассчитать наборы корневых изотерм с определенной формой и химическим составом стенок пор при вариации их размеров. Это позволяет решить обратную задачу по определению распределения пор по размерам на основе экспериментальных адсорбционных данных. Однако современные методы DFT, реализованные на серийных приборах, могут использовать только один набор корневых изотерм на выбор. Методы машинного обучения являются одним из возможных решений, позволяющих строить распределение по размерам путем использования неограниченного количества наборов корневых изотерм.

В ходе работы был разработан метод для интерполяции корневых изотерм и алгоритм для генерации набора изотерм с определенным распределением пор по размерам. В ходе работы использовалось два набора корневых изотерм цилиндрической и щелевой геометрии пор. Разработаны модели машинного обучения на основе нейронной сети, позволяющие по изотерме адсорбции определять распределения пор по размерам для заданного набора корневых изотерм. Проведено сравнение результатов, полученных с помощью моделей машинного обучения и классических методов обработки изотерм. Исследована возможность использования методов машинного обучения для определения принадлежности пор образца к щелевой или цилиндрической геометрии при вариации химического состава стенок пор.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. В. Гренев

УДК 539.123

Знакомство с детекторами регистрации нейтрино

А. Н. Измайлов

Восточно-Казахстанский технический университет
им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

На данный момент детекторизация нейтрино продвинулась на новый уровень. Такие детекторы, как DANSS, NEOS, РЭД-100, Нейтрино-4, регистрируют большое количество нейтрино ежедневно. Задачи развития регистрации нейтрино представляют собой снижение цены, уменьшение размеров установок, упрощение работы и увеличение количества лабораторий. Данная работа посвящена нейтрино, которое образуется при работе ядерного реактора, для большего ознакомления с данной элементарной частицей, детекторами и экспериментами, которые способствуют регистрации нейтрино.

Так как нейтрино — продукт β -распада, то такие элементы, как торий и уран, подвергаются данному распаду, однако регистрация земных нейтрино — очень трудоемкий процесс. Также землю бомбардируют космические нейтрино, которые мы можем зарегистрировать [1]. Обычно нейтрино регистрируют в ядерных реакторах, ведь там пучок нейтрино больше, тем самым выше вероятность регистрации. Здесь мы можем предположить, что помимо нейтрино, регистрируемых в основном в ядерных реакторах, регистрация космических и природных (земных) нейтрино важна, так как информация о данных частицах позволит узнать их происхождения и найти их источник. Данные исследования будут полезны для космомикробиологии и внесут огромный вклад в астрофизику.

Яркий пример — эксперимент DANSS, он приоритетен в том, что имеет высокую скорость счета ВЗК (до 5 тыс. событий/в день) и может использоваться на других реакторах. Его работа состоит в использовании сцинтилляционного детектора и 2,5 тыс. полосок с тонкой пленкой из гадолиния Gd. Детектор NEOS имеет хорошее энергетическое разрешение в 5 % при 1 МэВ, чем не может похвастаться детектор DANSS. Детектор NEOS имеет внутренний объем 1008 л, заполненный жидким сцинтиллятором, легированным 0,5 % Gd. Одним из приоритетов в развитии квантовой физики в Казахстане является установление детекторов регистрации нейтрино, а также поиск новых методов усовершенствования способов регистрации на базе Национального ядерного центра Республики Казахстан в г. Курчатове.

1. Боровой А. А. 12 шагов нейтринной физики. М.: Знание, 1985.

Научный руководитель — А. А. Борисов

УДК 669.7.017

Исследование структуры и прочностных свойств сплава АК9, упрочненного субмикрочастицами ErF_3

Н.И. Кахидзе, Р.Г. Мубараков, И.Л. Синкина

Томский государственный университет

Повышение эффективности транспортной сферы промышленности реализуется за счет применения конструкционных материалов с высокой удельной прочностью. Повышение прочностных свойств известных алюминиевых сплавов — актуальная задача науки и промышленности. Известно, что добавка до 1 мас.% тугоплавких нано- и микрочастиц в металлическую матрицу может обеспечить повышение прочностных свойств базового сплава на 15–80 % [1].

В данной работе было исследовано влияние различных концентраций частиц ErF_3 на структуру и прочностные свойства сплава АК9 в литом и термообработанном состоянии. Сплавы были получены методом литья в стальной кокиль с применением обработок внешними полями (механическое перемешивание, ультразвуковая и вибрационная обработка).

В результате проведенных исследований установлено, что добавка фторида эрбия в сплав системы Al-Si приводит к измельчению зерна и повышению прочностных свойств на 27–45 %. При введении в сплав свыше 0,5 мас.% частиц ErF_3 в структуре сплава фиксируются агломераты и кластеры частиц ErF_3 .

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FSWM-2020-0028).

1. Кахидзе Н. И., Хрусталев А. П., Жуков И. А. Исследование влияния наноразмерных модификаторов AlN на механическое поведение магниевого сплава МЛ12 при квазистатическом нагружении // Сб. материалов форума «Новые материалы и перспективные технологии», Москва, 23–27 ноября 2020 г. М.: АНО ЦНТР, 2020. С. 416–419.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Б. Ворожцов

УДК 538.9

Получение гибридных слоистых материалов на основе сульфидов молибдена и графена

И. С. Константинов

Новосибирский государственный университет
Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

Композитные материалы на основе слоев графена [1] и сульфидов молибдена (MoS_2 , Mo_2S_3) [2] имеют перспективы применения в качестве электродов литий-ионных батарей. В данной работе разрабатывается методика термобарического синтеза композитов из прекурсоров порошка nanoалмазов и MoS_3 при температурах до $1400\text{ }^\circ\text{C}$ и давлениях до 1000 атм. Предложена и проходит испытания конструкция графитовой пресс-формы, в которой происходит контролируемый выход паров серы. В работе будут получены образцы, имеющие разное содержание графена, и определен порог перколяции.

1. Geim A. K., Grigorieva I. V. Van der Waals heterostructures // Nature. 2013. No. 7459 (499). P. 419–425.
2. Song I., Park C., Choi H. C. Synthesis and properties of molybdenum disulphide: from bulk to atomic layers // RSC Advances. 2015. No. 10 (5). P. 7495–7514.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Окотруб

УДК 548

Реализация схемы Бонда на современном монокристалльном дифрактометре

А. Л. Кудрявцев

Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Известно достаточно большое число методик уточнения параметров элементарной ячейки (ПЭЯ) монокристаллов. Наиболее распространенные схемы экспериментов: Бонда, четырехкристального спектрометра, обратного рассеяния, двух компланарных рефлексов, Реннингера, интерференционные методы и др. Большинство из них требуют специальной аппаратуры и достаточно сложны в реализации. Среди всех выделяется классическая схема Бонда, основным элементом которой является прецизионный однокружной гониометр (точность $1''$). Относительная погрешность измерений межплоскостных расстояний (d) может достигать 10^{-7} . Эксперимент заключается в построении профилей дифракционных отражений $I(\omega)$ при двух симметричных положениях кристалла и точечного детектора. Все элементы располагаются в экваториальной плоскости гониометра. Такой подход позволяет убрать основные значимые ошибки. Гониометры современных дифрактометров уступают по точности, однако наличие матричного детектора позволяет отказаться от построения кривых $I(\omega)$. Для реализации схемы Бонда на современном дифрактометре предлагается следующая схема:

- 1) определение ориентации кристалла и предварительных значений ПЭЯ;
- 2) выбор подходящего рефлекса hkl ;
- 3) расчет углов φ , ω для съемки рефлекса в двух симметричных положениях $\pm 2\theta_D$ на экваториальной окружности. Выбор расстояния D ;
- 4) ω -сканирование рефлексов в диапазоне $\pm 2^\circ$, обработка $2D$ -профилей и определение положений максимумов (координаты X и Y);
- 5) вычисление углового размера пикселя (γ), определение угла $2\theta_{hkl} = (4\theta_D + \Delta^*\gamma)/2$ ($\Delta = X_- - X_+$). Далее расчет d_{hkl} и ПЭЯ.

По такой схеме проведено исследование трех эталонов: монокристаллов Si, LaB₆ и Ge. Установлено, что отклонения измеренных ПЭЯ от эталонных значений не превышают 0,0005 Å. Это соответствует абсолютной ошибке, вычисленной исходя из точности гониометра. Относительная погрешность измерений составляет $1,5 \times 10^{-4}$. Уточнение ПЭЯ нескольких монокристаллов, полученных в системе Y₂O₃-Eu₂O₃ при мольном соотношении 1 : 1, показало образование фаз (Y_{1-x}Eu_x)₂O₃ с разбросом значений x (оценка проведена исходя из правила Вегарда). Проведено сравнение с результатами рентгеноструктурного анализа. Рассматривается возможность использования методики на станциях СИ.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук С. А. Громилов, П. С. Серебренникова

УДК 543.4

Разработка рентгенодифракционного эталона для малых углов

Д. В. Лаврехин

Новосибирский государственный университет

Проведение рентгенодифракционных экспериментов, нацеленных на получение высокоточных данных, неразрывно связано с использованием эталонных образцов с хорошо известными параметрами. Стандартные эталонные материалы (*standard reference material*, SRM), такие как Si (SRM-640), LaB_6 (SRM-660) и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (SRM-1976), позволяют вводить поправки только в области углов $> 25^\circ 2\theta$ для $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Существующий эталон для области малых углов — фторфлогопит (SRM 675) — имеет первый дифракционный рефлекс на $8,853^\circ 2\theta$. Проблема поиска универсального малоуглового эталона для меньших значений угла 2θ при этом остается открытой. Известные кандидаты на роль малоугловых эталонов также обладают определенными недостатками, такими как ядовитость (меркаптиды свинца), нестабильность и большая ширина пиков (бегенат и стеарат серебра).

В данной работе мы провели исследование двух соединений, потенциально подходящих на роль малоуглового эталона: селенида галлия (GaSe) и комплексного соединения меди(II) с 4-фенацетилиден-2,2,5,5-тетраметил-3-имидазолин-1-оксилом (CuL_2) [1]. На дифрактограмме GaSe есть два дифракционных пика в малоугловой области с угловым положением $\sim 11,1^\circ 2\theta$ (0 0 2) и $22,3^\circ 2\theta$ (0 0 4), а также серия достаточно интенсивных рефлексов 001 в области $> 80^\circ 2\theta$. Таким образом, GaSe подходит на роль более доступной альтернативы для SRM 675, так как его кристаллы являются высокочистыми и относительно легкодоступными. Однако в ходе исследования выявился существенный недостаток GaSe : длительное перетирание монокристаллов приводит к уширению наблюдаемых рефлексов. Этому недостатка лишено соединение CuL_2 . Кристаллы CuL_2 хорошо растворимы в спирте. Это позволяет готовить ориентированные образцы, так как при высыхании раствора CuL_2 образуются мелкие кристаллы, ориентированные по поверхности подложки. В работе [1] было проведено уточнение параметра тетрагональной ячейки $a = 44,299(3) \text{ \AA}$ для CuL_2 . В данной работе точность определения параметра a была улучшена, а применимость CuL_2 в качестве малоуглового эталона продемонстрирована на образцах тонких слоев фталоцианинов металлов.

1. Ванина П. Ю., Громилов С. А. // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2012. Т. 7, № 2. С. 98–102.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. С. Сухих

УДК 544.07, 544.02

**Исследование изменения морфологии твердых растворов
со структурой перовскита La-Ca-Mn-Co-O методами
сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной
спектроскопии в различных средах**

А. А. Лукин

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

В настоящее время изучение катализаторов требует качественных и высокоточных методов исследования. Одними из таких методов исследования являются сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС). Данные методы позволяют получать изображения поверхности исследуемых объектов, а также проводить химический анализ. В нашем эксперименте использовался сканирующий электронный микроскоп Tescan Solaris S900 (FIB/SEM), укомплектованный ЭДС ULTIM MAX 100 с системой микроанализа Aztec. Данный микроскоп позволяет исследовать морфологию поверхности твердых объектов с разрешением до 0,8 нм при 30 кэВ и проводить химический анализ с разрешением около 1 мкм при 20 кэВ. В качестве объекта исследования были выбраны образцы сложных оксидов (перовскитов) состава $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x(\text{MnCo})\text{O}_3$. Перовскиты этой группы применяются в роли катализаторов в высокотемпературных процессах окисления, в том числе в реакциях полного окисления легких углеводородов. Каталитические свойства этих растворов зависят от методов синтеза и степени замещения катионов. Кислородная нестехиометрия в твердых растворах, возникающая в результате синтеза или термообработок, может приводить к образованию дефектов или гетерогенной структуры, что может оказывать как позитивное, так и негативное влияние в зависимости от характера выделяющихся на поверхность катионов.

Главная цель данной работы — оценить морфологию и химический состав в твердых растворах $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x(\text{MnCo})\text{O}_3$ в зависимости от изменения состава, а также после термообработок в различных средах. В работе показано изменение химического состава твердых растворов после термических обработок, в частности увеличение содержания кальция на поверхности частиц. Также получены гистограммы распределения размеров частиц и поровых пространств. Показано, что в результате термических обработок средний размер частиц существенно увеличивается.

Научный руководитель — канд. хим. наук Е. А. Супрун

УДК 539.23

Капельная эпитаксия островков GaN со структурой цинковой обманки на поверхности графеноподобной структуры g-SiN

Я. Е. Майдэбура

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

Уникальные свойства GaN квантовых точек (КТ), такие как большая энергия связи, сила осциллятора экситона и большая эффективная масса электронов и дырок, вызывают значительный интерес со стороны фундаментальной и прикладной наук. На основе КТ GaN было продемонстрировано создание светодиодов, однофотонных излучателей, солнечных элементов, одноэлектронных транзисторов и спиновых затворов. Фундаментальной проблемой широкого применения КТ GaN является отсутствие относительного простого способа контролируемого формирования КТ GaN.

Возможным решением является формирование КТ GaN методом капельной эпитаксии (КЭ) на поверхности графеноподобного слоя SiN (g-SiN). Поверхность g-SiN за счет большой длины диффузии адатомов Ga и аморфизации g-SiN при обработке в аммиаке позволит подавить побочные механизмы формирования капель и КТ. Это сделает возможным контролируемое зарождение и нитридизацию капель, и, соответственно, КТ GaN.

Эксперименты по формированию КТ на g-SiN проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии Riber CBE-32P. На очищенной путем отжига при 1076 °C подложке Si(111) был сформирован g-SiN путем обработки подложки в потоке аммиака 10 sccm при температуре роста 962 °C длительностью 6 с. После чего при температуре 600 °C наносились капли Ga, которые обрабатывались в течение 4,5 мин в потоке аммиака 250 sccm. Наблюдение за изменением морфологии поверхности проводилось методом дифракции быстрых электронов на отражение *in situ*. *Ex situ* образцы были исследованы методом высокоразрешающей электронной микроскопии (ВРПЭМ).

В результате было обнаружено, что на поверхности слоя g-SiN происходит формирование островков GaN с плотностью около $5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ и узким распределением по размерам ($\sigma = 13 \%$ при среднем латеральном размере около 36 нм). Островки, несмотря на шестиугольную симметрию подложки Si и слоя g-SiN, обладают структурой типа цинковой обманки, что подтверждается появлением характерных рефлексов 1/3 на картине дифракции. Из анализа ВРПЭМ-изображений отдельных островков следует, что островки лежат непосредственно на поверхности g-SiN, обладают структурой типа цинковой обманки и практически свободны от упругих напряжений.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук К. С. Журавлев

УДК 539.5

Структура и свойства дисперсионно-твердеющего сплава 47ХНМ

А. Е. Макаренко¹, И. С. Кульбакин¹, Е. В. Короткова², Э. И. Якушевский²

¹Восточно-Казахстанский университет
им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

Работа посвящена исследованию структуры и свойств сплава 47ХНМ, обладающего свойством сверхпластичности. Благодаря своей способности к деформации без разрушения сверхпластичные материалы позволяют создавать более сложные формы, которые были бы невозможны с использованием традиционных материалов. Например, для создания изделий, которые могут выдерживать большие температуры, давления и использоваться в ядерной энергетике. Стоит отметить, что сверхпластичные материалы — это идеальный выбор для создания сложных 3D-структур.

Цель работы — выявить режимы термомеханической обработки для улучшения свойств сплава, позволяющих использовать его в экстремальных условиях (температура, давление, радиационное излучение).

Сравнение экспериментальных данных, полученных при исследовании структуры 47ХНМ методами рентгеноструктурного анализа, дифракционной электронной микроскопии, выявило формирование протяженных кластерных плотно упакованных наноструктур в зонах локализации пластической деформации. На основании расшифровки картин дифракции электронов и рентгеновских лучей предлагается 3D-модель кластерной структуры межзеренных границ в сплаве 47ХНМ. Структура представляет собой систему октаэдрических кластеров, которые формируются на основе ОЦК-решетки хрома с добавлением атомов никеля в определенные ее узлы.

Для такой модели рассчитана плотность спин-поляризованных электронных состояний, позволяющая объяснить природу появления ферромагнетизма в сплаве 47ХНМ.

Использование кластерной модели позволяет объяснить большую скорость переключения химических связей и, как результат, природу появления сверхпластичности.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, проф. Д. Е. Ерболатулы

УДК 669.017

Получение высокоэнтропийной керамики системы Hf-Cr-Ti-FeV-N методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Р.Г. Мубараков, И.А. Бельчиков

Томский государственный университет

Высокоэнтропийные керамические (ВЭК) материалы на основе тугоплавких металлов представляют интерес благодаря сочетаниям свойств, таких как высокая температура плавления, износостойкость, высокая твердость [1]. Перспективным методом получения ВЭК является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), который зарекомендовал себя при изготовлении широкого класса соединений, в том числе нитридов, за счет контроля структуры и фазового состава, высокой энергоэффективности и скорости реакции [2]. Цель данной работы — получить ВЭК-системы Hf-Ti-Cr-Fe-V-N методом СВС и изучить структуру с помощью рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа.

В качестве исходных компонентов смеси были использованы порошки хрома (дисперсность ≤ 50 мкм, чистота ≥ 99), гафния (≤ 200 мкм, чистота 99), титана (≤ 280 мкм, чистота ≥ 99) и феррованадия (≤ 200 мкм, чистота ≥ 98). Исходные компоненты смешивались согласно стехиометрическому соотношению $(\text{Hf}_{0,25}\text{Ti}_{0,25}\text{Cr}_{0,25}(\text{FeV})_{0,25})\text{N}$. После проводилась механическая активация смеси в планетарной мельнице в течение 120 мин при частоте 14 Гц в среде аргона. Высокоэнтропийная керамика была получена методом СВС. Горение осуществлялось в среде азота (чистота 99,99 %).

Температура измерялась при помощи вольфрам-ренийевых термопар WR 5/20 диаметром 0,5 мм. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением на основе базы данных PDF4+. Микроструктура изучалась на электронном микроскопе Tescan MIRA 3 LMU.

Установлено образование фаз TiN, HfN и фазы с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой. В результате синтеза сформировалась композиционная структура, состоящая из элементов (Hf, Ti, Cr, Fe, V)N, которая представляет собой ВЭК-матрицу с ГЦК-структурой, и растворов (Ti, Hf)N.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00144).

1. Moskovskikh D. et al. Extremely hard and tough high entropy nitride ceramics // Sci. Rep. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 19874.
2. Evseev N. S. et al. A theoretical and experimental investigation on the SHS synthesis of (HfTiCN)-TiB₂ high-entropy composite // Ceram. Int. 2022. Vol. 48, No. 11. P. 16010–16014.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Н. С. Евсеев

УДК 544.2

Изучение влияния параметров CVD-синтеза на структуру и сенсорные свойства пленок графена

М. А. Новиков

Новосибирский государственный университет
Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск

В настоящее время графен привлекает большой интерес ввиду возможности использования его в качестве сенсорного материала. Это обусловлено двумерной структурой графена и его необычными физическими свойствами, такими как большая удельная поверхность, высокая электропроводность, а также эффективная адсорбция молекул разнообразных газов. Влияние на свойства графена, его целостность и дефектность оказывает способ синтеза графена.

Одним из методов синтеза графена является химическое осаждение из газовой фазы (CVD). Основную роль в CVD-синтезе играют свойства подложки и газодинамические параметры синтеза. Для CVD-синтеза графена в качестве материала подложки используют медь, никель, и др. В настоящей работе синтез графена проводился на катанной медной фольге толщиной 25 мкм. Образцы графена были синтезированы в проточном CVD-реакторе. Отжиг подложки проводился в атмосфере водорода, чтобы восстановить оксидный слой на поверхности фольги. Насыщение фольги углеродом происходило в результате термоллиза газовой смеси метана и водорода при пониженном давлении. Температура разложения метана при формировании графенового слоя составляла 1050 °С. В результате синтеза могут быть получены образцы графена площадью до 3 см². Образцы графена исследовались с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Для исследования сенсорных свойств образцы графена были перенесены с поверхности медной подложки на поверхность стекла. Полученные образцы были протестированы в качестве сенсоров на циклическое воздействие акцепторных (диоксида азота) и донорных (аммиака) газов при комнатной температуре.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Окотруб

УДК 537.86

Исследование проводимости материалов на основе одностенных углеродных нанотрубок в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц

З.Н. Нуриахметов

Новосибирский государственный университет

Разработка функциональных материалов на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) является перспективным направлением в технике сверхвысоких частот (СВЧ). Важным параметром нанокompозитных материалов, характеризующим их свойства, является электропроводность. Поэтому разработка и апробация методов исследования проводимости является актуальным направлением для исследования.

В данной работе предложена методика для измерения проводимостей тонких пленок в СВЧ-диапазоне с помощью объемного резонатора. Методика заключается в измерении добротности резонатора, часть стенок которого выполнена из исследуемого материала, с последующим решением обратной задачи для определения электропроводности. В работе с помощью предложенной методики измерена проводимость композитов на основе ОУНТ. Изготовление композита состояло из следующих этапов: аэрографического распыления суспензии ОУНТ на подложку из полиэтилентерефталата (ПЭТ) и последующей сушки, при которой происходит выпаривание жидкого компонента суспензии и осаждение агломератов ОУНТ. В работе рассмотрено влияние различных жидких компонентов суспензии на электродинамические свойства изготовленных на их основе материалов.

В работе также проведено измерение проводимости полученных композитов с помощью часто используемой TRL-методики, заключающейся в измерении коэффициентов отражения и прохождения тонкой пластины из исследуемого материала и последующего определения электропроводности. В работе приведено сравнение результатов измерения электропроводности полученных композитов с помощью предложенной резонансной методики и TRL-метода. Рассматриваются основные источники ошибок этих методов и способы их устранения.

Научный руководитель — канд. техн. наук Ю. Д. Черноусов

УДК 537.311.3; 539.3

Пьезорезистивные свойства композитов на основе жидких силиконов и электропроводящих добавок

Н. В. Петякин

Новосибирский государственный университет

В настоящее время активному развитию носимой электроники и систем отслеживания для «мягкой» робототехники препятствует отсутствие материалов, позволяющих детектировать изменение формы или положения объекта без существенного влияния на его характеристики. Перспективным вариантом решения данной проблемы являются композитные материалы на основе силикона и углеродных проводящих добавок, при этом использование комбинаций различных форм углерода позволяет улучшить свойства итогового материала. Такая комбинация позволяет придать материалу пьезорезистивные свойства, что позволяет определять изменение формы путем измерения сопротивления. Цель данной работы — изучить влияние параметров компаундирования композитов на основе жидкого силикона типа LSR и углеродных наполнителей на их пьезорезистивные свойства.

Изготовление образцов производилось путем смешивания на трехвалковой мельнице жидкого силикона и технического углерода / одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) с дальнейшей вулканизацией состава при давлении 15 МПа и температуре 200 °С в течение 10 мин. У полученных композитов были изучены физико-механические свойства: прочность к разрыву, удлинение при разрыве и прочность к раздиру (путем испытаний на универсальной тестировочной машине) и твердость по Шору А (с использованием дюрометра). Для изучения пьезорезистивных характеристик в процессе циклического растяжения образцов четырехконтактным методом было измерено их сопротивление.

Выявлено, что введением в силикон модифицированных ОУНТ можно добиться снижения порога перколяции, но при этом пьезорезистивные характеристики образцов не изменяются. Также было изучено влияние параметров смешения композитов на их удельное сопротивление. При изучении физико-механических свойств выявлено, что использование гибридных наполнителей (технический углерод и ОУНТ) позволяет воспроизвести характеристики исходного силикона. При этом по мере увеличения содержания в составе технического углерода значительно растут остаточные удлинения. Обнаружено, что образцы с ОУНТ и техническим углеродом демонстрируют различное поведение пьезорезистивных характеристик по мере увеличения количества циклов нагрузки, в то время как создание гибридных систем позволяет частично компенсировать недостатки различных проводящих наполнителей.

Научный руководитель — канд. хим. наук Е. Г. Лямышева

УДК 538.958

Исследование оптических свойств двумерных MoS_2 , WS_2 , полученных методами «скотча» и CVD

Б. Р. Платонов

Северо-Восточный федеральный
университет им. М. К. Аммосова, Якутск

Исследование наноматериалов, особенно двумерных кристаллических структур, привлекает все большее внимание научного сообщества благодаря их уникальным свойствам и потенциальным применениям в различных областях, начиная от электроники и оптики и заканчивая катализом и медициной. Среди таких материалов монодисперсные слои дисульфида молибдена (MoS_2) [1] и дисульфида вольфрама (WS_2) [2] занимают особое место благодаря их фундаментальным свойствам и перспективами использования.

В данной работе были исследованы структурные свойства двумерных MoS_2 и WS_2 , полученных двумя способами: «скотч»-методом и методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). В ходе работы были выполнены следующие задачи: отработка методики получения двумерного MoS_2 и WS_2 методом CVD; получение методом «скотча» двумерных MoS_2 и WS_2 из объемных кристаллов, на примере графена из графита.

Синтез методом ХОГФ MoS_2 и WS_2 был произведен в трехзонной трубчатой печи на поверхности кремниевых пластин с толщиной окисного слоя 300 нм. В качестве прекурсоров использовались порошки MoO_3 и WO_3 , которые находились в зоне печи, разогретые до температур 750 и 1000 °С соответственно. Порошок серы располагался вне высоких температур, а в качестве несущего газа использовался аргон.

Исследование структурных свойств были проведены с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и снятия спектров фотолюминесценции на установке INTEGRА SPECTRA (фирмы NT-MDT). Также для исследования морфологии полученных образцов был использован метод атомно-силовой микроскопии.

1. Samy O., Zeng S., Birowosuto M. D., El Moutaouakil A. A review on MoS_2 properties, synthesis, sensing applications and challenges // Crystals. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 355–378.
2. Lan C., Li C., Ho J. C., Liu Y. 2D WS_2 : from vapor phase synthesis to device applications // Adv. Electron. Mater. 2021. Vol. 7, No. 7. P. 2000688.

Научный руководитель — П. В. Винокуров

УДК 544.2

Окислительный термолиз дигидрата оксалата железа в гематит: исследование структурных особенностей промежуточных фаз

Н. А. Сеница

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Реакция окислительного термолиза дигидрата оксалата железа $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ протекает через дегидратацию с образованием безводного оксалата FeC_2O_4 . Взаимодействуя с кислородом воздуха, FeC_2O_4 превращается в ферригидрит, дальнейший нагрев которого приводит к превращению ферригидрита в гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Реакция проходит топотаксически с образованием псевдоморфозы.

Найден подход к решению следующих задач:

- 1) определение дефектной структуры безводного оксалата FeC_2O_4 ;
- 2) анализ влияния дефектов упаковки в катионной и анионной подрешетках гематита, а также влияния формы и размеров кристаллитов на рентгеновскую дифракционную картину. Определение формы частиц типа дефектов упаковки и их концентрации в зависимости от температуры;
- 3) определение общих структурных мотивов в смежных структурах FeC_2O_4 — ферригидрит — Fe_2O_3 с целью анализа структуры ферригидрита.

Подход к решению данных задач основан на расчете рентгеновских дифракционных картин на основе статистических моделей 1D разупорядоченных нанокристаллов различной формы и размеров [1].

1. Cherepanova S. V. and Tsybulya S. V. // Mater. Sci. Forum. 2004. Vol. 443. P. 87.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Черепанова

УДК 544.2+544.4

Исследование адсорбции метанола на поверхности монокристалла Ag(111) при низких температурах

И. А. Тарасов

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Исследование адсорбции метанола на поверхности катализаторов представляет интерес с практической и фундаментальной точки зрения. Катализаторы на серебре активно используются для получения водорода из метанола, а процесс адсорбции молекул на поверхности является первым шагом реакций в гетерогенном катализе.

В данной работе исследовалась адсорбция молекул метанола на поверхности монокристалла Ag(111) при низких температурах методом ИК-спектроскопии отражения-поглощения с модуляцией поляризации ИК-излучения (PM IRRAS). Особенностью данного метода является необходимость проведения исследований на атомно-гладких поверхностях проводящих твердых тел, так как регистрируется отраженный от поверхности пучок поляризованного ИК-излучения, что также позволяет получать информацию о геометрии адсорбированных частиц на поверхности. Монокристалл Ag(111) сперва охлаждали до 80 К, затем в камеру подавали 50 Ленгмюр (Л) метанола, после чего ступенчато нагревали с шагом 10 К до тех пор, пока метанол не десорбируется с поверхности серебра. Запись ИК-спектров проводилась непрерывно во время всего нагрева с помощью ИК-спектрометра VERTEX 80v.

С помощью метода PM IRRAS были получены ИК-спектры для адсорбированных частиц на поверхности монокристалла Ag(111) при различных температурах. В ходе дальнейшей обработки ИК-спектров адсорбированных частиц на поверхности были установлены значения температур, при которых метанол находится в аморфной фазе (80–100 К) и происходит переход в кристаллическую α -фазу (100 К) соответственно. Молекулы метанола могут быть связаны между собой водородными связями в виде разных небольших цепочек и олигомеров, что характерно для аморфной фазы, либо в структурированные длинные цепочки, что характерно для кристаллических фаз. Также при увеличении температуры до 130 К наблюдается десорбция метанола с поверхности монокристалла Ag(111). Для каждой температуры получены значения частот $\nu(\text{OH})$ в спектрах и вычислены значения длин связей O-H и O-O для водородных связей в метаноле.

Научный руководитель — д-р хим. наук В. В. Каичев

УДК 546.72

Влияние оболочки ZnO на структуру и магнитные характеристики наночастиц типа «ядро – оболочка» $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$

Д. С. Ткаченко

Санкт-Петербургский государственный университет

Метод магнитно-резонансной томографии (МРТ) широко применяется для диагностики внутренних органов и тканей. Однако для улучшения визуализации раковых опухолей требуются эффективные T2-контрастные агенты, поиск и разработка которых ведется до сих пор. Наночастицы магнетита (Fe_3O_4) обладают большим потенциалом благодаря своей биосовместимости и суперпарамагнитным свойствам, но их применение все еще ограничено из-за окисления поверхности и ухудшения магнитных характеристик.

Решение этой проблемы заключается в создании защитной оболочки вокруг наночастиц Fe_3O_4 . Однако формирование оболочки приводит к изменению кристаллической структуры и, следовательно, свойств наночастиц типа «ядро — оболочка». Ответ на вопрос, в чем заключается это влияние и как его прогнозировать, и определил направление данного исследования.

С этой целью были получены наночастицы $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ с разной толщиной и степенью кристалличности оболочки ZnO. Регулирование этих параметров проводилось путем варьирования температуры синтеза и последовательности введения реагентов. Полученные образцы были охарактеризованы комплексом физико-химических методов. Также был проведен эксперимент МРТ *in vitro* и моделирование магнитных свойств методом Монте-Карло.

Анализ структуры показал, что формирование оболочки ZnO приводит к появлению дополнительных промежуточных слоев (а именно, маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и гетита $\alpha\text{-FeOOH}$), что обеспечивает плавный переход между кристаллическими фазами ядра Fe_3O_4 и оболочки ZnO. Этот вывод подтвержден результатами компьютерного моделирования.

В свою очередь, изменение промежуточного слоя обусловлено как давлением оболочки на ядро при ее кристаллизации, так и процессами кристаллизации самого ядра. Управляемое получение устойчивых к окислению магнитных наночастиц типа «ядро — оболочка» открывает перспективы для их использования в магнитно-резонансной томографии, особенно для получения хорошо различимых снимков раковых опухолей внутренних органов и тканей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-23-00220). Автор выражает благодарность ресурсным центрам РДМИ, МРМИ, МАСВ, ИТКН, ФМИП, ОЛМИВ Научного парка СПбГУ.

Научный руководитель — канд. хим. наук, доц. О. М. Осмоловская

УДК 620

**Исследование закономерностей формирования
сферических и стержневидных магнитных наночастиц
 $MnFe_2O_4$, полученных микроволновым гидротермальным методом
для биомедицинских приложений**

А. О. Уракова

Томский политехнический университет

Магнитные наночастицы (НЧ) феррита марганца (МФО) являются перспективными кандидатами для применения их в различных областях биомедицины из-за их физических свойств и биосовместимости [1]. Варьирование параметров синтеза позволяет менять формы и свойства у НЧ для разных задач. Гидротермальный метод (ГМ) позволяет контролировать свойства и морфологию НЧ, применяя простую одностадийную процедуру синтеза [2]. Микроволновый гидротермальный метод (МГТМ) быстрее в сравнении с обычным ГМ, что позволяет получать более однородные по форме НЧ за счет равномерного нагрева [3]. Ранее не исследовалось влияние одностадийного синтеза МГТМ на свойства и морфологию НЧ МФО. Таким образом, цель работы — исследовать влияние параметров МГТМ на морфологию и свойства НЧ МФО.

Для синтеза НЧ МФО растворяли 35 ммоль $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, 17,5 ммоль $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ и 5,25 моль $NaOH$ в воде и синтезировали МГТМ в течение 3 и 6 ч при 180 и 200 °С, после чего промывали до нейтрального уровня pH.

В результате проведенного исследования установлены механизмы формирования МФО НЧ МГТМ. Наблюдалось увеличение размеров и изменение морфологии на стержневидную со сферической при увеличении длительности МГТМ. К ускорению процесса формирования стержневидных НЧ привело увеличение температуры синтеза. Показано снижение намагниченности насыщения НЧ при увеличении температуры и длительности МГТМ. В сравнении с остальными образцами у НЧ МФО, полученных при 200 °С в течение 3 ч, содержание фазы $MnFe_2O_4$ меньше всего и составляет 88 %, что, вероятно, обусловлено механизмом растворения осадка [4], в результате которого при росте стержней временно росло содержание фазы Fe_2O_3 .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-588 от 1.06.2021) и за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-23-00511).

1. Akhlaghi N. // J. Ind. Eng. Chem. 2021. Vol. 103. P. 292–304.
2. Zhen L. // J. Magn. Magn. Mater. 2008. Vol. 320. P. 2672–2675.
3. Kharisov B. // CRC Concise Encyclopedia Nanotechnology; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016. P. 588–599.
4. Eckert Jr J. O. // J. Am. Ceram. Soc. 1996. Vol. 79. P. 2929–2939.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Р. В. Чернозем

УДК 539.8

Моделирование свойств кристаллов $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{NO}_2)]\text{Cl}(\text{NO}_3)$, проявляющих фотомеханические эффекты

М. А. Хайновский

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Для кристаллических материалов квантово-химическое моделирование макро- и микроизменений в экстремальных условиях высокого давления или температуры получило большое распространение. Оно позволяет предсказать в том числе различные механические свойства твердых тел, характеризующие отклик структуры на внешнее и внутреннее давление.

Среди методов изучения химических связей и межмолекулярных взаимодействий в кристаллах выделяют теоретические подходы теории функционала плотности (*Density Functional Theory*, DFT) и экспериментальные методы прецизионного рентгеноструктурного анализа. Сочетание этих методов дает наиболее полную информацию о взаимосвязи структуры и свойств и роли межмолекулярных взаимодействий в формировании пространственной структуры кристаллов и ее отклике на различные воздействия.

Особый интерес представляют соединения, кристаллы которых способны давать заметный механический отклик на протекание в них фотопревращений: обратимо деформироваться под действием света и восстанавливать форму после прекращения засветки. В качестве примера подобных соединений в данной работе выбраны кристаллы $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{NO}_2)]\text{Cl}(\text{NO}_3)$, хорошо изученные ранее экспериментально [1].

Исследована взаимосвязь механических свойств кристаллов $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5(\text{NO}_2)]\text{Cl}(\text{NO}_3)$ с возникающими в них фотомеханическими эффектами. Выявлена взаимосвязь между структурными изменениями в этих кристаллах и изменениями в распределении электронной плотности и ее производных с внутренним квантовым электронным давлением, внутрикристаллическим полем и энергетическими характеристиками химического связывания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-23-00106).

1. Болдырева Е. В. Кристаллоструктурные аспекты твердофазной связевой нитро-нитрито-изомеризации в пентааминакатах кобальта (III) // Коорд. химия. 2006. Т. 27 (5). С. 1.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. Е. В. Болдырева

УДК 543.4: 543.5: 544.1

**Модельные биметаллические Pd-Co/ВОПГ катализаторы:
приготовление и исследование методами
рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии
и сканирующей туннельной микроскопии**

А. С. Черепанов

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Исследование биметаллических катализаторов является важной задачей, поскольку такие системы зачастую проявляют более высокую стабильность, активность и селективность по сравнению с монометаллическими во многих промышленно важных реакциях. Введение второго металла может приводить к изменению морфологии наночастиц, их электронных и структурных свойств и т. д., вследствие чего возникают синергические эффекты. Совместное использование модельных биметаллических систем, в которых наночастицы активного компонента нанесены на поверхность планарного носителя (например, высокоориентированный пиролитический графит — ВОПГ), и физико-химических методов исследования поверхности позволит выяснить причины возникновения синергических эффектов.

В данной работе модельные монометаллические Co/ВОПГ и Pd/ВОПГ, а также биметаллические Pd-Co/ВОПГ-катализаторы с заданными характеристиками были приготовлены методом последовательного термического вакуумного напыления металлов и охарактеризованы методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ).

Проведено исследование условий формирования сплавных Pd-Co наночастиц, нанесенных на поверхность ВОПГ, и их термической стабильности в вакууме. Установлено, что прогрев Pd-Co/ВОПГ образцов при 500 °С в условиях сверхвысокого вакуума приводит к формированию сплавных Pd-Co наночастиц. Исследована возможность использования адсорбционно-индуцированной сегрегации, вызванной воздействием СО, для «тонкой» настройки состава поверхности модельных Pd-Co/ВОПГ-катализаторов. Показано, что обработка Pd-Co/ВОПГ катализатора в 120 мбар СО в диапазоне температур 25–200 °С приводит к сегрегации палладия на поверхность биметаллических наночастиц, причем с увеличением температуры данный эффект усиливается. При температурах выше 200 °С происходит обратное перераспределение металлов по глубине наночастиц.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН (тема № FWUR-2024-0042).

Научный руководитель — канд. хим. наук А. В. Бухтияров

УДК 669-1

Изучение структурных особенностей при износе холоднокатаной стали 05X22AG15H8MF по линиям дифрактограмм

Д. В. Черненко, А. Д. Клименков, А. А. Смирнов, Д. Ю. Уткина

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова, Москва

В [1–3] рассмотрено влияние азота и термической обработки на износостойкость аустенитных сталей. Известно, что наиболее высокие прочностные свойства при сохранении достаточной пластичности азотсодержащие аустенитные стали имеют после холодной прокатки [2]. Определенный научный и практический интерес представляет определение трибологических свойств таких сталей в холоднодеформированном состоянии.

Цель работы — изучить структуру изношенной азотсодержащей аустенитной стали 05X22AG15H8MF после холодной прокатки при +25 и –196 °С.

Испытания на сухое трение скольжение проводили на установке, разработанной в ИМЕТ РАН по методике [1]. Объект исследования — холоднокатаная азотсодержащая аустенитная сталь 05X22AG15H8MF. Дефекты кристаллического строения анализировали по эффекту уширения линий дифрактограмм.

Поверхностный слой, претерпевающий интенсивную пластическую деформацию, сильно упрочняется. Глубина упрочненного слоя практически не зависит от температуры испытаний и составляет 6–8 мкм. Плотность дислокаций в поверхностном слое при деформациях $\varepsilon = 15\text{--}60\%$ меняется незначительно, объясняя примерно одинаковые значения интенсивности износа. Наибольшую износостойкость и плотность дислокаций после испытаний имели образцы с $\varepsilon = 80\%$.

При изменении температуры испытаний с +25 до –196 °С износостойкость увеличилась в 2,5 раза, прирост микротвердости — в 1,5. Это обусловлено снижением энергии дефектов упаковки, приводящим к большему взаимодействию дислокаций и увеличению деформационного упрочнения аустенита [3].

Сталь 05X22AG15H8MF сохраняла стабильную аустенитную структуру независимо от степени деформации и температуры.

1. Коршунов Л. Г., Сагарадзе В. В., Черненко Н. Л. и др. Структура и трибологические свойства азотсодержащих нержавеющей аустенитных сталей // *Вопр. материаловедения*. 2012. № 3 (71). С. 136–145.
2. Блинов Е. В. Развитие систем легирования высокоазотистых аустенитных сталей для тяжело нагруженных изделий криогенной техники: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01. М., 2018. 329 с.
3. Сагарадзе В. В., Уваров А. И. Упрочнение и свойства аустенитных сталей / науч. ред. акад. РАН В. М. Счастливцев. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 720 с.

Научный руководитель — д-р техн. наук Е. В. Блинов

УДК 621.315.592

Моделирование сверхструктурных перестроек на поверхности структурированных подложек Si

Чжан Сяосюй

Новосибирский государственный университет

Одним из композиционных устройств, востребованных в электронных и оптических приборах нового поколения, таких как клеточные автоматы, матричные сенсоры и квантовый компьютер, являются пространственно-упорядоченные массивы квантовых точек. Для их формирования применяется гетероэпитаксия на структурированных подложках. Структурированными (*pit-patterned*) мы называем подложки с приготовленным с помощью литографии рисунком из ямок шириной ~ 100 нм. В определенных условиях гетероэпитаксиальный рост на структурированных подложках приводит к формированию nanoостровков в ямках. Несмотря на продолжительные исследования роста на структурированных подложках, элементарные процессы, сопровождающие этот рост, изучены недостаточно. Например, сверхструктурные перестройки на стенках ямок трудно обнаружить экспериментально, хотя они должны оказывать существенное влияние на поверхностную атомную диффузию и зарождение 3D-островков. В этой связи метод молекулярной динамики (МД) предоставляет уникальные возможности для изучения механизма образования атомных сверхструктурных перестроек.

Данная работа посвящена моделированию методом МД сверхструктурных перестроек на стенках ямок в подложках Si(100). Рассматривались ямки с ориентацией (115) и (105), которые, как известно из эксперимента, соответствуют самопроизвольной эволюции огранки в ямках в ходе осаждения смачивающего слоя Ge. Среди обнаруженных закономерностей можно выделить образование характерных атомных конфигураций вследствие димеризации поверхностных атомов. По результатам моделирования осаждения и адсорбции Ge обнаружено, что эти характерные атомные конфигурации воспроизводятся в каждом новом атомном слое. Наблюдаемые при этом элементарные процессы, имитируемые моделированием МД, возможно, раскрывают механизм сохранения морфологии поверхности в ямках при гетероэпитаксиальном росте Ge.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. Л. Новиков

ХИМИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 544.23

Исследование структурных переходов в МОКП методами ЭПР-спектроскопии и молекулярной динамики

Д. В. Алимов

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Металл-органические координационные полимеры (МОКП) являются перспективным классом соединений, обладающих высокой гибкостью каркаса и большим структурным многообразием. Для практических применений МОКП важны форма и доступность пор. В данной работе для их анализа применен метод анализа спектров стационарного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), при котором спиновый зонд инкапсулируется в поры МОКП на этапе синтеза. На спектр ЭПР влияет динамика зонда, отражающая его окружение, что позволяет делать выводы не только о гостевых молекулах, но и о геометрии каркаса МОКП.

В данной работе представлены результаты исследования модельной системы МОКП ZIF-7, в которой наблюдается обратимый переход между структурами с различным размером при изменении температуры, давления, адсорбции газов. В качестве зонда выбран нитроксильный радикал TEMPO. Проведена проверка метода сравнением изменений ЭПР-спектра TEMPO в зависимости от типа гостевых молекул: гексан, циклогексан, этанол с литературными данными по РФА. Проведены серии измерений при сорбции газов H_2 , CO_2 , O_2 , N_2 , Ar, позволившие выделить фракции TEMPO с различной динамикой и наблюдать переходы между этими фракциями. Также показано, что метод инкапсулированного зонда позволяет измерять кинетику адсорбции газов в суспензии ZIF-7 в ионных жидкостях Emim-BF₄ и Bmim-BF₄.

Для интерпретации динамики TEMPO было проведено моделирование методом классической молекулярной динамики (МД). Расчеты проводились для NVT-ансамбля при температуре 298 К. Изучено влияние формы пор и присутствия гостевых молекул на время вращательной корреляции и тип движения радикала. Также рассмотрены различные дефекты структуры пор. Вероятности начальных расположений радикала оценивались методом теории функционала плотности (DFT). Таким образом, при помощи МД установлено прямое соответствие данных ЭПР и состояния пор МОКП. На основе полученных в работе данных построена KNN-модель предсказания состояния пор по данным ЭПР.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-73-10239).

Научный руководитель — канд. хим. наук А. С. Порываев

УДК 628.9

Методы спектроскопии для изучения растительных объектов

А. А. Атамурзаева, К. А. Шипеев, Г. А. Хандогин

Томский политехнический университет

Современные технологии оказывают существенное влияние на агропромышленный комплекс. Огромные доли площадей отведены под выращивание сельскохозяйственных культур. В промышленных масштабах необходимо использовать разработки для оптимизации выращивания и увеличения эффективности производства, в связи с чем встает вопрос об интеграции новых производственных технологий, позволяющих предотвращать рост заболеваемости растений и контролировать качество синтеза необходимых питательных и минеральных веществ, а также контролировать объемы продукции [1]. Одной из таких технологий является спектроскопия, которая позволяет проводить неинвазивный анализ растений.

В работе представлены результаты эксперимента по выращиванию тепличного перца при разных спектральных режимах излучения. Анализ изучаемых растений проводился методами спектроскопии: люминесцентная, видимая и Раман. Проведена качественная и количественная оценка полученных спектров, а также на их основе рассчитаны индексы вегетации — основные показатели растений, отражающие величины синтезируемых веществ, так как синтез органических и неорганических веществ зависит от спектрального состава излучения [2].

Полученные результаты позволили оценить изменение спектральных характеристик листьев растений в процессе выращивания под световыми приборами с разным спектром излучения. Анализ показал, что растения на разных стадиях вегетации по-разному реагируют на спектр излучения. Но эту реакцию можно оценить по изменению спектральных характеристик листьев. Таким образом, спектроскопия позволит проводить оптическую диагностику растений и выявлять наиболее эффективные алгоритмы облучения.

1. Mahnaz Mansoori, Bo-Sen Wu, Philip Wiredu Addo et al. Growth responses of tomato plants to different wavelength ratios of amber, red, and blue light // *Scientia Horticulturae*. 2023. Vol. 322.
2. Использование вегетационных индексов для анализа растительности // Проксима. URL: https://gisproxima.ru/ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov (дата обращения: 27.02.2024).

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. С. Б. Туранов

УДК 577.323.24

**Исследование структурных и гибридизационных свойств
несовершенных комплексов фосфорамидных
имидазольных олигонуклеотидов с ДНК**

А. А. Бердюгин

Новосибирский государственный университет
Институт химической биологии и фундаментальной медицины
СО РАН, Новосибирск

На сегодняшний день при решении множества научных задач и исследований в области биологии и биохимии задействуют олигонуклеотиды — короткие синтетические фрагменты нуклеиновых кислот (НК). Олигонуклеотиды способны образовывать как комплексы с комплементарными одноцепочечными нуклеиновыми кислотами, так и несовершенные комплексы, содержащие так называемые нуклеотидные несоответствия или мисматчи.

Объектом исследования является новый класс аналогов НК — олигонуклеотиды, содержащие бензимидазольные модификации фосфатных групп, разработанные и синтезированные в ИХБФМ СО РАН.

Цель данной работы — исследовать влияние некомплементарных пар на гибридизационные и структурные свойства комплексов модифицированных олигонуклеотидов.

В данной работе в качестве модельной системы рассмотрен комплекс двух олигонуклеотидов. Методом молекулярной динамики получены данные о структуре и устойчивости совершенных и несовершенных комплексов нативных и аналогичных модифицированных олигонуклеотидов. С помощью расчетных данных о термодинамической стабильности комплексов олигонуклеотидов выбраны несколько модельных комплексов для анализа методами молекулярной динамики и методом термической денатурации с оптической регистрацией сигнала. Исследовано влияние модификаций в структуре олигонуклеотидов на образования пар оснований. Показано, что бензимидазольные модификации фосфатных групп могут замещать основания в двойной спирали при формировании комплексов. Методом термической денатурации с оптической регистрацией сигнала определены термодинамические эффекты, связанные с введением модификации в несовершенные комплексы. Полученные результаты открывают широкие перспективы для рационального дизайна праймеров, повышающих специфичность и селективность проведения ПЦР-анализа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-74-01116).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. М. Голышев

УДК 523.429.22

**Расчет числа π с помощью квантового алгоритма:
реализация на спиновых кубитах с использованием
импульсного электронного парамагнитного резонанса**

А. В. Бородулина

Новосибирский государственный университет

Тема квантовых вычислений становится все более актуальной. Существует несколько вариантов квантовых систем, которые потенциально могут быть использованы в качестве элементарных носителей квантовой информации (кубитов). Внимание исследователей привлекает в том числе возможность использования электронных спинов в качестве кубитов, для совершения операций с ними предлагается использовать импульсный электронный парамагнитный резонанс (ЭПР).

Спиновые системы, созданные для применения в квантовых вычислениях, как правило, характеризуются временем продольной и поперечной релаксации намагниченности. Измерение времен релаксации намагниченности позволяет оценить время когеренции кубита. Однако такой способ характеризует спиновую систему без учета многих факторов, не зависящих непосредственно от спиновой системы. Также для описания спинового кубита используют осцилляции Раби, которые наблюдаются в зависимости сигнала спинового эха от длины, приложенного к системе нутационного СВЧ-импульса. Осцилляции Раби являются показателем возможности проведения однокубитных операций со спиновым кубитом. Как правило, спад осцилляций происходит за время, значительно меньшее, чем время поперечной релаксации намагниченности.

В данной работе предложен и реализован подход оценки качества электронного спинового кубита через процедуру расчета с его помощью числа π . Для этого однокубитный алгоритм расчета числа π , разработанный для сверхпроводящих кубитов фирмы ИВМ, был адаптирован для реализации с использованием электронных спиновых кубитов и импульсного ЭПР-спектрометра. Вычисление состоит из получения осцилляций Раби на импульсном ЭПР-спектрометре и классической обработки полученного сигнала. В результате было комплексно рассмотрено несколько спиновых систем. Для расчета были выбраны спиновые системы, основанные на фотоиндуцированных парамагнитных центрах 1,4-бис(4,5-дефинил-имидазол)бензен, и стеклованный тригильный радикал в тригалоze. Данные системы были предварительно охарактеризованы с точки зрения времен релаксации. В результате реализации алгоритма с использованием данной системы было получено значения числа π с точностью до второго знака после запятой, проведено разделение систематической и статистической ошибок.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук С. Л. Вебер

УДК 536.46

Физико-химические особенности асимметричного горения бинарной капли Al – Al₂O₃ в воздухе

Е. Д. Бугров

Новосибирский государственный университет

В процессе горения одиночных капель алюминия на их поверхности возникает «колпачок» из жидкого оксида Al₂O₃, в результате чего образуется частица с бинарной структурой.

Во многих аналитических моделях, нацеленных на изучение механизма диффузионного горения алюминия, предполагается наличие сферически симметричной зоны горения вокруг горящей капли. Однако реальная структура диффузионного пламени зачастую далека от предполагаемой сферической поверхности. В первой части работы рассматриваются три эффекта, влияющие на структуру зоны горения: 1) выводится уравнение формы пламени, формирующегося в результате взаимодействия паров алюминия с набегающим плоским воздушным потоком; 2) рассматривается влияние теплообмена на структуру зоны горения и выводится температурная поправка к форме зоны пламени; 3) формулируется критерий покрытия оксидного «колпачка» зоной горения. Полученные уравнения хорошо согласуются с экспериментом, а также объясняют эмпирические зависимости размера зоны пламени от параметров окружающей среды.

Активное газообразование на внутренней границе контакта Al — Al₂O₃ ведет к возникновению асимметричной реактивной струи, бьющей из-под колпачка и раскручивающей горящие частицы до тысяч и десятков тысяч Герц.

Вторая часть работы посвящена построению математической модели вращения. В модели рассматривается кинетика реакции взаимодействия жидких оксида и алюминия, а также процессы тепломассообмена, протекающие внутри полости под оксидным «колпачком» и в реактивной струе. Модель хорошо предсказывает наблюдаемые в эксперименте частоты вращения частиц алюминия. Более того, в процессе выгорания доля оксида алюминия в составе частицы увеличивается, что приводит к характерному резкому изгибу траектории движущейся частицы. Это явление также описывается построенной моделью.

Известно, что вращение углеводородных капель значительно уменьшает время их горения. По всей видимости, этот же эффект характерен и для металлических частиц. Соответственно, разработанная модель может быть продуктивна для описания процессов горения других бинарных металлических систем.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. В. Карасев

УДК 544.4

**Исследование эффективности регистрации синглетного кислорода
новыми спиновыми ловушками с улучшенными
функциональными свойствами по данным ЭПР-спектроскопии**

С. А. Дементьев

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Лечение онкологических заболеваний является крайне сложной задачей. Фотодинамическая терапия — это метод лечения рака, основанный на использовании фотосенсибилизатора, молекулы, которая под воздействием света и в присутствии кислорода может генерировать синглетный кислород ($^1\text{O}_2$). Токсическое действие $^1\text{O}_2$ приводит к гибели раковых клеток. Эффективность генерации $^1\text{O}_2$ можно определить с помощью метода спиновых ловушек (СЛ) в сочетании со стационарной ЭПР-спектроскопией. В ходе химической реакции диамагнитной СЛ с $^1\text{O}_2$ образуется парамагнитный стабильный радикал, концентрация которого отображает эффективность генерации $^1\text{O}_2$. Однако СЛ 2,2,6,6-tetramethylpiperidine, наиболее распространенная в научных исследованиях, повышает рН среды, что приводит к агрегации фотосенсибилизатора и дополнительным побочным реакциям, следовательно, затрудняет достоверный анализ количества образовавшихся радикалов. Таким образом, поиск альтернативных СЛ является крайне важной задачей.

В работе были исследованы новые СЛ, отличающиеся заместителями при аминогруппе с улучшенными функциональными свойствами, синтезированные в лаборатории канд. хим. наук И. А. Кирилюка НИОХ СО РАН. С помощью модельного порфирина meso-5,10,15,20-Tetrakis-(N-methyl-4-pyridyl)porphine (ТМРyP4) были определены эффективности регистрации $^1\text{O}_2$ при стационарном фотолизе при комнатной температуре с контролем рН. Высокая селективность СЛ к $^1\text{O}_2$ подтверждалась контрольными исследованиями в дейтерированом буферном растворе, а также при добавлении NaN_3 . Таким образом, были определены структуры СЛ, наиболее перспективные для исследования функциональных свойств фотосенсибилизаторов.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О. А. Крумкачёва

УДК 539.2

**Изучение фотопереключения спиновых состояний
в молекулярных магнетиках $\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{R}}$,
содержащих двухспиновые кластеры, методом ЭПР**

К. В. Зайцев

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Изучение переключаемых молекулярных магнетиков вызывает большой интерес в связи с их потенциальными приложениями в устройствах сверхплотного хранения и обработки информации. Комплексы на основе ионов меди(II) с стабильными нитроксильными радикалами $\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{R}}$ (где hfac = гексафторацетилацетонат, L^{R} — нитроксильный лиганд) активно изучаются на протяжении последних двух десятилетий, включая изучение эффектов фотоиндуцированной конверсии спиновых состояний. В одной из работ было показано, что фотопереключение в соединениях семейства, содержащих двухспиновые кластеры медь-нитроксил, обладает перспективными свойствами: релаксация фотоиндуцированного состояния становится очень медленной при криогенных температурах и практически не происходит на шкале десятков часов [1].

В представляемой работе были исследованы три новых соединения из группы молекулярных магнетиков $\{[\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{R}}]_2[\text{Cu}(\text{hfac})_2]\}_\infty$ с различными заместителями $\text{R} = \text{Et}$ (этил), $i\text{-Pr}$ (изопропил) и CP (циклопентил). Для каждого комплекса была получена зависимость спектра ЭПР от температуры.

Также были проведены опыты по фотопереключению комплексов при криогенных температурах. Определена глубина фотопереключения (доля парамагнитных центров, которые перешли в фотовозбужденное состояние), она убывает в следующем порядке: $\text{R} = \text{Et}$, $i\text{-Pr}$, CP ; причем в соединении с заместителем $\text{R} = \text{CP}$ переключение не было обнаружено. Помимо фотопереключения был исследован процесс релаксации фотовозбужденного состояния.

Таким образом, в настоящей работе показано, что изменение спектров стационарного ЭПР, в зависимости от температуры, согласуется с данными СКВИД-магнитометрии (отслеживание текущего состояния соединения), а степень фотопереключения для исследуемых соединений зависит от структуры заместителя. Наблюдаемые магнитно-структурные корреляции позволят в дальнейшем развивать стратегии оптимизации функциональных свойств семейства молекулярных магнетиков $\{[\text{Cu}(\text{hfac})_2\text{L}^{\text{R}}]_2[\text{Cu}(\text{hfac})_2]\}_\infty$.

1. Tumanov S. V. et al. Light-Induced Spin State Switching and Relaxation in Spin Pairs of Copper (II)-Nitroxide Based Molecular Magnets // Inorg. Chem. 2017. Vol. 56, No. 19. P. 11729–11737.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. М. В. Федин

УДК 543.4

Характеризация гидратации роговицы глаза человека с помощью спектроскопии рассеяния Мандельштама – Бриллюэна и комбинационного рассеяния света

Д. А. Золоторенко

Новосибирский государственный университет

Развитие бесконтактных неразрушающих методик является важным аспектом в анализе проявлений и эффективности лечения различных заболеваний глаз [1, 2]. Среди таких методик спектроскопия рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) предоставляет возможность неинвазивно и точно оценивать упругие свойства образцов с высоким пространственным разрешением. Уровень гидратации образцов может существенно влиять на результаты, полученные с помощью спектроскопии РМБ [3], что может вызывать неопределенность при определении влияния различных заболеваний на упругие свойства роговиц. Охарактеризовать уровень гидратации образцов позволяет спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС).

Цель данного исследования — изучить применимость спектроскопии РМБ и КРС для характеристики упругих свойств роговиц и их зависимости от гидратации. В качестве образцов использовались герметично заклеенные в кюветы роговицы глаза человека толщиной порядка 100 мкм.

В результате исследования были получены позиции линии РМБ, и с использованием методики КРС было подтверждено, что сдвиг позиции линии РМБ обусловлен различным уровнем гидратации роговиц. Анализ полученных данных выявил корреляцию между сдвигом позиции линии РМБ и уровнем гидратации образца. Полученные результаты могут быть использованы для учета влияния гидратации при определении эффекта различных офтальмологических заболеваний на упругие свойства роговиц.

1. Zhang H. et al. Motion-Tracking Brillouin Microscopy Evaluation of Normal, Keratoconic, and Post-Laser Vision Correction Corneas // *Am. J. Ophthalmology*. 2023. Vol. 254. P. 128–140.
2. Scarcelli G. et al. Brillouin microscopy of collagen crosslinking: noncontact depth-dependent analysis of corneal elastic modulus // *Investigative Ophthalmology Visual Sci*. 2013. Vol. 54, No. 2. P. 1418–1425.
3. Shao P. et al. Effects of corneal hydration on Brillouin microscopy in vivo // *Investigative Ophthalmology Visual Sci*. 2018. Vol. 59, No. 7. P. 3020–3027.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. В. Адищев

УДК 537.6

Исследование пространственного строения комплексов альбумина с порфиринами методами ЭПР и молекулярного моделирования

М. И. Колоколов

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Связывание человеческого сывороточного альбумина с фотосенсибилизаторами представляет интерес для биомедицинской химии и создания новых лекарственных препаратов в связи с их многообещающим потенциалом в фотодинамической терапии рака. Структурное разнообразие таких комплексов затрудняет изучение их связывания с лигандами, из-за чего возникает необходимость использования дополнительных методов исследования. В данной работе мы применили комбинацию лазерно-индуцированного дипольного ЭПР и молекулярного моделирования для характеристики комплексов терапевтических мишеней, содержащих фотосенсибилизатор. В качестве демонстрации метода мы исследовали комплексы альбумина с рядом анионных и катионных порфиринов.

Сложная структура биологических комплексов требует привлечения дополнительных методов для интерпретации экспериментальных результатов. Для определения сайтов связывания фотоагентов с биомолекулами нами был разработан новый подход к моделированию распределений расстояний между введенной спиновой меткой и лигандом. Моделирование состояло из поиска возможных сайтов связывания порфиринов с помощью слепого молекулярного докинга и отбора подходящих комплексов на основе эксперимента. Подвижность комплексов учитывалась с помощью проведения молекулярной динамики. Написана собственная программа, позволяющая моделировать распределения расстояний для каждого кадра траектории молекулярной динамики с учетом всех возможных конформаций спиновой метки. Комбинация методов молекулярного моделирования и дипольного ЭПР позволяет получить информацию, недоступную другим методам по отдельности.

Таким образом, были определены сайты связывания ряда анионных и катионных порфиринов с человеческим сывороточным альбумином. Результаты моделирования соотносятся с экспериментальными распределениями с хорошей точностью. Наши результаты демонстрируют потенциал ЭПР-спектроскопии в комбинации с компьютерным моделированием для изучения комплексов биологических молекул с фотосенсибилизаторами и способствуют развитию подходов фотодинамической терапии.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О. А. Крумкачева

УДК 577.323.24

Исследование формирования самоограниченных ДНК/РНК-комплексов

С. В. Косвинцева

Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Вторичная структура нуклеиновых кислот (НК) участвует в регуляции ряда молекулярно-биологических процессов. Изучение формирования новых форм вторичных структур НК играет важную роль в исследовании биологических систем. Синтетические фрагменты нуклеиновых кислот — олигонуклеотиды — способны формировать разнообразные вторичные структуры. Например, возможно формирование протяженных конкатамерных комплексов или небольших самоограниченных комплексов. Последние образуются при взаимодействии липких концов конкатамерных комплексов, в результате чего образуется замкнутая форма.

Ранее в ИХБФМ СО РАН был исследован такой тип структур, образованный ДНК- или РНК-цепями. Большой интерес представляют структуры, которые образуются при взаимодействии ДНК- и РНК-цепей, что связано с их возможным практическим применением.

Целью работы — исследовать формирование самоограниченных комплексов ДНК/РНК-комплексов и изучить их физико-химических свойств.

Объектом исследования являлись олигомеры, состоящие из 10 звеньев, соединенных нуклеотидным линкером различной длины. Исследована термостабильность комплексов с помощью метода термической денатурации с оптической регистрацией сигнала. Изучение формирования самоограниченных комплексов проводили методом гель-электрофореза.

В результате исследования физико-химических свойств методом термической денатурации получены данные о термической стабильности 40 комплексов. Значения температуры плавления комплексов лежат в области от 38 до 48 °С. По сравнению с известными данными о термической стабильности конкатамерных и самоограниченных ДНК/ДНК- и РНК/РНК-комплексов, температуры плавления аналогичных РНК/ДНК-комплексов ниже на 8–10 °С относительно РНК/РНК- и незначительно ниже ДНК/ДНК-комплексов. При анализе электрофореграмм определена подвижность в геле. По результатам можно заключить, что РНК/ДНК с разными длинами линкеров формируют конкатамерные и самоограниченные комплексы разной молекулярности.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2022-263).

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук А. А. Ломзов, М. А. Канарская

УДК 544.163.3; 544.175

Измерение сигнала ESEEM селективно дейтерированных нитроксильных радикалов методом прямого детектирования

Д. А. Кузнецов

Новосибирский государственный университет

Импульсная спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) является мощным экспериментальным методом исследования структуры, динамических и функциональных свойств различных парамагнитных соединений. В типовых ЭПР-экспериментах используются микроволновые прямоугольные импульсы наносекундной длительности, при этом зачастую ширина спектра исследуемого объекта превышает экспериментально достижимую полосу возбуждения, что ограничивает применение ряда экспериментальных методик. Одним из потенциальных способов решения этой проблемы является использование микроволновых импульсов произвольной формы. Такие импульсы позволяют развернуть частоту в заданном диапазоне с помощью амплитудной и фазовой модуляции.

В данной работе с использованием импульсов произвольной формы проводился эксперимент по измерению сигнала ESEEM (*Electron spin echo envelope modulation*) методом прямого детектирования, одновременно во всех точках спектра образца. Цель исследования — нахождение ориентации вектора, соединяющего центр локализации неспаренного электрона с положением ядра дейтерия в системе координат молекулярных осей радикала. В качестве исследуемых образцов были взяты растворы селективно дейтерированных производных нитроксильного радикала на основе изотопа азота ^{15}N при температуре 80 К. Также для сравнения с экспериментальными данными проводилось моделирование сигнала ESEEM для выбранных систем.

Научный руководитель — канд. хим. наук А. Р. Мельников

УДК 543.4

Особенности синтеза гидрогелей на основе коллагена и их характеристика методами оптической спектроскопии

А. В. Лактионова

Новосибирский государственный университет

Гидрогели на основе коллагена нашли применение в различных областях биомедицины: тканевой инженерии, доставки лекарств, 3D-биопечати. В вышеперечисленных приложениях необходимо обладать знаниями об упругих свойствах гидрогеля, которые изменяются в зависимости от содержания воды.

Спектроскопия рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (РМБ) является быстро развивающейся методикой для измерения упругих свойств (гигагерцевый модуль упругости) материала. Она позволяет бесконтактно охарактеризовать локальные механические характеристики среды, что важно при работе с биообъектами. Соответственно, основная цель — изучить упругие свойства гидрогелей на основе коллагена методом спектроскопии РМБ.

Первичной задачей является отработка синтеза образцов коллагеновых гидрогелей. Поскольку волокна коллагена предрасположены к самосборке, данный белок хранится в качестве раствора в уксусной кислоте ($\text{pH} = 3,4$). Для синтеза гидрогелевых образцов необходимо повысить pH до 7, что было достигнуто с помощью двух основных протоколов [1, 2].

Характеризация образцов осуществлялась с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и РМБ. Данные методики позволили выявить изменение химического состава гидрогелей после обработки и локальные неоднородности в упругих свойствах образцов. Спектроскопия КРС показала, что применение метода [1], который предпочтительнее использовать в случае раствора коллагена с высоким содержанием белка, необходимо дополнить последующий отмывкой в дистиллированной воде.

Также по протоколу [1] были изготовлены и охарактеризованы с помощью КРС и РМБ-спектроскопии образцы гидрогелей на основе коллагена с различным содержанием белка.

1. Ramírez-Rodríguez G. B. et al. pH-responsive collagen fibrillogenesis in confined droplets induced by vapour diffusion // *J. Mater. Sci. — Mater. Med.* 2014. Vol. 25. P. 2305–2312.
2. Li Y. et al. pH effects on collagen fibrillogenesis in vitro: Electrostatic interactions and phosphate binding // *Mater. Sci. Eng.: C.* 2009. Vol. 29, No. 5. P. 1643–1649.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. А. Зыкова

УДК 539.2

Определение структур потенциальных метаболитов психических заболеваний с помощью масс-спектрометрии высокого разрешения

Д. А. Леонов

Новосибирский государственный университет

Выявление биомаркеров психических заболеваний является многообещающим направлением в современной биофизике, так как это может способствовать более ранней диагностике подобных заболеваний и более глубокому пониманию их биологических механизмов. Однако на сегодняшний день определение структур подобных соединений значительно затрудняется отсутствием большинства этих веществ в общедоступных базах масс-спектрометрических спектров. Ранее была выявлена группа из 30 соединений, которые позволяют различить группы пациентов, страдающих депрессией или шизофренией, и контрольную группу здоровых доноров. Из этого набора только 5 соединений были идентифицированы с помощью базы данных *mzCloud* по спектрам фрагментации молекул, для 17 соединений по точной массе предложена брутто-формула и предварительная структура, и 8 соединений остались не идентифицированными.

В данной работе идентификация потенциальных маркеров депрессии и шизофрении, которые не удалось достоверно идентифицировать ранее, проводилась посредством различных способов, таких как обнаружение в спектре неизвестного вещества фрагментов уже известных соединений и расчет теоретического спектра молекулы на основе данных о ее предположительном строении. Это позволило охарактеризовать структуру не менее чем 11 соединений. Для получения спектров фрагментации всех веществ использовались разные методы масс-спектрометрического анализа, такие как мониторинг параллельных реакций и мониторинг избранных ионов. Также проведено сравнение охарактеризованных соединений с литературными данными [1].

1. Tomasik J. et al. Metabolomic Biomarker Signatures for Bipolar and Unipolar Depression // *JAMA Psychiatry*. 2024. Vol. 81, No. 1. P. 101–106.

Научный руководитель — д-р хим. наук А. А. Чернонос

УДК 543.429.22

**Метод ЭПР для изучения состояния ионизируемых групп
в активном центре комплекса Fpg-ДНК**

И. А. Литвинов

Новосибирский государственный университет

Формаидопиридин-ДНК-гликозилаза (Fpg) — фермент репарации, который распознает и удаляет у бактерий окисленные пуриновые основания ДНК. В активном центре Fpg находится важный фрагмент Pro1-Glu2, любая мутация в котором вызывает потерю активности. Результаты метода молекулярной динамики утверждают, что мутация E2Q (замена Glu2 на Gln2) приводит к существенным изменениям электростатических взаимодействий в активном центре фермент-субстратного комплекса [1]. Однако экспериментально это не было подтверждено. Привлекательным методом исследования таких локальных явлений может стать метод ЭПР с применением рН-чувствительных спиновых меток в качестве зондов, чувствительных к электростатическим взаимодействиям. Известно, что Fpg имеет специфическое сродство к ДНК-дуплексам с одноцепочечным разрывом. Для исследования был взят набор ДНК-дуплексов, содержащих в середине одной из цепей пропуск в один или два нуклеотида, и по краям этого разрыва вводились рН-чувствительные спиновые метки. С помощью ЭПР-спектроскопии для проверки выдвинутой гипотезы были исследованы спиновые метки, ДНК-дуплексы в отсутствие и в присутствии белков Fpg и E2Q.

Для интерпретации полученного массива экспериментальных данных проводится молекулярное моделирование комплексов белка Fpg и спин-меченных дуплексов ДНК. Результаты экспериментов и моделирования будут представлены в докладе.

1. Perlow-Poehnelt R.A. et al. Substrate Discrimination by Formamidopyrimidine-DNA Glycosylase: Distinguishing Interactions within the Active Site // *Biochem.* 2004. Vol. 43 (51). P. 16092–16105.

Научный руководитель — канд. хим. наук А. В. Шернюков

УДК 544.2, 544.4

Окисление метанола на монослойном V_2O_5/TiO_2 -катализаторе: исследование методами *operando* ИК-Фурье-спектроскопии и *pseudo in situ* РФЭС

К. А. Литвинцева

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Катализаторы на основе оксида ванадия, нанесенного на носитель из оксида металла с большой площадью поверхности, активно используются во многих реакциях селективного окисления углеводородов [1]. Для наиболее эффективного использования данных катализаторов необходимо знать детальный механизм реакции.

Данная работа посвящена изучению механизма реакции окисления метанола на монослойном V_2O_5/TiO_2 -катализаторе. Хотя работы с похожим объектом исследования уже представлены в литературе [2], в то же время новизна данной работы заключается в проведении исследований в режимах *operando* и *pseudo in situ*. Благодаря использованию данных методологий открывается возможность регистрировать процессы, происходящие на поверхности катализатора непосредственно в ходе реакции, а значит, итоговый механизм, построенный на экспериментальных результатах, будет наиболее полно отражать реальность.

На основании полученных данных определено, что реакционными интермедиатами на поверхности катализатора являются метокси-группы, формиат ионы и диоксиметиленовые частицы. В газовой фазе обнаружены такие продукты, как формальдегид, метилформиат, диметоксиметан, а также монооксид и диоксид углерода. Показано, что во время реакции происходит восстановление катионов ванадия, в то время как катионы титана остаются в одном состоянии. На основании экспериментальных данных предложен механизм реакции окисления метанола на ванадий-титановых катализаторах.

1. Weckhuysen B. M., Keller D. E. Chemistry, spectroscopy and the role of supported vanadium oxides in heterogeneous catalysis // Catal. Today. 2003. Vol. 78. P. 25–46.
2. Kaichev V. V. et. al. Selective oxidation of methanol to form dimethoxymethane and methyl formate over a monolayer V_2O_5/TiO_2 catalyst // J. Catal. 2014. Vol. 311. P. 59–70.

Научный руководитель — д-р хим. наук В. В. Каичев

УДК 539.2

Метод компенсации эффекта дампинга во время селективных импульсов в ЯМР-спектроскопии

Н. Е. Литовских

Новосибирский государственный университет

Явление дампинга (*Radiation Damping*) в ЯМР-спектроскопии известно с давних пор, примерно столько же, сколько и само явление магнитного резонанса. Это явление присутствует почти всегда при проведении экспериментов с детекцией сигнала в виде индуцируемого тока в катушке и может влиять непосредственно на эксперимент. Причем обычно дампинг — это нежелательное явление в ЯМР-экспериментах, приводящее к уширению спектральной линий и искажающего форму радиочастотного импульса. Дампинг может быть описан следующим образом. Прецессирующий поперечный суммарный магнитный момент, например от интенсивного сигнала протонов воды, создает электромагнитное поле в катушке приемника. Это поле наводит переменный ток, который, в свою очередь, создает дополнительное магнитное поле той же частоты. В итоге наведенное поле вращает суммарный магнитный момент в направлении постоянного поля, прежде чем другие релаксационные процессы вступают в силу [1].

Для учета эффекта во время действия слабых селективных импульсов был предложен метод [2]. Его суть заключается в следующем. Дополнительное магнитное поле, наведенное током в катушке, пропорционально намагниченности и обратно пропорционально некоторой временной константе, характеризующей силу дампинга. Тогда если из подаваемого импульса вычесть рассчитанное численными методами поле, создаваемое катушкой приемника, то получим некоторый скорректированный импульс, который при действии на магнитный момент будет поворачивать его на нужный угол. Однако, несмотря на то что этот перспективный метод известен, удобной практической реализации нет. В докладе будет рассказано более подробно о самом методе и будут представлены результаты применения представленного метода в экспериментах.

1. Krishnan V. V., and Murali N. Radiation damping in modern NMR experiments: Progress and challenges // *Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.* 2013. Vol. 68, 2013. P. 41.
2. Jin-Hong C., Jerschow A., Bodenhausen G. Compensation of radiation damping during selective pulses in NMR spectroscopy // *Chem. Phys. Lett.* 1999. Vol. 308 (5–6). P. 397–402.

Научный руководитель — канд. хим. наук А. В. Шернюков

УДК 544.163

Теоретическое исследование электронной структуры и магнитных свойств дифторзамещенных радикалов Блаттера

С. В. Мальцева

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Большой интерес в литературе вызывают молекулярные магнетики (ММ), перспективные в области спинтроники и квантовых вычислений. Стабильные органические радикалы и их комплексы с переходными металлами — типичные строительные блоки ММ, поэтому важно знать их электронное строение. Магнитные свойства ММ определяются обменными взаимодействиями между парамагнитными центрами, извлечение параметров которых из эксперимента опосредовано используемыми модельными представлениями.

Данная работа посвящена исследованию электронной структуры и спектроскопии фторзамещенных радикалов Блаттера (*1a* и *1b*), а также анализу магнитных свойств их кристаллических образцов. Расчеты положений и интенсивностей электронных переходов методом TD-DFT прекрасно согласуются с экспериментальным спектром в растворе.

В кристаллической ячейке радикала *1a* находятся две молекулы со слегка различной геометрией (*1aA* и *1aB*), которые в кристалле выстраиваются в бесконечные стопки вида $(1aA..1aA...1aB..1aB)_{\infty}$. Обменные параметры J были рассчитаны методом BS-DFT, адекватность такого подхода была доказана ранее в работах нашей лаборатории. Расчеты показали, что в кристалле *1a* имеет три значимых межмолекулярных обменных взаимодействия с J , равными -117 (*1aA..1aA*), -71 (*1aB..1aB*) и -14 (*1aA..1aB*) см^{-1} . Данный магнитный мотив прекрасно описывает эксперимент. Кристаллы радикала *1b* состоят из одного типа молекул, которые образуют регулярные стопки с $J = -86$ см^{-1} . Отметим, что для незамещенных радикалов Блаттера наблюдается очень слабое обменное взаимодействие в стопках.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. Е. Горбунов

УДК 544.1

Пилотное применение метода CCSD для расчета структурных параметров перовскитов в рамках технологии СТЕР

И. М. Одуа^{1,2}, Ю. В. Ломачук¹, Д. А. Мальцев¹, В. М. Шахова¹,
А. В. Олейниченко¹, Н. С. Мосягин¹, Л. В. Скрипников^{1,2}

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина

²Санкт-Петербургский государственный университет

Перовскиты хорошо себя зарекомендовали как материалы с необычными физико-химическими свойствами. Так, например, перовскит BaTiO_3 обладает высокими значениями диэлектрической проницаемости и на его основе уже разработано множество микроэлектронных элементов. Чуть больше десяти лет назад на основе перовскитных материалов стали разрабатывать солнечные батареи, эффективность которых значительно выше, чем у традиционных кремневых панелей, а цена производства значительно ниже, однако ресурс таких батарей еще недостаточно высок.

Одной из важных областей применения BaTiO_3 для данной работы стали спектроскопические эксперименты на основе кристалла $\text{Ba}_{0.5}\text{Eu}_{0.5}\text{TiO}_3$ по измерению электрического дипольного момента электрона [1]. Обработка результатов подобных экспериментов требует достаточно точную информацию об электронной структуре вблизи ядра изучаемого тяжелого ядра. Таким образом, теоретические исследования различных свойств перовскитов, включая оптические, являются весьма актуальной задачей для поиска новых эффективных технологических решений с их использованием.

Наиболее точным путем воспроизведения электронной структуры в некоторой области кристалла является квантово-химический расчет в рамках технологии «подстраиваемого под соединение» потенциала внедрения (СТЕР) [2].

В данной работе были произведены расчеты геометрии кристалла BaTiO_3 методом DFT-PBE0, построены минимальные кластеры $(\text{TiO}_6)^{8-}@СТЕР$ и $(\text{BaO}_{12})^{22-}@СТЕР$ с высокоточным воспроизведением фрагмента. Произведен расчет релаксации геометрии кластера $(\text{TiO}_6)^{8-}@СТЕР$ методом DLPNO-CCSD.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00225).

1. Eckel S., Sushkov A.O., Lamoreaux S.K. Limit on the electron electric dipole moment using paramagnetic ferroelectric $\text{Eu}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{TiO}_3$ // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109, No. 19. P. 193003.
2. Shakhova V.M. et al. Compound-tunable embedding potential method: analysis of pseudopotentials for Yb in YbF_2 , YbF_3 , YbCl_2 and YbCl_3 crystals // Phys. Chem. Chem. Phys. 2022. Vol. 24, No. 32. P. 19333–19345.

Научный руководитель — д-р физ. наук, проф. А. В. Титов

УДК 543.4

Исследование метаболизма преимплантационных эмбрионов мыши с помощью комбинационного рассеяния света дейтерированных меток

А. Н. Омельченко

Новосибирский государственный университет

Дейтерированные метки широко используются для характеристики обмена веществ различных биологических объектов. Вовлекаясь в специфичные для них метаболические пути, они образуют меченые соединения, детектирование которых позволяет визуализировать транспорт исходных соединений. Отслеживать новосинтезированные метаболиты возможно с помощью неразрушающей и неинвазивной методики спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Такая методика хорошо зарекомендовала себя при изучении биологических объектов, а также применима для изучения отдельных клеток.

Данная работа посвящена отработке методики исследования клеточного метаболизма с помощью спектроскопии КРС дейтерированных меток. В качестве изучаемого объекта были выбраны преимплантационные эмбрионы мыши, полученные в секторе криоконсервации и репродуктивных технологий ИЦиГ СО РАН. Также рассматривалось влияние криоконсервации и диапаузы на транспорт дейтерированных соединений в данных объектах.

Выяснено, что накопление различных дейтерированных соединений по-разному сказывается на развитии эмбрионов на ранних стадиях. По-видимому, культивирование в присутствии 20 % тяжелой воды является токсичным для эмбрионов. Показано, что глюкоза накапливается преимущественно в виде пентоз и гликогена, а аминокислоты (фенилаланин и лейцин) встраиваются в белки без видимых химических трансформаций. С помощью спектроскопии КРС было выяснено, что криоконсервация затормаживает поглощение глюкозы на стадиях дробления и морулы, но усиливает накопление жирной стеариновой кислоты на стадии морулы. Также показано, что диапауза не влияет на транспорт фенилаланина после криоконсервации. При этом в диапаузирующих эмбрионах снижается скорость синтеза белков.

Таким образом, данная работа демонстрирует возможность применения методики спектроскопии КРС дейтерированных меток для характеристики метаболизма преимплантационных эмбрионов мыши. Полученные результаты также могут быть применимы для развития неинвазивных методик отслеживания метаболизма других биологических объектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-74-10108).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Окотруб

УДК 535.343.4

Лазерная ИК-спектроскопия горячих полос C_2HD в области первого обертона валентных С-Н-колебаний

Д. М. Пластинина¹, А. С. Липская²¹Новосибирский государственный университет²Новосибирский государственный технический университет

Широкое использование диодных лазеров диапазона 1530–1565 нм в телекоммуникационных системах с мультиплексированием каналов поставило задачу поиска в этом диапазоне стандартов частоты. Самым перспективным подходом к этой задаче является использование молекулярных спектральных линий. В указанном диапазоне благодаря своей интенсивности могут использоваться в качестве калибровочных стандартов спектральные линии молекулы ацетилена и его изотопных разновидностей.

В работе К. Накагава 1996 г. частоты линий C_2H_2 были измерены с относительной точностью 10^{-9} . В более поздних работах частоты линий того же диапазона измерялись методом спектроскопии насыщения с точностью 3–10 кГц. Эти измерения способствовали установлению в качестве стандарта частоты спектра ацетилена C_2H_2 в области 1,5 мкм. Использование изотопных разновидностей ацетилена ($^{13}C_2H_2$ и C_2HD), также имеющих интенсивные линии около 1,5 мкм, расширяет диапазон частот, доступных в качестве стандарта.

Значительное количество работ посвящено изучению спектра высокого разрешения молекулы $^{12}C_2HD$. Для нее в области 1,5 мкм заметной интенсивностью обладают две горячие полосы, соответствующие переходам $(2,0,0,1,0) \leftarrow (0,0,0,1,0)$ и $(2,0,0,0,1) \leftarrow (0,0,0,0,1)$. Для этих горячих полос верхние и нижние колебательные состояния являются дважды вырожденными и обладают колебательным угловым моментом. В результате его взаимодействия с вращательным моментом молекулы снимается вырождение (l — удвоение). Это приводит к характерному виду вращательных линий в спектре горячей полосы — дублетов.

В настоящей работе с помощью перестраиваемых диодных лазеров измерены частоты линий в Р- и R-ветвях горячей полосы $(2,0,0,1,0) \leftarrow (0,0,0,1,0)$, а также в R-ветви горячей полосы $(2,0,0,0,1) \leftarrow (0,0,0,0,1)$. Использование нагреваемой газовой ячейки позволило расширить измеряемый диапазон в область больших вращательных чисел. В этой области было обнаружено резкое изменение величины колебательно-вращательного взаимодействия (l — удвоения). Вычислены вращательные постоянные и параметры l — удвоения для верхних и нижних состояний. Наблюдаемая аномальная зависимость величины расщепления от квантового числа J не может быть описана в рамках стандартной модели.

Научный руководитель — д-р хим. наук Е. Н. Чесноков

УДК 539.2

**Применение СВЧ-импульсов заданной формы
в дипольной ЭПР-спектроскопии для спиновых меток
на основе фотовозбужденного триплетного состояния**

Р. А. Подаров

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

ЭПР-спектроскопия занимает важное место в структурной биологии. Для исследований в биологическую систему вводятся спиновые метки — парамагнитные молекулы, селективно связывающиеся с биокомплексом. Свойства спиновых меток критически важны, так как от них зависят возможные ограничения в чувствительности метода. Принципиально новым направлением в ЭПР-области является идея применения фотовозбужденного триплетного состояния в качестве спиновой метки, что открывает новые горизонты в изучении структур комплексов с фотомолекулами. Такие метки отличаются неравновесной заселенностью, что позволяет добиться многократного увеличения ЭПР-сигнала. Однако на практике применение фотометок ограничено частотой повторения лазерных импульсов, зависящей как от технических характеристик лазерных систем, так и от релаксационных свойств самих меток. Одним из решений этой проблемы является применение СВЧ-импульсов заданной формы, которое может значительно повысить чувствительность ЭПР-экспериментов при заданной частоте повторения.

В данной работе была исследована возможность применения адиабатических импульсов заданной формы к ключевым лазерно-индуцированным импульсным экспериментам: Light-induced Double Electron-Electron Resonance (LiDEER), Light-induced Relaxation Induced Dipolar Modulation Enhancement (LiRIDME) и Light-Induced Triplet-Triplet Electron Resonance (LITTER). Для наиболее эффективного возбуждения триплетного состояния в качестве модельного объекта рассматривалась фотометка с максимально узким ЭПР-спектром — диада фуллерена. Продемонстрирован выигрыш чувствительности по сравнению с применением стандартных прямоугольных СВЧ-импульсов. Показана большая эффективность возбуждения триплетных состояний для диады фуллерена по сравнению с порфирином meso-5,10,15,20-Tetrakis-(N-methyl-4-pyridyl)porphine (TMPyP4) с более широким ЭПР-спектром. Определены параметры СВЧ-импульсов, критически влияющие на выигрыш чувствительности.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О. А. Крумкачева

УДК 543.424.2

**Оптимизация условий КР-эксперимента
для обнаружения малых концентраций белка в растворе**

С.С. Пудова

Новосибирский государственный университет

Исследование биологических образцов бесконтактными методами является актуальной задачей биофизики. Одним из таких методов является спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Однако с ее помощью сложно идентифицировать малые концентрации веществ, поскольку в ходе измерений детектируется достаточно малый сигнал ($\sim 10^{-6}$ от интенсивности упругой линии).

Цель исследования — разработать способ обнаружения и идентификации малых концентраций белка в растворе методом КРС, с помощью которого можно будет изучать жидкости для роста клеточных культур. В качестве модельных объектов использовались растворы яичного белка в жидкой ростовой среде, высушенные на подложках.

В данной работе были получены спектры с использованием лазеров с длинами волн 780 и 532 нм. Показано, что использование красного лазера для растворов белков предпочтительнее, чем зеленого, поскольку в этом случае вклад фотолюминесценции в спектр меньше. Также были подобраны оптимальные условия высыхания капли, позволяющие увеличить поверхностную плотность вещества в высушенном образце.

В результате предложен подход, позволяющий получить спектры КРС белка из раствора с начальной концентрацией менее 1 мг/мл. В докладе также будут обсуждены результаты, полученные для сухих остатков от кондиционных жидкостей культуральных клеток.

Научный руководитель — чл.-корр. РАН Н. В. Суровцев

УДК 539.2

Взаимодействие триарилметильных радикалов с кислородом и тиолами в биологических средах

А. Е. Райзвих

Новосибирский государственный университет
Новосибирский институт органической химии
им. Н.Н. Ворожцова СО РАН

Триарилметильные радикалы (ТАМ) широко применяются в качестве спиновых меток и спиновых зондов в биофизических исследованиях. Наиболее перспективным представителем этих радикалов является ОХ063, обладающий рекордно узкой шириной линии ЭПР, длинным временем электронной спиновой релаксации, низкой токсичностью, высокой стабильностью и гидрофильностью. Ранее было показано, что ТАМ подвержены окислению в присутствии тиолов и кислорода, наличие которых способствует генерации супероксида, переводящего ТАМ в форму диамагнитного хинон-метиды (ХМ) [1]. При этом биологические среды обладают биовосстановителями, которые предположительно могут перевести ХМ в форму радикала, у которого группа COOH/COO^- заменена на OH/O^- (ТАМ-ОН) [2].

В настоящей работе методом ЭПР детально изучены реакции окислительной дегградации ОХ063 до ХМ и последующего восстановления ХМ в радикал ОХ063-ОН в присутствии тиолов в условиях, имитирующих биологические среды. Применение $^{13}\text{C}_1$, изотопно меченного в центральном положении ОХ063, позволило однозначно зарегистрировать появление радикала ОХ063-ОН, полученного из ХМ, по различающимся изотропным константам сверхтонкого расщепления на $^{13}\text{C}_1$: 2,30 мТл (^{13}C -ОХ063) против 2,04 мТл (^{13}C -ОХ063-ОН). Показано, что ОХ063-ОН обладает рН-чувствительностью. Мы обнаружили наличие этих реакций в крови и гомогенате печени мышей при введении в эти среды ОХ063. Таким образом, учет этих реакций важен при процедуре спин-мечения биополимеров для успешного применения ТАМ, поскольку эти реакции представляют собой основной канал гибели исходного ТАМ и напрямую влияют на эффективность спин-мечения биополимеров. Не менее важным является то, что появление ОХ063-ОН, как мы показали, может вносить искажения в данные ЭПР-оксиметрии.

1. Poncelet M. et al. // Free Radical Res. 2018. Vol. 52, No. 3. P. 373–379.
2. Serda M. et al. // Chem. Res. Toxicol. 2016. Vol. 29, No. 12. P. 2153–2156.

Научные руководители — д-р физ.-мат. наук, проф. Е. Г. Багрянская, С. С. Овчеренко

УДК 544.03

Образование синглетного кислорода при фотовозбуждении золотых наночастиц

Р. Р. Сафин

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Золотые наночастицы (НЧ) являются одними из самых стабильных металлических НЧ среди прочих и благодаря наличию у них полосы поглощения поверхностного плазмонного резонанса (ППР) обладают рядом примечательных свойств, что делает их привлекательными для использования в фотокатализе, фототермической терапии и многих других приложениях [1]. Относительно недавно обнаружили, что фотовозбуждение суспензий НЧ золота может приводить к образованию активных форм кислорода, в частности супероксид аниона O_2^- и синглетного кислорода 1O_2 [2]. Поэтому НЧ золота представляют интерес как новый класс активных фотосенсибилизаторов с высоким коэффициентом экстинкции в видимой области, фотостабильностью и более низкой цитотоксичностью, чем у органических красителей [2]. Данные преимущества могут позволить развить методы фотодинамической и фототермической терапии [1, 2]. Однако в настоящее время детально механизм образования молекул 1O_2 при фотовозбуждении золотых НЧ в полосе поглощения ППР неизвестен, поэтому представляется актуальным изучение механизма данного фото процесса.

В настоящей работе при фотовозбуждении водной суспензии НЧ золота импульсным лазерным излучением в полосе поглощения ППР зарегистрирована короткоживущая ИК-люминесценция со спектральным максимумом около 1300 нм, отнесенная к люминесценции молекул 1O_2 . Установлено, что образование молекул 1O_2 обусловлено трехфотонным процессом, предположительно состоящим из однофотонного возбуждения кислорода до супероксид аниона и последующим двухфотонным отщеплением электрона от аниона в течение одного лазерного импульса. Также установлено, что после процесса фотовозбуждения НЧ уменьшаются в размере.

1. Daniel M. C., Astruc D. Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology // Chem. Rev. 2004. Vol. 104, No. 1. P. 293–346.
2. Pasparakis G. Light-induced generation of singlet oxygen by naked gold nanoparticles and its implications to cancer cell phototherapy // Small. 2013. Vol. 9, No. 24. P. 4130–4134.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук К. С. Ершов,
канд. физ.-мат. наук А. П. Пыряева

УДК 577.13

***In vitro* окисление эрготионеина катионами меди**

М. В. Фоменко

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Эрготионеин является уникальным биологическим соединением, производным аминокислоты гистидина. Несмотря на открытие эрготионеина (ESH) в начале XX в., его биологическая роль в живых организмах остается до конца неопределенной. Хорошо известно, что одна из основных функций ESH — антиоксидантная, например, он предотвращает деградацию оксигемоглобина, реагирует с АФК и способен быстро хелатировать катионы бивалентных металлов. В результате окисления ESH образует неустойчивый дисульфид. Мотивация к исследованию ESH обусловлена обнаружением его дисульфидных димеров с тиолами в кристалликах диких птиц. В качестве канала их образования рассмотрен слабо изученный процесс окисления катионами Cu^{2+} .

Ранее считалось, что комплексы ESH с металлами достаточно устойчивы, но, как следует из проведенного исследования, комплексы подвергаются pH-зависимому автоокислению. В работе изучалось окисление в бескислородной среде. ESH поглощает УФ-излучение и имеет максимум поглощения на 257 нм, в связи с этим основной метод исследования — это спектрофотометрические измерения. Также использовался метод ВЭЖХ-МС для определения продуктов реакции и их массы. Реакции проводили в 50 мМ фосфатном буфере с pH 6; 7 и 7,8. В каждой точке pH произведено 6 измерений с разными $C_{\text{Cu}^{2+}}$, в каждом из них $C_{\text{Ergo}} = 50$ мкМ. В результате анализа хроматограмм и спектров установлено два основных продукта реакции: ESSE — дисульфид ESH, первичный продукт окисления; EH — герцинин, конечный продукт окисления. EH образуется в цепочке превращений ESSE в нестабильные сульфоновые кислоты с последующим отщеплением оксида серы. Хроматографическое исследование не позволило достоверно детектировать комплексы ESH и ESSE с ионами Cu^{2+} и Cu^{1+} . Структуры комплексов и константы скоростей реакции окисления комплексов ESH установлены из оптических спектров.

Анализ результатов показал, что зависимость скорости окисления ESH от pH связана с тиол-тионной таутомерией. Комплекс с медью образуется практически мгновенно, но в реакцию окисления медью вступает только депротонированный ESH. Первый продукт окисления — ESSE, медленно реагирующий с водой с отщеплением серы и образованием EH. Таким образом, ESH может защищать клетки от окисления посредством хелатирования катионов бивалентных металлов с последующим плавным автоокислением до EH.

Научный руководитель — д-р хим. наук Ю. П. Центалович

УДК 536.461

Экспериментальное и теоретическое изучение химии образования катионов в пламени смеси аммиака с водородом

А. В. Черепанов

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Аммиак рассматривается в последнее время как перспективное безуглеродное топливо для двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин и других энергетических установок. Аммиак имеет низкую скорость горения, но его реакционную способность можно значительно улучшить путем совместного сжигания с водородом. Использование ионно-чувствительных технологий открывает большие возможности для контроля горения аммиачно-водородных смесей. Однако в пламенах аммиака ионная химия слабо изучена, что обусловлено прежде всего недостатком данных по их ионной структуре.

Цель данной работы — создать модель для кинетики ионно-молекулярных реакций в пламенах смесей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$. Для этого методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии исследована катионная структура пламен предварительно перемешанных смесей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ в диапазоне $\phi = 0,8 \div 1,2$. Пламена стабилизировались на плоской горелке при атмосферном давлении. Используя детальную химико-кинетическую модель для превращения нейтральных компонентов для пламени смеси NH_3/H_2 , а также доступные в литературе данные по кинетике реакций с участием обнаруженных в эксперименте катионов был разработан химико-кинетический механизм, включающий 3 катиона NH_4^+ , NO^+ и H_3O^+ , 4 аниона и 34 реакции с их участием. Высокоточными методами квантовой химии W2-F12 рассчитаны термодинамические данные катионов.

Используя полученный механизм, были проведены численные расчеты катионной структуры пламен с применением программного обеспечения Cantera 2.6. На основе сравнения данных эксперимента и моделирования было установлено, что предложенный механизм корректно описывает относительное содержание NH_4^+ и H_3O^+ . Проведен анализ предложенной модели и установлены основные пути реакций с участием ионов. Полученные в работе результаты послужат основой для дальнейшего совершенствования модели ионной химии в пламенах аммиака.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук Д. А. Князьков,
канд. физ.-мат. наук В. Г. Киселёв

УДК 537.311.1, 544.435.4

Миграция носителей заряда на квазиодномерном молекулярном проводнике в переменном электрическом поле

А. О. Четвериков

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Свойства полимеров как молекулярных проводников определяется тем, как происходит миграция носителя заряда вдоль цепи. При этом можно считать, что носители локализованы в пределах одного или нескольких мономерных звеньев [1], а их перемещение в соседние позиции происходит прыжками с некоторой вероятностью в единицу времени, прямо пропорциональной подвижности носителя. Для определения подвижности носителей заряда в органических полимерах широко применяется методика времязрешенной микроволновой проводимости (TRMC), в которой анализируется поглощение СВЧ-поля при миграции носителя заряда по полимеру [2]. Для такого анализа в литературе предложена формула [3], которая позволяет связать между собой только среднюю за период поглощаемую мощность и лишь в пределе слабого поля.

В данной работе для описания миграции заряда во внешнем переменном поле было решено основное кинетическое уравнение для адиабатического переноса заряда для полимера произвольной длины в пределе слабого поля. Для произвольной напряженности поля получены решения в пределе высоких и низких частот. Из полученных решений были определены закон движения заряда, мгновенная поглощаемая одной цепью мощность, а также средняя за период поглощаемая мощность. Показано, что формула, предложенная в работе [3], может давать большую ошибку, когда велико влияние концов полимера, и была определена область параметров, при которой это происходит.

1. Bird M. J. et al. Fast holes, slow electrons, and medium control of polaron size and mobility in the da polymer F8BT // J. Phys. Chem. C. 2017. Vol. 121, No. 29. P. 15597–15609.
2. Grozema F. C., Siebbeles L. D. A. Charge mobilities in conjugated polymers measured by pulse radiolysis time-resolved microwave conductivity: From single chains to solids // J. Phys. Chem. Lett. 2011. Vol. 2, No. 23. P. 2951–2958.
3. Prins P. et al. Frequency dependent mobility of charge carriers along polymer chains with finite length // Phys. Stat. Sol. B. 2006. Vol. 243, No. 2. P. 382–386.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Боровков

УДК 539.2

Расчет кинетического изотопного эффекта при диссоциации димеров полиглицина как модельной системы для денатурации белков

А. О. Яншин

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения
им. В. В. Воеводского СО РАН, Новосибирск

Влияние изотопного замещения на кинетику химических реакций называется кинетическим изотопным эффектом (КИЭ). КИЭ оказывает существенное влияние на кинетику разворачивания (*unfolding*) вторичной структуры белков, что приводит к их денатурации (потери активности) в биологических системах. Недавние исследования подтверждают влияние КИЭ на кинетику протекания метаболизма при старении простых и сложных организмов и влияние КИЭ на продолжительность жизни микроорганизмов [1]. Использование оксида дейтерия в качестве растворителя позволяет увеличивать сроки хранения вакцин, что связывают с КИЭ при денатурации белков. Оценка величины КИЭ и его зависимость от свойств белка (его длины) имеют важное значение.

В представленной работе для оценки КИЭ использовалась предложенная недавно модель, позволяющая рассчитывать константу скорости разворачивания вторичной структуры белка в рамках теории переходного состояния [2]. В качестве модельного процесса рассматривалась диссоциация димеров полиглицина варьированной длины. Расчеты структуры, энергии, вращательных постоянных и колебательных частот выполнялись с помощью теории функционала плотности в рамках подхода B3LYP/6-31G(d). В работе был выполнен расчет аррениусовских параметров, энтальпии и энтропии активации, КИЭ для реакции диссоциации димеров полиглицина различной длины, содержащих в водородных связях соответствующие изотопы дейтерия, N-15, O-18, C-13, в рамках модели абсолютно рыхлого переходного состояния. Показано, что в случае включения дейтерия в водородные связи КИЭ уже при небольшой длине белковой цепочки достигает высоких значений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-23-00275).

1. Li X., Snyder M. P. Can heavy isotopes increase lifespan? Studies of relative abundance in various organisms reveal chemical perspectives on aging // *BioEssays*. 2016. Vol. 38, No. 11. P. 1093–1101.
2. Baklanov A. V., Kiselev V. G. The Nature of the Enthalpy–Entropy Compensation and “Exotic” Arrhenius Parameters in the Denaturation Kinetics of Proteins // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. Vol. 24, No. 13. P. 10630.

Научные руководители — д-р хим. наук А. В. Бакланов,
канд. физ.-мат. наук В. Г. Киселёв



ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук *А. Ю. Гармаш*

Ответственный секретарь секции — *Т. В. Мальцев*

Экспертный совет секции

канд. физ.-мат. наук *А. В. Бердюгин*

д-р физ.-мат. наук, акад. РАН *А. Е. Бондарь*

д-р физ.-мат. наук *А. Ю. Гармаш*

канд. физ.-мат. наук *Л. В. Кардапольцев*

канд. физ.-мат. наук *Е. А. Кравченко*

д-р физ.-мат. наук *И. Б. Логашенко*

канд. физ.-мат. наук *А. А. Померанский*

канд. физ.-мат. наук *А. С. Руденко*

канд. физ.-мат. наук *А. В. Соколов*

д-р физ.-мат. наук *К. Ю. Тодышев*

канд. физ.-мат. наук *Т. А. Харламова*

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY

Section Head — Dr Phys.-Math. Sci. *A. Yu. Garmash*

Responsible Secretary — *T. V. Maltsev*

Section scientific committee

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Berdyugin*

Dr Phys.-Math. Sci., Acad. RAS *A. E. Bondar*

Dr Phys.-Math. Sci. *A. Yu. Garmash*

Cand. Phys.-Math. Sci. *L. V. Kardapoltsev*

Cand. Phys.-Math. Sci. *E. A. Kravchenko*

Dr Phys.-Math. Sci. *I. B. Logashenko*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. A. Pomeranskii*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. S. Rudenko*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Sokolov*

Dr Phys.-Math. Sci. *C. Yu. Todyshev*

Cand. Phys.-Math. Sci. *T. A. Kharlamova*

УДК 539.1

**Study of the reaction $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$
in the 0.15–2.2 MeV proton beam energy range**

A. A. Shuklina

Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk
Novosibirsk State University

The credible value of the $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$ reaction cross-section is essential for the proton therapy of cancer, the thermonuclear fusion and the nuclear astrophysics. Despite the relevance, the mechanism of the reaction is still an open question. The goal of the study consists in acquiring new knowledge about the reaction, updating and clarification of the preliminary studies data in the 0.15–2.2 MeV proton beam energy range.

Thick boron carbide target was irradiated with protons of 0.3–2.15 MeV energy at the Vacuum Insulated Tandem Accelerator or VITA (Budker Institute of Nuclear Physics) which can generate proton beam with the energy 0.1–2.2 MeV keeping a high energy stability of 0.1 % and the beam current from 1 μA to 5 mA with high current stability 0.4 %. The spectra of the emitted α -particles and backscattered protons were measured using the silicon semiconductor α -spectrometer PDPA-1K (Institute of Physical and Technical Problems, Dubna, Russia) at 135° with respect to the beam moment. The obtained results proved that the reaction $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$ has two channels — $^{11}\text{B}(p,\alpha_1)^8\text{Be}^*$ and $^{11}\text{B}(p,\alpha_0)^8\text{Be}$ with different cross-sections which agrees with modern ideas.

Thin boron target was irradiated with protons of 0.15–2.2 MeV energy. We measured differential cross-sections at 135° and 168° with respect to the beam moment and obtained total cross-sections for both channels of the reaction: $^{11}\text{B}(p,\alpha_1)^8\text{Be}^*$ and $^{11}\text{B}(p,\alpha_0)^8\text{Be}$.

The research was supported by Russian Science Foundation (grant № 19-72-30005).

Scientific adviser — Cand. Phys.-Math. Sci. E. O. Sokolova

УДК 539.126.4

Определение вероятностей распадов $B^+ \rightarrow D^{*0} \bar{D}^0 K^+$ и $B^+ \rightarrow D^0 \bar{D}^{*0} K^+$ в эксперименте Belle II

А. А. Барладян

Новосибирский государственный университет

События $D^{(*)0} \bar{D}^{(*)0} K^+$ интересны для целого ряда исследований. В данных каналах возникают промежуточные резонансы, интересные для изучения. На уровне кварковых диаграмм распад \bar{b} -антикварка в B^+ -мезоне $\bar{b} \rightarrow c W^+ \rightarrow c \bar{s} \bar{s}$ протекает с образованием $c \bar{s}$ - и $c \bar{c}$ -состояний. Он перспективен для изучения спектроскопии их распадов на $D^{*0} \bar{D}$ или $D^{*0} K^+$.

Целью данной работы является измерение вероятностей распада заряженных B^+ -мезонов в итоговые состояния $D^{*0} \bar{D}^0 K^+$ и $D^0 \bar{D}^{*0} K^+$. Для восстановления дочерних частиц использовались каналы $D^{*0} \rightarrow D^0 \pi^0$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$, $K_s^0 \pi^+ \pi^-$, $K^- \pi^+ \pi^0$, $K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$. Работа проведена в эксперименте Belle II, который работает на асимметричном $e^+ e^-$ -коллайдере SuperKEKB.

Для анализа использовался фреймворк basf2, с помощью которого методами Монте-Карло сгенерированы выборки общих $e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$, $e^+ e^- \rightarrow Y(4S)$ и сигнальных событий. Число событий в общей выборке соответствует интегральной светимости $744,764 \text{ фб}^{-1}$. Моделирование детектора Belle II осуществлялось при помощи библиотеки Geant4. Реконструкция распадов проводилась с условиями отбора $M_{bc} > 5,27 \text{ ГэВ}$; $1,83484 < M_{D^0} < 1,89484 \text{ ГэВ}$; $M_{D^{*0}} < 2,05$; $|\Delta E| < 0,2 \text{ ГэВ}$. На дочерние частицы при восстановлении также налагались различные требования. Из аппроксимации распределений по ΔE для каждого канала определялся фон и выход сигнала. Более жесткие критерии отбора и область интегрирования сигналов определялись максимумом параметра качества реконструкции $FOM = N_{sig} / \sqrt{N_{sig} + N_{bg}}$, где N_{sig} и N_{bg} — ожидаемые числа сигнальных и фоновых событий.

В результате был получен выход сигнала и N_{sig} , определены вероятности распадов для двух каналов $Br(B \rightarrow D^{(*)} \bar{D}^{(*)} K) = N_{sig} / (2 N_{B\bar{B}} \sum_j (\epsilon_j Br_j))$, где ϵ — эффективность реконструкции, $N_{B\bar{B}}$ — число пар B -мезонов, Br_j — полные вероятности распада дочерних частиц в итоговые состояния.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Чиликин

УДК 531.5

Изучение влияния гравитационных волн от двойных систем черных дыр промежуточной массы на спектр излучения пульсаров в теории массивной гравитации

Т. Е. Божайкина

Новосибирский государственный университет

В данной работе рассматривается влияние гравитационных волн от двойных систем черных дыр промежуточной массы на спектр излучения пульсаров в линейном приближении теории массивной гравитации.

Изучение такого рода эффектов необходимо для развития методов регистрации гравитационных волн в низкочастотном диапазоне, недоступном для детекторов интерферометрического типа. Источниками длинноволновых гравитационных волн могут быть двойные системы черных дыр промежуточной массы, а также процессы в ранней Вселенной, информация о которых недоступна в электромагнитном диапазоне.

Работа выполнена в линейном приближении лоренц-инвариантной теории массивной гравитации. Используемый подход — альтернатива стандартной космологической модели.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Д. Долгов

Изображение черной дыры в нелинейной электродинамике

А. В. Ворохов

Казанский (Приволжский) федеральный университет

В свете результатов коллаборации *Event Horizon Telescope* [1] становится перспективна проверка физических моделей через сравнение смоделированных изображений черных дыр с реальными изображениями. В частности, моделирование аккрецирующих черных дыр в нелинейной электродинамике может дать интересные результаты.

Трассировка лучей — наиболее простой подход к моделированию. В нем уравнения световых геодезических, записанные в терминах символов Кристоффеля, интегрируются численно, далее рассчитывают параметры фотонов, пришедших к наблюдателю. Однако даже при малом разрешении изображения требуется обработать тысячи траекторий. Чтобы за разумное время изучить разные модельные функции, программа должна быть эффективной и поддерживать параллелизацию вычислений, поэтому за основу взята библиотека *torch* для языка *python*.

Мы смоделировали изображения черной дыры Райснера — Нордстрема в классической электродинамике и в электродинамике Эйлера — Гейзенберга. В первом случае подтвердились уже известные особенности, а в нелинейной модели различия изображений оказались малы даже при нереалистично больших параметрах взаимодействия.

Мы надеемся обнаружить значимый эффект для более сложного и реалистичного случая черных дыр типа Керра в нелинейной электродинамике. Здесь структура символов Кристоффеля многократно усложняется, и прямой расчет становится трудоемким. Следуя статье [2], мы применили альтернативный подход, основанный на формализме Гамильтона — Якоби. В этом подходе можно избежать расчета геодезических, вычисляя только константы движения фотонов, испущенных на различных расстояниях от аккреционного диска. Для еще большего ускорения решения мы выполнили репараметризацию констант движения и свели интегральные уравнения на новые константы движения к задаче оптимизации. В новом подходе подтверждаются ранее полученные результаты для черной дыры Райснера — Нордстрема.

1. Akiyama K. et al. First M87 event horizon telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole // *Astrophys. J. Lett.* 2019. Vol. 875, № 1. P. L4.
2. Dokuchaev V.I., Nazarova N.O. Silhouettes of invisible black holes // *Physics-Uspekhi.* 2020. Vol. 63, No. 6. P. 583.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Д. Е. Грошев

УДК 539.122

Реализация установки гамма-гамма-совпадений с использованием ^{22}Na

И. Б. Зубарев

Казанский федеральный университет

При взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли образуются радиоактивные изотопы, которые называются космогенными. Космогенный ^{22}Na образуется в стратосфере в результате взаимодействия протонов первичной компоненты космического излучения с атомами аргона. ^{22}Na является β^+ -радиоактивным изотопом, при этом испускаемые позитроны аннигилируют с электронами, и испускаются два гамма-кванта в противоположных направлениях с энергией 511 кэВ.

Космогенный ^{22}Na используется для оценки времени нахождения воды в реках и озерах [1]. Также соотношение долгоживущих и короткоживущих изотопов помогает определить период пребывания изотопов в атмосфере [2].

Методы совпадений и антисовпадений играют ключевую роль в радиометрии β^+ -радиоактивных изотопов. Гамма-гамма-совпадения не только позволяют эффективно и точно определять распределение радиоактивного изотопа ^{22}Na в образцах, но и обеспечивают высокую чувствительность [3].

Разрабатываемая в рамках настоящей работы экспериментальная установка состоит из двух сцинтилляционных детекторов, аппаратной схемы совпадений, источника питания и радиоактивного источника ^{22}Na . Для наблюдения угловых корреляций гамма-лучей и аннигиляции электрон-позитронной пары измеряется число совпадений. Когда два гамма-кванта достигают детекторов одновременно, на выходе аппаратной схемы совпадений появляется сигнал.

Ожидаемая чувствительность разрабатываемой установки должна быть не хуже 9 мБк, и на ней можно будет измерять активность по изотопу ^{22}Na космогенного или иного происхождения. Установку можно будет применять и в исследовательских целях, и для лабораторного практикума.

1. Sakaguchi A. Cosmogenic radionuclide ^{22}Na in the Lake Biwa system (Japan) // J. Earth. Planet. Sci. Lett. 2005. P. 307–316.
2. Zhang W. A gamma-gamma coincidence/anticoincidence spectrometer for low-level cosmogenic $^{22}\text{Na}/^7\text{Be}$ activity ratio measurement // J. Environ. Radioact. 2014. P. 1–6.
3. Hoffman I. Circulation of cosmogenic ^{22}Na using the global monitoring network of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization // J. Environ. Radioact. 2018. P. 8–15.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Е. Н. Дулов

УДК 524.1

Калибровка сцинтилляционных детекторов установки TAIGA по космическим мюонам

И. А. Кабанник

Новосибирский государственный университет

Экспериментальная установка TAIGA направлена на изучение космических частиц высоких энергий (10–1000 ПэВ) за счет исследования порождаемых ими потоков вторичных частиц — широких атмосферных ливней (ШАЛ). Установка является комбинацией систем регистрации черенковского света (TAIGA-HiSCORE, TAIGA-IACT, Tunka-133) и сцинтилляционных счетчиков (Tunka-Grande, TAIGA-Muon), расположенных в Тункинской долине, Бурятия. Каждая станция сцинтилляционных счетчиков имеет две части: наземную (регистрирует все заряженные частицы) и подземную (преимущественно мюоны).

Для анализа данных со сцинтилляционных счетчиков необходима процедура, позволяющая сопоставить энергопотери вторичных частиц ШАЛ в детекторе и распределение интенсивности засветки вторичными частицами по площади установки. Энергопотери могут быть разделены на две основные группы вкладов: мюоны и остальное (электроны, конвертированные гамма-кванты, фоновая радиация). Для исследования этих вкладов в рамках данной работы было создано моделирование, позволяющее получать спектр энергопотерь в счетчиках различных конструкций (Tunka-Grande, TAIGA-Muon). Выяснено, что учет углового распределения потока мюонов вместе с неоднородностью светосбора счетчика увеличивает ширину амплитудного распределения и приводит к смещению наиболее вероятного значения амплитуды в зарегистрированном спектре минимально ионизирующих частиц. Учет этих эффектов позволил в моделировании получить спектр, близкий к наблюдаемому в стендовом эксперименте, где вторая группа вкладов несущественна. В дальнейшем данный результат будет использован для независимой калибровки энергетического разрешения.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. А. Кравченко

УДК 539.1

Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с детектором КМД-3 на энергиях ϕ -мезона и выше

В. Д. Кольжецов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Измерение сечения $\sigma_{\pi\pi}(E)$ в канале $\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ играет важную роль для улучшения точности вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона $(g-2)_\mu$ в рамках Стандартной модели. Исследование процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ проводилось в диапазоне энергий ϕ -мезона по данным с детектора КМД-3 на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера. Данные были получены в 2013 и 2018 гг. в диапазоне энергий в системе центра масс от 0,98 до 1,20 ГэВ. Вся статистика набиралась в 41 точке по энергии. Интеграл светимости за этот период составил приблизительно $23,8 \text{ пб}^{-1}$. Энергия пучков измерялась методом обратного комптоновского рассеяния со статистической точностью $\sim 100 \text{ кэВ}$.

Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ подразумевает выделение сигнальных событий с применением оптимальных критериев отбора, позволяющих подавить физический и пучковый фон с минимальными потерями сигнальных событий. Критерии отбора разрабатывались в соответствии с кинематикой событий этого процесса, заряженные частицы которого регистрировались в дрейфовой камере, а фотоны — в электромагнитном калориметре детектора.

Для вычисления сечения необходимо знать эффективность регистрации исследуемого процесса, определенную по моделированию методом Монте-Карло на основе GEANT4 с использованием программного пакета CMD3SIM. В моделировании учтены некоторые особенности детектора на момент набора данных и излучение фотона из начального состояния. Моделирование обрабатывалось тем же пакетом программ, что и экспериментальные данные.

Планировалось осуществить отбор сигнальных событий на основании информации только с трековой системы детектора КМД-3. Однако этого оказалось недостаточно для подавления фоновых процессов. Поэтому возникла необходимость в дополнительной фильтрации на основании информации калориметрической системы. Эффективность регистрации процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ составила 4 % при осуществлении отбора по трекам и 2 % в случае добавления условий на фотоны.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Г. В. Федотович

Алгоритм реконструкции данных в ксеноновом калориметре КМД-3

Т. А. Кузнецов

Новосибирский государственный университет

Начиная с 2010 г. в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера проводятся эксперименты на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в диапазоне энергий от 320 МэВ до 2 ГэВ в системе центра масс [1]. Обширная физическая программа экспериментов включает прецизионное измерение полного сечения e^+e^- -аннигиляции в адроны, изучение свойств легких векторных мезонов и другие задачи. Коллайдер имеет две области взаимодействия пучков, в которых установлены детекторы КМД-3 и СНД [2].

Детектор КМД-3 (криогенный магнитный детектор) сочетает в себе свойства магнитного спектрометра с хорошим импульсным разрешением и калориметра с высоким энергетическим и пространственным разрешением. Калориметр имеет уникальную комбинированную структуру — он состоит из двух расположенных соосно подсистем: калориметра на основе жидкого ксенона и кристаллического CsI-калориметра [3]. Так, высокая сегментация жидкоксенонового калориметра в продольном и поперечном направлении позволяет детально проследить развитие электромагнитных ливней.

Реализованный алгоритм реконструкции детектора не использует в полной мере возможности ксенонового калориметра, поэтому анализ нейтральных процессов, например $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$, а также сложных процессов, содержащих как заряженные, так и нейтральные частицы, демонстрирует недостаточную эффективность.

Для калориметра была разработана специальная система реконструкции, позволяющая с высокой эффективностью восстанавливать жесткие нейтральные π -мезоны с импульсом более 500 МэВ и анализировать многочастичные события с большим количеством треков и фотонов.

1. Shatunov Yu. M. et al. Project of a new electron positron collider VEPP2000 // Conf. Proc. C0006262. 2000. P. 439.
2. Khazin B. I. Physics and detectors for VEPP-2000 // Nucl. Phys. Proc. Suppl. B. 2008. Vol. 181–182. P. 376.
3. Epifanov D. Electromagnetic calorimeters of the CMD-3 detector // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. Vol. 293. 012009.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц

УДК 539.1.05

Разработка время-проекционной камеры с оптическим съемом

Р. В. Ли

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Метод время-проекционных камер является одним из важнейших методов регистрации одиночных частиц, и поэтому его развитие представляется актуальным. В частности, особо стоит вопрос измерения энергий продуктов безнейтронной термоядерной реакции $p+^{11}\text{B}$, в контексте которого и проводилась представленная работа.

В проведенном исследовании была спроектирована, создана и откалибрована время-проекционная камера с оптическим съемом с помощью камеры ORCA. Разработано несколько методов исследования рассмотренной реакции — в среде борсодержащих газов или с твердой мишенью бора, расположенной в объеме с газообразным тетрафторидом углерода (который обладает хорошо изученными свойствами). В результате сравнительного анализа борсодержащих газов и тетрафторида углерода выбор был сделан в пользу последнего. Также была разработана программа на основе алгоритма кластеризации DBSCAN, позволяющая автоматическим образом выделять из изображения с камеры треки частиц и измерять их длину. Наконец, для измерения z -проекции трека будет использоваться прозрачный ИТО-анод, не вносящий помехи в изображение камеры.

Таким образом, в результате проведенного исследования была разработана конкретная установка, способная к анализу продуктов безнейтронной термоядерной реакции $p+^{11}\text{B}$, а также методика работы с ней.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Соколов

УДК 539.1

**Применение методики слепого анализа к поиску событий
конверсионного распада омега-мезона в эта-мезон и электрон-
позитронную пару**

А. К. Нарваткина

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Мотивация к изучению распада омега-мезона в эта-мезон и электрон-позитронную пару ($\omega \rightarrow \eta e^+ e^-$) состоит в возможном его обнаружении и проверке модели векторной доминантности, которая предсказывает относительную вероятность распада в диапазоне $(2,0-6,0) \times 10^{-6}$ [1]. На данный момент экспериментально получен верхний предел, сам распад еще не наблюдался. На детекторе КМД-3 набран интеграл светимости в области масс ρ - и ω -мезонов, равный около 30 пб^{-1} , который используется в анализе. Для изучения распада $\omega \rightarrow \eta e^+ e^-$ выбрана мода распада $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ с последующим распадом $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Основным источником фоновых событий является доминирующий распад $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ с последующим Далиц-распадом $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$.

Так как ожидаемое количество событий распада мало, для большей объективности результата используется методика слепого анализа, в рамках которой область в пространстве измеряемых переменных, в которой ожидаются сигнальные события, скрывается. В качестве таких переменных в данной работе используются модуль полного импульса лептонной пары и инвариантная масса нейтральной пары адронов и пары фотонов.

Проведено моделирование как сигнальных событий, так и событий основного фона. Разработаны и применены первичные условия отбора сигнальных событий, целью которых являлось выделение событий с правильной сигнатурой и определение типов частиц у заряженных треков [2]. Проводилась аппроксимация двумерного распределения событий в пространстве выбранных переменных, как с закрытием области, так и без него. Для данных моделирования определено с помощью аппроксимации при использовании разных критериев отбора количество событий в закрытой области, которое не противоречит их действительному количеству.

1. Eidelman S. I. Conversion decays of vector mesons // Workshop Phys. Detectors DAΦNE. Frascati, 1991. P. 451.
2. Мишин В. В. Поиск конверсионного распада омега-мезона в эта-мезон и электрон-позитронную пару на детекторе КМД-3: магист. дис.: 03.04.02. Новосибирск: НГУ, 2021. 40 с.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Ф. Казанин

УДК 539.1

**Изучение электрон-позитронной аннигиляции в три фотона
в области резонанса ϕ -мезона**

А. А. Ооржак

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Детектор СНД на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 позволяет изучать радиационные распады векторных мезонов ρ , ω , ϕ . Магнито-дипольные переходы между легкими векторными мезонами ρ , ω , ϕ и псевдоскалярными мезонами π^0 , η , η' играют важную роль в физике элементарных частиц при анализе и проверках различных теоретических концепций и моделей низкоэнергетических взаимодействий кварков. В частности, изучение распадов $\phi \rightarrow \eta\gamma$, $\eta'\gamma$ позволяет определить угол смешивания между η и η' , а по распаду $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$ возможно определение доли ud -кварков в ϕ -мезоне.

Целью данной работы является измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ в области энергий 984–1100 МэВ в трехфотонном конечном состоянии и определение вероятности распада $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$ в эксперименте с детектором СНД. В этом эксперименте было набрано в несколько раз больше статистики по сравнению с предыдущими экспериментами. В рамках данной работы были выбраны критерии отбора изучаемых событий. Проведено сравнение моделирования с экспериментом и определена эффективность регистрации событий $\pi^0\gamma$. Получен предварительный результат по сечению реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. П. Дружинин

УДК 539.1.07

Модернизация счетчика прототипа калориметра для Супер чарм-тау фабрики

А. Д. Офицеров

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

Институт ядерной физики (ИЯФ) СО РАН участвует в проекте по созданию Супер чарм-тау фабрики (СЧТФ). Широкая программа исследований на СЧТФ включает всестороннее изучение физики с-кварка, тау-лептона, двухфотонной физики. Высокая светимость СЧТФ и, как следствие, высокий уровень пучкового фона предъявляют очень жесткие требования к детектору частиц. Одной из главных подсистем детектора является электромагнитный калориметр, который служит для измерения энергии и координат гамма-квантов, идентификации заряженных частиц и выработки триггерного сигнала с детектора. Для уменьшения влияния пучкового фона было предложено использовать быстрые сцинтилляционные кристаллы чистого CsI (с временем высвечивания около 30 нс) в счетчиках калориметра. Световыход кристаллов чистого CsI на порядок меньше, чем, например, у широко используемых кристаллов CsI(Tl) (с временем высвечивания около 1 мкс), поэтому для преобразования световой вспышки в электрический сигнал приходится использовать фоточувствительные элементы с внутренним усилением и низкошумящую электронику.

В ИЯФ ведутся работы с прототипом калориметра, состоящим из 16 счетчиков. Каждый счетчик собран на основе кристалла чистого CsI (с размерами около $6 \times 6 \times 30$ см³), пластины со спектросмещающим люминофором NOL-9, четырех кремниевых лавинных фотодиодов Hamamatsu APD S8664-55 и 4-канального зарядочувствительного предусилителя (ЗЧПУ) разработки ИЯФ. В качестве считывающей электроники используются платы усилителей-формирователей (CR-4RC)-оцифровщиков, которые формируют, оцифровывают и запоминают формы сигналов с каждого счетчика

В данной работе изучаются шумовые характеристики ЗЧПУ ИЯФ по сравнению с характеристиками одного из лучших коммерческих спектроскопических ЗЧПУ CAEN A1422B045F3. Проводится оптимизация входного каскада ЗЧПУ ИЯФ для минимизации электронных шумов, которые в настоящее время определяют энергетическое разрешение прототипа при энергиях гамма-квантов $\lesssim 300$ МэВ.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Епифанов

УДК 53.043

**Переход реликтовых гравитационных волн в фотоны
под действием космологического магнитного поля**

Л. А. Панасенко

Новосибирский государственный университет

Реликтовые гравитационные волны предсказаны многими моделями теории космологической инфляции [1]. Несмотря на увеличение точности измерений параметров спектра первичных метрических возмущений при анализе данных о поляризации и анизотропии реликтового излучения, обнаружить реликтовые гравитационные волны до сих пор не удалось. Напротив, ставится все более жесткое ограничение на их амплитуду [2].

Общепринятым способом решения этого противоречия является разработка более сложных моделей инфляции [3]. В данной же работе [4] отбрасывается предположение о свободном распространении гравитационных волн с момента их зарождения до момента рекомбинации ядер водорода и электронов. А именно, рассматривается взаимодействие гравитационных волн с космологическим магнитным полем, в результате которого гравитационная волна переходит в электромагнитную волну — обратный эффект Герценштейна.

В работе получена система дифференциальных уравнений для обратного эффекта Герценштейна на фоне вселенной Фридмана — Леметра — Робертсона — Уокера. Система уравнений решена для стадии радиационного доминирования в приближении однородного космологического магнитного поля, а также в пренебрежении гравитацией от магнитного поля по сравнению с гравитацией излучения. В результате сделан вывод о крайне малом влиянии обратного эффекта Герценштейна на амплитуду длинноволновых реликтовых гравитационных волн с частотой 10^{-16} – 10^{-18} Гц. Заметное же подавление амплитуды получено для гравитационных волн с частотой, превышающей значение 10^{-4} Гц. Однако при учете взаимодействия рождающихся фотонов с первичной плазмой эффект перехода гравитационных волн в фотоны становится незначительным и для этого диапазона частот.

1. Linde A. D. Inflationary cosmology // *Phys. Scr.* 2000. Vol. T85. P. 168.
2. Galloni G. et al. Updated constraints on amplitude and tilt of the tensor primordial spectrum // *JCAP.* 2023. 062.
3. Giacomozzi G., Zerbini S. Direct smooth reconstruction of inflationary models in $f(R)$ gravity // *Phys. Dark Universe.* 2024. Vol. 44.
4. Dolgov A. D., Panasenko L. A., Bochko V. A. Graviton to Photon Conversion in Curved Space-Time and External Magnetic Field // *Universe.* 2024. Vol. 10 (1). P. 7.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Д. Долгов

УДК 539.1.05

Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow K_L K_S \pi^+ \pi^-$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000

Г. Г. Пастушук

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Детектор КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 предназначен для изучения адронных процессов при электрон-позитронной аннигиляции. Измерение сечений адронных процессов в зависимости от энергии позволяет улучшить точность вычисления вклада в аномальный магнитный момент мюона, а также понять механизм адронизации легких кварков в адроны.

Данная работа посвящена изучению процесса $e^+e^- \rightarrow K_L K_S \pi^+ \pi^-$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 в области энергии 1,4–2 ГэВ. Для определения сечения данного процесса анализируются данные, набранные детектором в сезонах 2019–2023 гг. Первый этап анализа состоит в выделении сигнальных событий и выборе оптимальных критериев отбора. Следующий этап анализа состоит в определении эффективности регистрации событий данного процесса, вычислении радиационных поправок и определении борновского сечения.

Событиям данного процесса соответствуют четыре заряженных пиона — два из пучка и два из распада K_S , и нейтральная частица K_L , которая не регистрируется в детекторе КМД-3. В результате моделирования было выяснено, что основным физическим фоном является процесс $e^+e^- \rightarrow K_S K^+ \pi^- \pi^0$. В работе для разделения событий этих процессов используется информация об ионизационных потерях (dE/dx) в дрейфовой камере, что позволяет построить функцию максимального правдоподобия (PDF) для π/K -разделения. В данный момент идет отработка методики выделения сигнальных событий.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Г. В. Федотович

УДК 524.85

Лептогенезис в асимметричных захватах частиц и античастиц первичными черными дырами

Н. А. Поздняков

Новосибирский государственный университет

Недавно был предложен механизм бариогенезиса, основывающийся на различном захвате частиц и античастиц первичными черными дырами [1]. Важным отличием от известных механизмов через распад является необязательность выполнения двух из трех условий Сахарова: нарушения барионного числа во взаимодействиях элементарных частиц и отклонения темпов реакций от термодинамически равновесных.

Однако различная подвижность частиц и античастиц является ключевым условием для рассматриваемого механизма и может быть обусловлена нарушением С- и СР-симметрий в петлевых поправках к амплитуде рассеяния. Для этого требуется ввести дополнительные частицы, например через потенциал Юкавы [2].

Впрочем, асимметрия первоначально может быть произведена в лептонном секторе, т. е. рассмотрен механизм лептогенезиса. Впоследствии эта асимметрия посредством непертурбативных процессов Стандартной модели переходит в барионную асимметрию до начала процессов первичного нуклеосинтеза.

1. Dolgov A. D., Pozdnyakov N. A. Asymmetric baryon capture by primordial black holes and baryon asymmetry of the Universe // *Phys. Rev. D*. 2021. Vol. 104, No. 8. 083524.
2. Ambrosone A., Calabrese R., Fiorillo D. F. G. et al. Towards baryogenesis via absorption from primordial black holes // *Phys. Rev. D*. 2022. Vol. 105, No. 4. 045001.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. А. Д. Долгов

УДК 539.12.01

**Вычисление полного сечения процесса аннигиляции
электрон-позитронной пары в пару мюонов с точностью $O(\alpha^3)$
с учетом вклада реального излучения**

А. В. Попов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Растущая точность экспериментов в физике элементарных частиц требует учета все более высоких порядков теории возмущений. Это приводит к необходимости уметь считать многопетлевые интегралы различных топологий. Первые поправки (NLO) могут быть определены и без использования современных методов многопетлевых вычислений, но для эксперимента этого порядка точности теории уже недостаточно. Вклады следующего порядка (NNLO) вычисляются исключительно благодаря созданному в последнее время подходу, который систематизирует все множество петлевых интегралов и находит связи между его отдельными элементами. Более того, в некоторых случаях удается получить поправки и еще более высокого порядка, что невозможно было бы сделать, задействуя лишь предшествующие концепции. Еще одним существенным преимуществом данного подхода является то, что он алгоритмизирован, и немалую часть вычислений можно проделать на компьютере.

В данной работе современные многопетлевые методы были применены для нахождения полного сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$ с точностью $O(\alpha^3)$. Методика вычисления основана на оптической теореме, которая позволяет выражать интегралы по фазовому пространству через петлевые интегралы с разрезанными пропагаторами, определяемые согласно правилам Каткосского.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. РАН Р. Н. Ли

УДК 53.02

О финслеровом расширении специальной теории относительности

А.Е. Сагайдак

Новосибирский государственный университет

В данной работе рассматривается механизм получения обычного релятивистского интервала $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ и преобразований Лоренца из релятивистского интервала Робба — Героха [1]. Интервал Робба — Героха допускает обобщение, ведущее к финслеровому расширению специальной теории относительности с метрикой $ds^2 = (n_\lambda dx^\lambda)^{2b} (\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu)^{1-b}$, где n^μ — фиксированный нулевой 4-вектор и $b \ll 1$ — параметр расширения. На основании статьи [2] демонстрируется простое и довольно естественное обоснование этого расширения.

Другое обоснование такого расширения восходит к работам Лалана, Алвея и Богословского [2] и систематически исследовано Богословским под названием «Специально-релятивистская теория локально анизотропного пространства-времени» [3].

Та же финслерова метрика возникает в связи с очень специальной теорией относительности Коэна и Глэшоу [4, 5].

1. Alizzi J., Sen A., Silagadze Z. K. Do moving clocks slow down? // Eur. J. Phys. 2022. Vol. 43, iss. 6. 065601.
2. Sagaydak A. E., Silagadze Z. K. On Finslerian extension of special relativity // Mod. Phys. Lett. A. 2022. Vol. 37, iss. 17. P. 2250106.
3. Богословский Г. Ю. Теория локально-анизотропного пространства-времени. М.: Изд-во МГУ, 1992.
4. Cohen A. G., Glashow S. L. Very Special Relativity // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. 021601.
5. Gibbons G. W., Gomis J., Pope C. N. General Very Special Relativity is Finsler Geometry // Phys. Rev. D. 2007. Vol. 76. 081701.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. З.К. Силагадзе

УДК 539.1.05

Определение тензорной поляризации дейтронной мишени по измеренной асимметрии в рассеянии электронов на малые углы

Д. О. Саутнер

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

На накопителе ВЭПП-3 проводится эксперимент по изучению реакции фотодеинтеграции тензорно-поляризованных дейтронов с целью измерения одной из компонент анализирующей способности реакции. Для ее определения необходимо знать значение поляризации мишени. Цель данной работы — измерение средней поляризации дейтериевой мишени.

Поляризация определяется по изменению в скорости счета событий упругого рассеяния электронов на дейтронах для малых переданных импульсов при смене поляризации мишени. В данной работе описана процедура выделения упругого канала. Так как энергии дейтронов отдачи малы, их энергетический и угловой спектры существенно искажаются при прохождении через материал детектора. Для учета этого фактора было проведено моделирование детектора в Geant4. Представлено сравнение результатов моделирования в Geant4 с обработкой экспериментальных данных.

В результате работы было измерено среднее значение тензорной поляризации дейтериевой мишени в эксперименте.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Ю. В. Шестаков

УДК 539.1

Нарушение четности в рассеянии дейтронов высоких энергий на ядрах углерода и кислорода

Г. А. Симонян

Новосибирский государственный университет
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Несохранение пространственной четности является эффектом слабого взаимодействия. Данный эффект представляет интерес для изучения слабого взаимодействия на фоне сильного взаимодействия в ядрах. Проводились эксперименты по измерению спиновой асимметрии в сечении рассеяния протона на протонах и некоторых других ядрах. В основном эти эксперименты выполнялись при энергиях протонов до 221 МэВ. Есть основания считать, что асимметрия возрастет при увеличении энергии. Данное утверждение основано на эксперименте в лаборатории Argonne, где наблюдалась спиновая асимметрия больше 10^{-6} в рассеянии протонов на молекулах воды.

В работах [1–3] была вычислена спиновая асимметрия в рассеянии протонов на протонах, дейтронах и ядрах. Полученные результаты говорят о том, что предпочтительнее использовать поляризованные дейтроны, чем поляризованные протоны. Кроме того, ускорение поляризованных дейтронов проще осуществить на ускорителе.

Цель данной работы — вычисление асимметрии в процессе рассеяния дейтронов высоких энергий, около 6 ГэВ, на ядрах углерода и кислорода. В работе используется приближение Глаубера, основой которого является эйкональный подход. Также в работе применяется теория Ферми для вычисления амплитуды слабого взаимодействия. В рамках работы были посчитаны полное, упругое и неупругое сечения рассеяния, обусловленные слабым и сильным взаимодействием, и получено предсказание для асимметрии.

Проведение эксперимента по рассеянию поляризованных дейтронов на ядрах предложено для реализации на коллайдере NICA в г. Дубна.

1. Мильштейн А. И., Николаев Н. Н., Сальников С. Г. Нарушение четности в протон-протонном рассеянии при высоких энергиях // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 111. С. 215.
2. Мильштейн А. И., Николаев Н. Н., Сальников С. Г. Несохранение четности в протон-дейтронном рассеянии // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 112. С. 352.
3. Мильштейн А. И., Николаев Н. Н., Сальников С. Г. Нарушение четности в рассеянии протона на углероде и кислороде // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2021. Т. 114. С. 631.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. Г. Сальников

УДК 539.12.01

Однофотонная аннигиляция позитрона на атомном электроном при низких энергиях

С. В. Сорокин

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Взаимодействие с атомными электронами является одним из основных процессов при прохождении позитронов через вещество. В отличие от аннигиляции позитрона на свободном электроном, которая может происходить только с испусканием двух фотонов и более, процесс аннигиляции на атомном электроном может быть однофотонным из-за присутствия третьего тела — ядра. Вследствие передачи импульса ядру данный процесс подавлен относительно основного двухфотонного канала и характеризуется сечением $\sigma \sim \alpha(Z\alpha)^5 / m^2$, где Z — заряд ядра, m — масса электрона, $\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры. Однако уже при $Z \sim 50$ сечения этих реакций будут одного порядка.

В данной работе вычисления проводились в пределе низких энергий позитрона. Полагая $Z\alpha \sim v_p \ll 1$, где v_p — скорость позитрона, с использованием релятивистских кулоновских волновых функций, мы получили аналитические выражения для дифференциального и полного сечения однофотонной аннигиляции.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. А. Крачков



ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук *А. Л. Куперштох*

Ответственный секретарь секции — канд. физ.-мат. наук *М. С. Котельникова*

Экспертный совет секции

д-р физ.-мат. наук *А. П. Еришов*

канд. физ.-мат. наук *А. С. Юношев*

д-р техн. наук *Е. И. Пальчиков*

канд. физ.-мат. наук *Э. Р. Прууэл*

CONDENSED MATTER

Section Head — Dr Phys.-Math. Sci. *A. L. Kupershtokh*

Responsible Secretary — Cand. Phys.-Math. Sci. *M. S. Kotelnikova*

Section scientific committee

Dr Phys.-Math. Sci. *A. P. Ershov*

Cand. Phys.-Math. Sci. *A. S. Yunoshev*

Dr Techn. Sci. *E. I. Palchikov*

Cand. Phys.-Math. Sci. *E. R. Prueel*

УДК 531

Ударное сжатие 3D-структурного алюминия

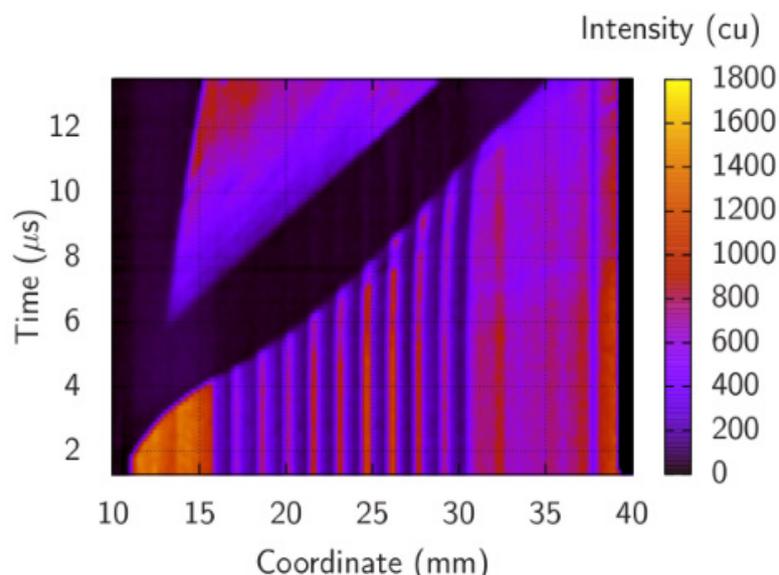
А. М. Асылкаев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Синхротронное излучение (СИ) дает возможность создания источников излучения высокой яркости. Формирование на орбите сгустков электронов (банчей) приводит к генерации импульсов рентгеновских квантов, следующих со стабильным временным интервалом друг за другом. Малая длительность импульса (≈ 1 нс) обеспечивает высокую точность измерения параметров высокоскоростных процессов [1].

В описываемых экспериментах источником СИ является накопительное кольцо ускорителя на встречных электрон-позитронных пучках (ВЭПП-4), которое расположено в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (энергия электронов составляет 4,5 ГэВ, индукция магнитного поля вигглера — 2 Тл).

Для регистрации проходящего излучения с помощью СИ использовался рентгеновский детектор DIMEX, который представляет собой камеру с ионизационным газом (ксенон). Детектор позволяет фиксировать распределение плотности потока рентгеновского излучения за время, меньшее чем интервал между импульсами, и имеет 512 каналов при ширине каждого 0,1 мм [1]. Важно отметить, что благодаря использованию детектора DIMEX реализовывался способ повышения временного разрешения путем совмещения нескольких записей детектора.



Распределение интенсивности при ударном сжатии
3D-структурного алюминия

Предложенный метод позволяет сквозным образом восстановить распределение плотности вещества. По данным детектора могут быть также вычислены массовые скорости и скорости ударной волны в образце.

В данной работе исследуется распределение плотности в 3D-структурном алюминии при ударным нагружении ударниками (взрывными пушками) и взрывом зарядов ВВ диаметром 20 мм.

В первых опытах с помощью данной методики было измерено относительное изменение интенсивности вдоль оси алюминия после сжатия сильной ударной волной (см. рисунок).

1. Прууэл Э.Р. и др. Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов // ДАН РАН. 2013. Т. 448, № 1. С. 38.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Тен

УДК 539.5

Двухуровневое моделирование деформации и разрушения дендритной структуры аддитивного алюминиево-кремниевого сплава

Д. Д. Гатиятуллина

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
Томский государственный университет

Из существующих аддитивных технологий одной из перспективных является проволочное электронно-лучевое аддитивное производство, которое позволяет получать изделия с низкодефектной структурой. Алюминиевые сплавы, используемые в аддитивном производстве для изготовления металлических изделий, представляют интерес за счет их высокой удельной прочности, позволяющей снизить вес детали, оптимальных механических свойств и невысокой стоимости переработки.

В данной работе исследована микроструктура эвтектического сплава AlSi12, изготовленного аддитивным послойным электронно-лучевым плавлением проволоки. Показано, что аддитивно изготовленный сплав AlSi12 представляет собой двухуровневый композит [1]. Внутри каждого слоя образуются алюминиевые дендриты размером десятки микрон, окруженные эвтектическим каркасом. Эвтектика, в свою очередь, определяется на просвет как алюминиевая матрица с объемными равномерно распределенными частицами первичного кремния субмикронных размеров.

На основе экспериментальных изображений построены модельные структуры различных масштабов: дендритные структуры с учетом и без учета прослойки, а также структура композиционного материала эвтектики. Динамические краевые задачи решаются с помощью программного пакета ABAQUS/Explicit методом конечных элементов. Для описания механической реакции кремния и алюминия используются изотропные модели упругости и упруго-пластичности с разрушением соответственно. Реализован двухуровневый подход, при котором первоначально решается задача на микронном уровне о деформировании композита «алюминиевая матрица — частицы кремния», и путем осреднения по объему извлекаются эффективные свойства эвтектики. Затем эти свойства используются на уровне сотен микрон для исследования деформации и разрушения дендритных структур. Результаты моделирования показали, что в прослойке в области границы раздела с эвтектическим каркасом возникает высокая концентрация напряжений, которая вызывает локализацию пластического течения, раннее зарождение трещин и понижение прочности дендритной структуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-11-00222).

1. Balokhonov R., Zemlianov A., Utyaganova V. et al. Two-Scale Computational Analysis of Deformation and Fracture in an Al-Si Composite Material Fabricated by Electron Beam Wire-Feed Additive Manufacturing // Metals. 2023. Vol. 13. P. 1465-1-1465-18.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. Р. Балохонов

УДК 531.7

Анализ неоднородностей плотности в структуре композиционного материала по данным рентгеновской микротомографии

А. В. Караван

Новосибирский государственный университет

Для увеличения механической прочности материалов активно используется армирование исходной матрицы состава прочными волокнами. Полученный материал имеет сложную неоднородную структуру. Для ее анализа и построения модели материала используются методы микротомографии с высоким пространственным разрешением, позволяющие получить детальную трехмерную карту плотности небольшого объема исследуемого материала.

При анализе полученного массива данных возникает задача выделения отдельных компонент — вокселей, соответствующих волокнам и основному материалу матрицы. Часто плотность матрицы и нитей близка, и критерия, основанного только на локальном значении плотности, недостаточно для разделения вокселей. Для решения этой задачи требуется применение более сложных алгоритмов выделения волокон в исследуемом объеме.

Основой для алгоритмов был выбран учет протяженной формы неоднородностей плотности соответствующих нитям. Выделение вокселей, соответствующих нитям, позволило отдельно анализировать структуру связующего материала матрицы и избавиться от ошибки, вносимой неоднородностями, локализованными вблизи волокон.

В работе проведено тестирование нескольких алгоритмов выделения армирующих волокон в матрице данных рентгеновской микротомографии. Проанализирована структура образцов с армирующими волокнами и без. Построены гистограммы пор в исследованных материалах. Показано, что поры локализуются вблизи армирующих нитей, а сам материал достаточно однородный и не содержит полостей.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Э. Р. Прууэл

УДК 539.32, 53.043

**Исследование зависимости интенсивности
механолюминесцентного отклика композита на основе
эпоксидной смолы от массовой концентрации люминофора SAOE**

С.Э. Лукин

Новосибирский государственный университет

Явление механолюминесценции заключается в испускании определенными веществами света при приложении к ним механической нагрузки. На данный момент исследователями выдвигается множество способов использования веществ, способных к механолюминесценции: изготовление датчиков нагрузки, создание индикационных покрытий, позволяющих детектировать внутренние трещины в элементах конструкций и т. д. [1] Среди наиболее перспективных кристаллофосфоров можно выделить $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ (SAOE) [1, 2]. Как правило, люминофор не применяется в чистом виде, а входит в качестве дисперсной фазы в композит на основе полимера или керамики. При этом интенсивность механолюминесценции определяется механическим воздействием на частицы люминофора и, следовательно, зависит от характера взаимодействия между матрицей и наполнителем, средних полей деформации в элементе композита.

В данной работе рассмотрен композиционный материал, изготовленный на основе прозрачной эпоксидной смолы Crystal 85-5 с добавлением люминесцентного микропорошка SAOE (марки MNG-4E) в качестве наполнителя.

Массовая концентрация наполнителя изменялась в пределах 0–15 %. Для каждого исследуемого значения концентрации изготавливались образцы композита, которые затем подвергались одноосному растяжению. В процессе нагружения образца с помощью фотодиода фиксировалась интенсивность механолюминесцентного отклика.

По полученным данным произведен анализ изменения зависимости интенсивности механолюминесцентного отклика от прикладываемой нагрузки при варьировании массовой концентрации люминесцентного наполнителя.

1. Zhuang Y., Xie R. J. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: a review // *Adv. Mater.* 2021. Vol. 33, No. 50. P. 2005925.
2. Xu C. N. et al. Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74, No. 17. P. 2414–2416.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Т. А. Брусенцева

Исследование зависимости импульса тороидального пузыря от времени

Б.И. Марактаев

Новосибирский государственный университет

Тороидальные пузыри являются разновидностью плавучих вихревых колец, движущихся в жидкости, в ядре которых находится газ. Отличительной особенностью плавучих вихревых колец, по сравнению с однородными, является наличие действующей на них выталкивающей силы, что оказывает существенное влияние на их динамику. Представляет интерес выяснить, действует ли на тороидальный пузырь сила сопротивления, как на обычный газовый пузырь в жидкости. Для этого исследовался импульс вихря.

Эксперименты проводились в резервуаре из оргстекла, заполненного водой, с размерами $1500 \times 500 \times 500$ мм. Тороидальные пузыри генерировались путем инъекции импульсной струи воздуха в воду. Регистрация тороидальных пузырей проводилась тепловым методом. Полученные изображения обрабатывались в программной среде MATLAB. Экспериментально измерены зависимости скорости и радиуса тороидального пузыря от времени при различных объемах воздуха в нем. Используя формулу Сэффмэна [1], на основании полученных данных рассчитали импульс тороидального пузыря в зависимости от времени. Расчеты сравнивались с теоретической формулой, полученной Тернером [2], где единственной силой на пузырь была сила Архимеда. Оказалось, что измеренный импульс линейно растет с увеличением времени, что согласуется с теоретической зависимостью Тернера. В то же время угол наклона экспериментальной зависимости незначительно отличается от теоретического. Это означает, что сила сопротивления, предложенная в работе [3], если и действует на тороидальный пузырь, то ее влияние несущественно.

1. Saffman P. G. The velocity of viscous vortex rings // Stud. Appl. Math. 1970. Vol. 49, No 4. P. 371–380.
2. Turner J. S. Buoyant vortex rings // Proc. Royal Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci. 1957. Vol. 239. P. 61–75.
3. Vasel-Be-Hagh A. R., Carriveau R., Ting D. S. K., Turner J. S. Drag of buoyant vortex rings // Phys. Rev. E. 2015. Vol. 92, No 4. P. 043024.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. В. Никулин

УДК 621.373, 621.314.21

Модели электрофизических процессов в спиральных генераторах с разделенными в пространстве индуктивной и емкостной частями

А. Г. Параскун

Новосибирский государственный университет

Спиральный генератор представляет собой устройство, запасующее электрическую энергию при одном, относительно низком напряжении, и разряжает накопленную энергию в виде короткого (порядка 1 нс) электрического импульса с напряжением, во много раз превосходящим запасенное. Он состоит из двухшинной линии, свернутой в рулон.

При распространении волны в спиральной линии электрическая энергия переходит в энергию магнитного поля и электрическую энергию коаксиальных емкостей, которые включаются последовательно. После отражения от разомкнутых концов линии энергия магнитного поля в ней начинает переходить в электрическую, и волна в активной линии поменяет полярность. Когда отраженная волна окажется в точке, где установлен коммутатор, напряжение между началом и концом спирали достигнет своего максимального значения.

В работе создаются и исследуются различные варианты спиральных генераторов, индуктивная и емкостная часть которых разделены в пространстве вдоль оси намотки рулона.

Представлено численное решение задачи зависимости напряжения на выходе спирального генератора от времени. Процесс распространения электромагнитной волны в активной и пассивной линиях описывается телеграфными уравнениями, а процесс стекания заряда — моделью классического колебательного контура. Решение распространения волн находилось методом Годунова, а для вычисления граничных условий для спирального генератора использовались явные разностные схемы первого порядка.

Также в работе представлены экспериментальные результаты распределения индукции магнитного поля внутри спиральной линии во времени, полученные численным интегрированием напряжения на индуктивном датчике, размещенном внутри генератора.

Приводятся численные модели пространственного распределения магнитного поля внутри и снаружи спирального генератора, полученные в программе моделирования в конечных элементах femm. Выявлены зависимости влияния ферритового магнитопровода в спиральной линии на распределение магнитного поля и на КПД генератора соответственно.

Результаты, полученные в работе, позволяют предсказывать и моделировать физические параметры спиральных генераторов с достаточной точностью, что может быть полезно для технических расчетов конечных устройств.

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. Е. И. Пальчиков

Прочность паяных соединений сплава АМгб

И. Р. Салтыков, И. В. Шутов

Удмуртский государственный университет, Ижевск

Сплавы марки АМг применяются в авиастроении и космической технике благодаря малому весу, высокому для алюминиевых сплавов пределу текучести и трещиностойкости при вибрационных нагрузках [1]. В ряде технических задач требуется получить металлургическое соединение тонкостенных элементов, и тогда целесообразно применить метод высокотемпературной пайки. Однако возникает ряд проблем, связанных с активностью магния. Одной из них является образование интерметаллидов, которое ведет к снижению коррозионной стойкости и механических свойств.

Данная работа посвящена построению математической модели для расчета прочностных свойств паяных соединений сплава АМгб и припоя системы Zn-Cu-Al. В работе применялся метод численного моделирования в ПО COMSOL MultiPhysics. Вычислительный эксперимент проведен в трех основных постановках: бездефектная пластина АМгб, пластина АМгб с дефектом в центре, паяное внахлест соединение пластин АМгб с припоем Zn-Cu-Al. Верификация осуществлена для первых двух постановок.

Для первой постановки (сплошной пластины) наблюдается линейная упругая деформация. Верификация в данном случае проведена путем расчета модуля Юнга E . Сравнение справочного значения модуля Юнга с полученным в ходе расчетов выявило погрешность, равную 0,013 %, что позволяет сделать вывод о корректной работе модели в области упругих деформаций.

Задача во второй постановке (пластина с дефектом) верифицирована с помощью аналитического решения [2]:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{НАГР}}{2} \times \left(2 + \left(\frac{R}{x} \right)^2 + 3 \times \left(\frac{R}{x} \right)^4 \right),$$

где R — радиус дефекта, мм; $\sigma_{нагр.}$ — приложенная к образцу нагрузка, МПа.

Аналитическое и расчетное решения демонстрируют хорошую сходимость во всей рассматриваемой области. На краю дефекта возникают высокие напряжения с интенсивностью до 300 МПа. Снижение до уровня приложенной нагрузки 100 МПа наблюдается на расстоянии 4 мм от края дефекта. Справочное значение предела текучести для сплава АМгб составляет 130–140 МПа. Таким образом, наглядно продемонстрировано, что возникающие в области дефекта напряжения приведут к интенсивным деформациям и последующему разрушению.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00413).

1. Белов А. Ф. Строение и свойства авиационных материалов. М.: Металлургия, 1989.
2. Roylance D. // Mech. Mater. John Wiley & Sons, 1996.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук М. Д. Кривилев

Исследование влияния способа изготовления заряда тротила на профиль массовой скорости

А. С. Туманик

Новосибирский государственный университет

Как известно, чувствительность заряда взрывчатого вещества зависит не только от вида ВВ и его плотности, но и от структуры, которая, в свою очередь, определяется способом изготовления. Прогнозирование характеристик заряда ВВ и его чувствительности является актуальной задачей. Наибольшая зависимость параметров от структуры наблюдается для тротила. Так, критический диаметр литого и прессованного зарядов отличается на порядок. В рамках теории горячих точек этот эффект принято объяснять разным характером неоднородностей, на которых происходит эффективное развитие химической реакции в детонационной волне.

В работе [1] проведено томографическое исследование структуры зарядов литого и прессованного тротила с близкой плотностью. Показано, что прессованный заряд тротила обладает меньшим характерным размером пор и более однороден в сравнении с литым зарядом. Согласно теории горячих точек, литой заряд тротила должен быть чувствительнее прессованного, что противоречит имеющимся экспериментальным данным по ударно-волновой чувствительности, скорости кинетики химических реакций и данным по критическому диаметру.

Цель настоящей работы — дальнейшее изучение зависимости параметров зарядов тротила от их структуры. Проведен ряд экспериментов по исследованию профиля массовой скорости при детонации зарядов тротила с помощью лазерной гетеродинной методики, использованы две преграды с разными ударно-волновыми импедансами: LiF и ПММА. Полученные профили массовой скорости и параметры детонации для прессованного тротила имеют хорошее соответствие с результатами работы [2].

1. Satonkina N. P., Kuper K. E., Ershov A. P. et al. Tomographic study of the structure of cast and pressed trotyl charges // Results Eng. 2022. Vol. 16.
2. Sollier A., Hebert P., Letremy R. Chemical reaction zone measurements in pressed trinitrotoluene (TNT) and comparison with triaminotrinitrobenzene (TATB) // J. Appl. Phys. 2022. Vol. 131 (5).

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Э. Р. Прууэл

УДК 544.032

**Морфология металлических наночастиц,
полученных методом детонационного синтеза**

Н. А. Хлебановский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

В данной работе приводятся результаты опытов по детонационному синтезу наночастиц металлов и их исследования методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, рентгенофазового анализа и малоуглового рентгеновского рассеяния.

Соединения металлов, смешанных с взрывчатыми веществами, в ходе термического разложения за детонационным фронтом являются источниками свободных атомов металлов и их оксидов, и впоследствии из них формируются наночастицы. В качестве соединений использовались оксалаты железа и меди и ацетат меди.

Морфология частиц была охарактеризована методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, рентгенофазового анализа и малоуглового рентгеновского рассеяния, был проведен сравнительный анализ результатов. В результате были получены распределения по размерам частиц для образцов с разными исходными соединениями металлов, содержанием соединений в исходных зарядах и плотностью зарядов.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. О. Кашкаров

**Ультразвуковое эхо-импульсное исследование изделия
из сплава ВТ6, полученного методами
металлического аддитивного производства**

М.М. Цыплаков

Томский политехнический университет

Основным преимуществом активно развивающихся в настоящее время аддитивных технологий (3D-печати) является послойное выращивание изделий, позволяющее, в частности, получать детали с такими геометрическими формами, которые во многих случаях нельзя получить классическими методами производства (прокат, штамповка, резание и др.). Склонность аддитивных методов производства к дефектообразованию требует организации качественного контроля получаемых изделий. Физические и технические особенности акустического контроля предполагают возможность его внедрения в аддитивное производство, так как распространяющиеся в объекте контроля упругие волны высоких частот, излучаемые и принимаемые движущимися излучателями-датчиками, позволяют характеризовать дефекты и упругие свойства во всем объеме печатающегося изделия.

Среди множества опубликованных исследований по теме, в частности в работе Ма и соавт. [1], показано, что ультразвуковые методы применимы к решению задач контроля некоторых микроструктурных характеристик изделий аддитивного производства, например среднего размера зерна.

В настоящей работе представлены результаты ультразвукового исследования изделия, напечатанного методом электронно-лучевого спекания порошка сплава ВТ6. Исследование проводилось в эхо-импульсном режиме одноэлементным пьезоэлектрическим датчиком-излучателем с рабочей частотой в 10 МГц. В качестве иммерсионной среды использовалась вода.

Установлена следующая корреляция: затухание ультразвука в изделии возрастает вдоль направления его печати.

1. Ma Y. et al. Simultaneous Compositional and Grain Size Measurements Using Laser Opto-Ultrasonic Dual Detection for Additive Manufacturing // Mater. 2020. Vol. 13. P. 2404.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. Г.В. Гаранин

УДК 532.5

Падение капли жидкости на плоскую поверхность: влияние контактного угла

А. М. Шаин

Новосибирский государственный университет

Столкновение капли со стенкой является важным элементом различных производственных процессов: среди них распылительное охлаждение, очистка, нанесение покрытий, смачивание и струйная печать. Также могут представлять интерес естественные воздействия, например: влияние дождевых капель изучается в связи с их отношением к отслоению и эрозии почвы. Другие примеры включают воздействие высокоскоростных капель, приводящее к эрозии лопаток турбин или к деформации и дроблению горных пород.

В настоящей работе было выполнено численное моделирование падения капли жидкости на твердую подложку. Моделирование проведено путем численного решения уравнений Навье — Стокса с использованием кода Basilisk [1]. Отслеживание межфазной поверхности осуществлялось с помощью метода VOF [2]. Расчетная область представляла из себя кубический домен размером 10 мм, в котором задавались начальные и граничные условия.

Пространственная дискретизация расчетной области выполняется с использованием кубических ячеек. Сетка адаптивно сгущается с помощью специального алгоритма, который оценивает локальную ошибку аппроксимации градиентов расчетных величин.

Стационарный контактный угол показал хорошее согласие с экспериментом на начальном этапе растекания. Для повышения точности расчета динамики растяжения капли необходимо учитывать переменный динамический контактный угол, который зависит от скорости контактной линии.

1. López-Herrera J. M., Popinet S., Castrejón-Pita A. A. An adaptive solver for viscoelastic incompressible two-phase problems applied to the study of the splashing of weakly viscoelastic droplets // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2019. Vol. 264. P. 144–158.
2. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *J. Comput. Phys.* 1981. Vol. 39, No. 1. P. 201–225.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. С. Вожаков



ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Научный руководитель секции — *П. В. Чеблаков*

Ответственный секретарь секции — канд. техн. наук *Г. А. Фаткин*

Экспертный совет секции

д-р физ.-мат. наук *А. М. Батраков*

д-р физ.-мат. наук *И. Б. Логашенко*

канд. техн. наук *К. Ф. Лысаков*

INSTRUMENTATION IN EXPERIMENTAL PHYSICS

Section scientific supervisor — *P. V. Cheblakov*

Responsible Secretary — Cand. Techn. Sci. *G. A. Fatkin*

Section scientific committee

Dr Ph.-Math. Sci. *A. M. Batrakov*

Dr Ph.-Math. Sci. *I. B. Logashenko*

Cand. Techn. Sci. *K. F. Lysakov*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

УДК 53.087

Сбор и передача метеорологических данных в ИЯФ СО РАН

М. Д. Афанасьев

Новосибирский государственный университет

Метеорологические данные имеют существенное значение в различных науках, например: биологии, медицине, физике. В частности, в ИЯФ СО РАН на криогенном магнитном детекторе для правильной калибровки дрейфовой камеры необходима информация об атмосферном давлении, а колебания метеорологических параметров должны приниматься в расчет при проведении сейсмического мониторинга зданий и сооружений. Данная работа направлена на модернизацию системы сбора, хранения и обработки метеорологических данных в ИЯФ СО РАН.

Общая схема системы выглядит следующим образом: датчик подключен к одноплатному компьютеру, который подключен к локальной сети и передает по ней данные на сервер, откуда данные предоставляются пользователям. В ходе этой работы организовано взаимодействие электронных термодатчиков DS18B20 через интерфейс 1-wire и метеостанции SOKOL-M через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus к одноплатному компьютеру Raspberry Pi, разработано соответствующее программное обеспечение. Собран экспериментальный измерительный стенд для проведения калибровки всех термодатчиков по эталонным поверенным термометрам, проведены измерения и вычислены калибровочные коэффициенты.

В дальнейшем планируется доработка ПО для повышения отказоустойчивости системы и предотвращения потери данных при проблемах с сетью, а также создание системы автоматического оповещения о возникновении неисправностей.

Научный руководитель — А. В. Герасёв

Хранение и обработка метеорологических данных в ИЯФ СО РАН

Д. А. Богомяков

Новосибирский государственный университет

Метеорологические условия могут оказывать влияние на различные эксперименты и измерения. Например, при проведении сейсмического мониторинга зданий было замечено, что их собственная частота зависит от температуры, давления и уровня осадков. Также в ИЯФ СО РАН в экспериментах на коллайдере ВЭПП-2000 с криогенным магнитным детектором погодные условия могут оказывать влияние на точность различных измерений. В связи с этим нужен сервис, предоставляющий необходимые точные метеорологические данные. Требовалось создать сайт и базу данных для записи, хранения, обработки и отображения метеорологических данных.

Первый этап работы — калибровка датчиков. Калибровка электронных датчиков температуры проводилась относительно ртутных термометров. Датчики охлаждались азотом до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нагревались горячей водой до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. По разности показаний электронных и ртутных термометров с помощью методов нормального решения и градиентного спуска были рассчитаны калибровочные коэффициенты функций. Вторым этапом — создание базы данных с помощью СУБД PostgreSQL. В нашей базе данных хранятся 3 таблицы: виды калибровочных функций; адреса датчиков с их калибровочной функцией, коэффициентами, описанием и типом; значения датчиков и время записи. Третьим этапом — разработка серверного программного обеспечения, обеспечивающего работу сайта, добавление измерений в базу и получение необходимых данных из базы. Серверное ПО использует веб-фреймворк Django и состоит из двух приложений: первое отвечает за получение и обработку метеорологических данных, второе — за работу сайта и периодическое обновление графиков.

Получены калибровочные коэффициенты и функции для всех датчиков температуры, реализованы база данных и сайт. В перспективах откалибровать датчики направления и скорости ветра, количества и интенсивности осадков, влажности и атмосферного давления. Реализовать более интерактивный и понятный для использования сайт, сделать систему аутентификации пользователей сайта для выбора отображения метеорологических данных за конкретный период. Сделать систему уведомлений подписчиков об аномальных погодных условиях. Создать интерактивное приложение для мобильных устройств.

Научный руководитель — П. Б. Чеблаков

УДК 629.78

**Встроенный алгоритм обработки данных
бортовых тепловизионных датчиков системы управления
ориентацией малого космического аппарата «Норби-3»**

К. И. Коржаневский

Новосибирский государственный университет

В последние годы наблюдается рост интереса к использованию малых космических аппаратов (МКА) для различных научных и прикладных задач. Одним из популярных форматов МКА являются спутники CubeSat, имеющие стандартизированные размеры и форму. Преимущества МКА заключаются в их низкой стоимости, простоте конструкции и возможности более дешевого попутного запуска в качестве вторичной нагрузки на ракетоносителях.

В большинстве случаев для нормального функционирования МКА и установленных на него полезных нагрузок требуется знание положения и ориентации в пространстве и возможность задавать и поддерживать ориентацию МКА в соответствии с задачами миссии. Для решения задач ориентации на борту МКА имеется система ориентации и позиционирования, которая содержит в своем составе сенсорную систему для измерения текущей ориентации, вычислительный блок для расчета управляющего воздействия и исполнительные устройства для физической реализации момента силы, поворачивающего аппарат.

Одной из задач системы ориентации разрабатываемого МКА «Норби-3» является получение векторов направлений на внешние ориентиры — Солнце и Землю. Эти данные используются расчетным модулем для вычисления текущей ориентации аппарата в инерциальной системе координат. В настоящей работе изложен процесс разработки алгоритма вычисления вектора направления на центр Земли по данным бортовых тепловизоров и рассмотрены различные этапы его работы: синхронное выполнение снимков, фильтрация и кластеризация изображений, пересчет пикселей снимка в вектора, получение синтетического контура границы Земли по данным от разных датчиков, определение вектора направления на центр Земли.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Н. Горев

УДК 53.087.45

Система синхронизации и коррекции данных для станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ

М. А. Корниевский

Новосибирский государственный технический университет

В ЦКП СКИФ в составе станций первой очереди планируется строительство станции «Быстропротекающие процессы». Для изучения ударно-волновых и детонационных процессов в составе станции будут применяться детекторы DIMEX (*Detector for imaging of explosions*, детектор для изучения взрывных процессов) [1, 2]. DIMEX способен регистрировать синхротронное излучение (СИ) от каждого сгустка электронов в накопителе. Для синхронизации работы накопителя, детектора и экспериментального оборудования во взрывной камере разрабатывается специализированный блок синхронизации. Блок принимает сигналы от системы управления накопителем, от прерывателя, который открывает пучок на ~100 мкс во время эксперимента, а также от датчиков во взрывной камере. По комбинации этих сигналов вырабатываются импульсы на запуск детектора и на детонатор. Работа блока синхронизации основана на отладочном наборе на основе ПЛИС Cyclone 10.

Поскольку сгустки могут отклоняться от равновесной орбиты, а также различаться по току, то для коррекции измерений величины сигнала необходим погустковый монитор положения и интенсивности пучка СИ. Показания этого монитора будут использоваться для поправок результатов измерений детекторов DIMEX. В настоящее время разработан прототип блока регистрации, который включает в себя 4 канала. Каждый канал состоит интегратора, выходной сигнал с которого оцифровывается быстрым АЦП в момент прохождения максимума сигнала. Далее результат оцифровки передается в ПЛИС, в которой реализован алгоритм сохранения данных и передачи их в компьютер пользователя.

1. Shekhtman L., Aulchenko V., Kudryavtsev V. et al. Status of the development of the silicon microstrip detector for ultra-fast dynamic studies // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2299. 050004.
2. Shekhtman L., Aulchenko V., Kudashkin D. et al. Operation of a silicon microstrip detector prototype for ultra-fast imaging at a synchrotron radiation beam // Nucl. Instrum. Methods A. 2020. Vol. 958. 162655.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Л. И. Шехтман

УДК 681.58, 532.542.4

Разработка программно-аппаратного обеспечения системы импульсного вдува на кромке сопла для контроля истечения струи газа

Д. А. Кушнарев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

При проектировании камер сгорания и горелочных устройств широко применяются методы вычислительной гидроаэродинамики. В процессе работы таких устройств происходит перемешивание струи горючей смеси с окружающей средой. За этот процесс отвечают мелкомасштабные вихревые структуры, которые начинают образовываться на некотором расстоянии от кромки сопла. Существуют активные и пассивные методы управления потоками, которые могут повысить интенсивность перемешивания. Развитие и повышение достоверности методов численного моделирования потоков в режиме управления на основе детальных экспериментальных измерений актуально для проектирования горелочных устройств и камер сгорания.

Данная работа посвящена разработке программно-аппаратного обеспечения системы импульсного вдува для реализации методов активного управления. Вторичные струйные потоки были использованы для интенсификации смешения, как в работе [1].

Спроектированы и изготовлены методом 3D-печати сменные сопловые насадки с щелевыми каналами, устанавливаемыми на выходную часть сопла газоструйного стенда. Для работы с щелевым вдувом в пульсирующем режиме использовались быстроедействующие воздушные клапаны SMC серии SX10 с частотой переключения до 1,2 кГц. Контроль работы клапанов на выходе осуществлялся датчиками абсолютного давления. Для управления клапанами использовался программируемый контроллер NI MyRIO с встроенной программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) Xilinx Zynq-7010. Разработка управляющей программы велась в среде LabVIEW и состояла в написании программы для микроконтроллера и для синтеза логической схемы фазированного управления клапанами.

Разработанная программно-аппаратная платформа испытана на эксперименте по визуализации вихревых структур в режиме активного управления струйным течением. Для засева потока использовалась глицериновая взвесь (туман), подмешанная в основное течение, а для регистрации вихревых структур применялась высокоскоростная КМОП-камера Mega speed MS140K. Подтверждено влияние возмущений, подающихся коаксиально основному потоку через щелевой распределитель, на структуру свободной круглой струи [2]. Для режима $Re = 5000$ было показано, что использование пульсирующего вдува с частотой $St = 0,5$ интенсивнее всего перемешивает незасеянный окружающий воздух с аэрозолем.

1. Wu Z. et al. Jet mixing optimization using machine learning control // Exp. Fluids. 2018. Vol. 59. С. 1–17.
2. Гиневский А. С., Власов Е. В., Каравосов Р. К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001.

Научный руководитель — канд. техн. наук М. П. Токарев

УДК 535.8

Моделирование рентгеновской оптики для станции 1-1 «Микрофокус» в проекте СКИФ

В. В. Овсянник

Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время идет активная разработка проекта СКИФ (Сибирский кольцевой источник фотонов). Это современный источник синхротронного излучения поколения 4+, который строится в Новосибирске в наукограде Кольцово и является проектом класса «мегасайенс». На момент запуска СКИФ будет обладать рекордно высокими характеристиками синхротронного излучения во всем мире, что, в свою очередь, позволит выполнять на нем передовые эксперименты в различных областях науки.

На момент начала работы СКИФа планируется запустить шесть станций первой очереди, одной из которых является ондуляторная станция 1-1 «Микрофокус». Станция «Микрофокус», сочетая в себе преимущество накопителя в виде сверхмалого эмиттанта пучка электронов и последние достижения рентгеновской оптики, позволит получать высокоинтенсивные пучки синхротронного излучения субмикронных размеров. Исследования на этой станции будут проводиться в различных областях биологии, химии и материаловедении. Очевидно, что для различных экспериментов будет необходима своя рентгеновская оптика. По этой причине встает задача о моделировании разных рентгенооптических схем с целью получения параметров пучка излучения на образце, таких как размер пучка, его расходимость и интенсивность.

В данной работе было проведено моделирование нескольких рентгенооптических схем, предложенных проектировщиками станции. Для моделирования использовались такие программные пакеты, как Oasys (OrAnge Synchrotron Suite) и XRT (XRayTracer), которые позволяют проводить моделирование с помощью методов трассировки лучей. Последняя программа позволяет одновременно сочетать в себе как метод трассировки лучей, так и метод расчета волнового фронта, что является важным преимуществом при моделировании ондуляторного излучения, которое имеет сложные угловую и спектральную расходимости. Также было проведено моделирование поглощаемой мощности на некоторых элементах схемы.

В результате работы были получены характеристики пучка в точке расположения образца после прохождения различных рентгенооптических схем. Получены распределения поглощенной мощности излучения на рентгенооптических элементах и величины поглощенной мощности этими элементами.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. В. Золотарев

УДК 53.087.65

Управляющая плата двухкоординатного рентгеновского детектора DIMEX-Si2D

П. В. Петренко

Новосибирский государственный университет

Для изучения ударно-волновых и детонационных процессов в ЦКП СКИФ идет строительство станции «Быстропротекающие процессы». Наилучшие результаты исследований достигаются при использовании многоканальных рентгеновских детекторов, в которых в качестве регистрирующего элемента используется полупроводниковый сенсор в сочетании со специализированными интегральными микросхемами. Таким детекторами являются детекторы интегрирующего типа DIMEX, в которых регистрируется величина суммарного сигнала от всех фотонов, попавших в детектор, в течение одной вспышки СИ. Такой детектор состоит из полупроводникового сенсора, специализированных интегральных микросхем, расположенных на платах регистрации, и управляющей платы, обрабатывающей результаты эксперимента и представляющей их на экране пользователя.

Для обеспечения работы станции разрабатываются однокоординатный (2048 электронных канала) и двухкоординатный (10 240 электронных канала) детекторы DIMEX. Пространственное разрешение детекторов определяется шагом полосок сенсора и равен 50 мкм. В случае двухкоординатного детектора используются 5 плат регистрации, расположение которых позволяет измерять вторую координату с шагом 1 мм. Основная цель работы — разработать управляющую плату для двухкоординатного рентгеновского детектора DIMEX-Si2D.

Управляющая плата состоит из программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) Altera Cyclone IV EP4CGX50CF23C6N, 3 блоков статической памяти (SRAM), служащих для обработки данных с 5 плат регистрации по 512 электронных каналов на каждой плате. Связь с компьютером пользователя осуществляется через Ethernet-интерфейс.

В результате были разработаны принципиальные схемы и начата работа над топологией платы. К концу мая 2024 г. планируется отправить плату в производство.

Научный руководитель — А. А. Глушак

УДК 621.928.8

Разработка магнитной системы масс-сепаратора в установке ионной имплантации

У.Г. Собина

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Современная микроэлектроника не может существовать без имплантеров — устройств, позволяющих вводить атомы примесей в поверхностный слой полупроводников. Качество полученной структуры непосредственно зависит от концентрации, глубины расположения и толщины легирующего слоя. Для достижения требуемых характеристик легируемого образца в процессе имплантации используются ускорители, позволяющие получать прецизионные энергии и углы введения ионов в кристалл. В основном в качестве легирующих элементов используются бор, мышьяк, фосфор, индий, сурьма, германий, кремний, азот, водород и гелий. Принцип работы имплантера основан на генерации пучка ионов, его последующем ускорении и внедрении в поверхность легируемого образца. Ионные источники, используемые в современных имплантерах, производят набор частиц с разным отношением энергий к массе. Именно поэтому частицы ионного пучка нуждаются в последующей фильтрации с помощью магнитной системы. Нужно разделять не только атомы разных элементов, но и изотопы, например бора ^{10}B и ^{11}B или сурьмы ^{121}Sb и ^{123}Sb . Чистота полученного пучка является важным параметром и непосредственно влияет на качество легирования. Одним из наиболее простых способов разделения изотопов в имплантерах является использование постоянного магнитного поля, в котором радиус поворота частицы зависит от ее импульса.

В данной работе реализован алгоритм, позволяющий успешно моделировать траектории пролета частиц в магнитном поле дублета квадрупольных линз и постоянного поворотного магнита с регулируемыми параметрами величины градиентов и магнитного поля соответственно. Траектории частиц и схема системы изображаются перед пользователем на экране по выполнению алгоритма, предоставляя возможность качественного анализа изображения. Проведено исследование зависимости расстояний, на которые расходятся изотопы сурьмы ^{121}Sb и ^{123}Sb на выходе диполя, изображены соответствующие графики. После анализа полученных зависимостей сделан вывод о правилах выбора углов отклонения для оптимального разведения частиц. Выполнен подбор параметров системы, позволяющий разделить изотопы, выполнить фокусировку и сохранить ограничения на поперечные размеры пучка.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Старостенко

УДК 53.082.3

Разработка системы сбора термоанемометрической информации на основе измерительного комплекса ТАИК-3М

С. А. Стерлягов

Образовательный центр «Горностай», Новосибирск

В работе рассмотрен термоанемометрический измерительный комплекс ТАИК-3М производства 1989 г. СКТБ «Турбулентность», Донецк. Уникальной особенностью данного измерительного комплекса является высокая точность и чувствительность измерений пульсационных составляющих скорости течения воздушного потока благодаря четырехпроводной схеме подключения и использованию в датчиках в качестве чувствительного элемента тонкой вольфрамовой нити диаметром 5–10 мкм. Основной сложностью использования данного измерительного прибора в современном эксперименте является устаревший интерфейс вывода данных и отсутствие возможности подключения к компьютеру и, соответственно, накопления данных.

На основе измерительного комплекса ТАИК-3М создана система сбора термоанемометрической информации в эксперименте. Разработанная система заключается в выводе и записи информации на компьютер и основывается на измерении и оцифровке получаемых в аналоговом формате параметров средних и пульсационных составляющих скорости течения воздушного потока [1]. Для снятия аналоговых сигналов с прибора был использован аналого-цифровой преобразователь LCARD E14-440D, а также разработан программный модуль на языке C++. Также создана система восстановления чувствительных элементов (вольфрамовая нить) измерительных датчиков, включающая прибор для контактной сварки и устройство микропозиционирования.

С использованием модернизированного термоанемометрического комплекса были выполнены измерения скорости воздушного потока и среднеквадратичной пульсации в серии экспериментов. Получены профили продольной скорости в нескольких сечениях воздушной струи. Работа выполнялась на базе Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН.

1. Грек Г. Р., Бойко А. В., Гилев В. М. и др. Автоматизированная система сбора термоанемометрической информации в аэрофизическом эксперименте // Междунар. журн. прикл. и фонд. исслед. 2014. № 5-1. С. 11–14.

Научный руководитель — В. Н. Летушко

УДК 621.384.6.01

Создание программного комплекса для расчета динамики частиц во внешних электромагнитных полях

В. В. Федоров

Новосибирский государственный университет
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Создание программного комплекса для расчета динамики частиц во внешних электромагнитных полях является актуальной задачей, обусловленной необходимостью глубокого понимания процессов, происходящих в сильноточных электронных и ионных пучках в ускорителях.

В рамках данной работы были разработаны и исследованы две части программного комплекса: KENV и REDPIC, каждая из которых решает свои специфические задачи.

В первой части работы, посвященной KENV, была разработана модель на основе уравнений огибающей для эллиптического пучка с распределением Капчинского — Владимирского. Этот подход позволил существенно ускорить процесс расчетов, сохраняя при этом достаточную точность по сравнению с PIC-кодами и экспериментальными данными. Основные задачи данной части включали в себя разработку соответствующего кода, сравнение полученных результатов с альтернативными методами моделирования, а также применение алгоритмов машинного обучения для восстановления огибающей пучка.

Вторая часть работы, REDPIC, фокусируется на кинетическом описании динамики пучков с использованием уравнений Власова — Максвелла. Данный подход позволяет детально анализировать структуру распределения частиц в фазовом пространстве, что является ключевым для понимания коллективных взаимодействий в пучках.

Разработанный код, представляя пучок в ускорителе как ансамбль макрочастиц, реализует численную релятивистскую разностную схему, которая приближает систему уравнений Власова — Максвелла во втором порядке точности.

Обе части программного комплекса демонстрируют важность комплексного подхода к моделированию динамики частиц и открывают новые перспективы для исследования различных процессов в электронных и ионных пучках в ускорителях.

Результаты данной работы могут быть использованы для оптимизации параметров ускорительных комплексов, а также для разработки новых методик управления пучками частиц.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Никифоров

УДК 53.07

Программное обеспечение счетного рентгеновского координатного детектора

М. А. Ярцева

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Эффективным инструментом для исследования динамики быстрых физических и химических процессов является синхротронное излучение, которое позволяет проводить измерения с высоким временным и пространственным разрешением, используя многоканальные координатные детекторы. Для обеспечения работы станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» в ИЯФ СО РАН разрабатываются координатные рентгеновские детекторы счетного и интегрирующего типов. Такие детекторы позволяют регистрировать поканальное распределение интенсивности регистрируемого излучения. По изменению картины интенсивности можно определить, какие процессы произошли в исследуемом образце.

Для новых детекторов разрабатывается аппаратное и программное обеспечение (ПО). ПО обладает универсальным интерфейсом передачи данных, что позволяет использовать его для всех типов детекторов. Задачами ПО являются: управление работой детектора и подключенных к нему устройств; сбор, обработка и визуализация экспериментальных данных. Разработка ПО осуществляется на языке программирования QT5 C++, среда разработки — QT Creator. Одним из важных требований к данному ПО является его кроссплатформенность.

В ходе работы был проведен обзор теоретического материала по тематике исследования и сбор требований; разработан прототип оконного приложения ПО; реализован алгоритм выравнивания счета в каналах регистрации, который, в свою очередь, состоит из вычислительного этапа и этапа коррекции. Для тестирования и отладки работы алгоритма был разработан эмулятор экспериментальных данных. В дальнейшем планируется развитие приложения путем добавления в него опций управления работой детектора.

Научный руководитель — А. А. Глушак

РАДИОФИЗИКА И УСКОРИТЕЛИ

УДК 53.096

Исследование поперечной динамики интенсивного пучка электронов с энергией до 30 кэВ для различных применений

Н. Абец

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет

Интенсивные пучки с энергией электронов до 30 кэВ обладают преимуществами относительно низкого уровня генерации тормозного излучения и упрощенной системой высоковольтного питания. Такие пучки также способны обеспечить высокую плотность мощности на исследуемой мишени, что востребовано в материаловедческих задачах для различных областей.

Так, в области управляемого термоядерного синтеза одной из ключевых проблем для перспективных токамаков реакторного класса является выбор материалов, которые могут выдерживать тепловые нагрузки от интенсивных потоков плазмы и частиц. Наибольшие тепловые нагрузки на стенки токамака возникают в области дивертора. Например, для строящегося токамака ИТЭР в качестве материала облицовки дивертора был выбран вольфрам.

Для имитации такого теплового воздействия можно использовать частотно-импульсный источник электронного пучка с энергией до 30 кэВ на основе накаливаемого катода. Пучок должен обеспечивать экспозиционную нагрузку ~ 100 Дж/см² при длительности импульса около 1 мс на поверхности вольфрамовой мишени на площади около 1 см², работать на частоте 10–20 Гц при полном числе импульсов на мишень до 10^7 .

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается экспериментальный стенд для изучения усталостной стойкости тугоплавких материалов для будущих токамаков реакторного класса. Для имитации тепловой нагрузки на данном стенде используется интенсивный электронный пучок с энергией до 30 кэВ.

В работе описаны первые результаты работы с пучком, обсуждаются особенности конструкции стенда, приводятся результаты сравнения измеренных и расчетных параметров пучка из электронной пушки.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. А. Никифоров

УДК 621.384.659

Расчет и моделирование замедляющего зазора для ионного ускорителя ТМ-200 Т

А. В. Бердюгина

Новосибирский государственный университет

Во многих установках для работы требуются высококачественные пучки низкоэнергетических ионов. Однако из ионного источника напрямую получить их тяжело. Ионный источник позволяет создать высококачественный пучок ионов достаточно большой энергии: до 40 кэВ и более. Для замедления пучка необходимо разработать систему, которая позволит без потери качества пучка понизить его энергию до 100–1000 эВ. При этом возникают следующие проблемы. Во-первых, при торможении увеличивается поперечный фазовый объем пучка. Во-вторых, при движении пучка вдали от оси симметрии системы он получает большое отклонение вследствие действия больших поперечных электрических полей.

В процессе выполнения данной работы было выполнено моделирование динамики пучка ионов бора в зазоре и после вылета из него в зависимости от формы электродов, распределения потенциалов, а также начальной и конечной энергии частиц. К качеству пучка были наложены следующие требования. Ток пучка должен быть 50 мкА. На выходе из системы разброс плотности тока пучка не должен превышать 1 %. После прохождения тормозящей системы пучок должен сохранять максимально возможную параллельность траекторий ионов.

Выбрана и проанализирована конфигурация электродов, их количество и потенциалы на каждом в замедляющей системе. Моделирование динамики пучка в системе замедления, проверка высоковольтных зазоров на электрическую прочность проводились в программных комплексах SAM и CST.

Научный руководитель — Т. А. Девятайкина

УДК 535.4

Применение камеры Наногейт-38 для диагностики пучка в коллайдере ВЭПП-2000

В. Е. Бояркина

Новосибирский государственный университет

В современных источниках СИ поперечные размеры пучка электронов столь малы, что не могут быть измерены с помощью обычной проекционной оптики в оптическом диапазоне длин волн. Тем не менее эти средства наблюдения за пучком не потеряли своей актуальности и по-прежнему позволяют качественно отслеживать динамику пучка в ускорителе и проводить исследования по физике ускорителей. В мире все еще действует достаточно много ускорителей электронов и позитронов, на которых дифракционный предел, ограничивающий возможности использования проекционной оптики, не достигается. Данное утверждение относится как к стандартным режимам работы бустера ВЭПП-2000 БЭП, так и ко всем работающим сегодня в России циклическим ускорителям электронов (КИСИ, ВЭПП-3, ВЭПП-4М).

Одним из крупнейших научных проектов, осуществляемых сегодня в России, является строительство источника синхротронного излучения поколения 4+ СКИФ [1]. В бустере и главном накопителе СКИФ регистрация поперечного профиля пучка с помощью проекционной оптики может быть полезна при настройке инжекции, когда пучок совершает колебания с большой амплитудой относительно равновесной орбиты и важна качественная информация о движении пучка.

Импульсные (затворные) электронно-оптические камеры (ЭОК) нового поколения «Наногейт-38» выпускаются научно-производственным предприятием НПП НАНОСКАН. Их основное назначение — детальное, прецизионное исследование пространственно-временных и энергетических характеристик быстропротекающих процессов в нано- и микросекундной области времени. ЭОК обладает возможностью регистрировать изображение с длительностью экспозиции от 60 нс до 1 200 мкс, в котором присутствуют области с предельно малыми уровнями энергетической экспозиции и с уровнями, в тысячу раз большими.

Камера использовалась в экспериментах по физике ускорителей для исследования динамики электронного пучка на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 [2], а также для измерений его поперечных размеров и эмиттанса.

1. Bogomyagkov A. Status of the Novosibirsk fourth-generation light source SKIF // Proc. XXVII Russ. Particle Accelerators Conf., JACoW. 2021.
2. Shatunov P., Belikov O., Berkaev D. et al. High luminosity at VEPP-2000 collider with new injector // Proc. IPAC. Copenhagen, 2017. P. 2989–2991.

Научный руководитель — канд. техн. наук В. Л. Дорохов

УДК 53.07+004.3

Источники питания быстрых корректоров СКИФ

М.С. Дмитриев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

На накопителе СКИФ планируется применение системы быстрой обратной связи (FOFB) для стабилизации орбиты пучка. Эта система служит для активного подавления отклонений орбиты пучка, вызываемых механическими вибрациями установки, пульсациями выходного тока источников питания магнитов и другими внешними воздействиями в полосе частот до 1 кГц. Такие отклонения орбиты могут приводить к изменению поперечных размеров пучка и снижению яркости синхротронного излучения. Функционирование системы быстрой обратной связи важно для получения проектных параметров эмиттанта $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$.

Система FOFB воздействует на пучок посредством двухкоординатных дипольных корректоров. Цель данной работы — разработка, отладка и производство источников питания этих корректоров. Характеристики, закладываемые при разработке источника: выходной ток $\pm 3 \text{ А}$, максимальное выходное напряжение $\pm 60 \text{ В}$, динамическая ошибка выходного тока 10^{-3} , статическая ошибка выходного тока 10^{-4} . В ходе работы был разработан импульсный источник тока с топологией «полный мост» (*full-bridge*). Источник представляет собой специализированный УНЧ, работающий в классе D. Эта топология позволяет достичь высокого (больше 95 %) КПД и тем самым превосходит линейные схемы. Функцию управления и авторегулирования в разработанном устройстве осуществляет современный микроконтроллер серии STM32G4, который обрабатывает сигналы обратной связи и задания выходного тока, генерирует сигналы управления силовым каскадом. Разработанный источник удовлетворяет всем техническим требованиям для работы в составе системы FOFB. Дополнительно в ходе работы был создан прототип линейного источника и проведено сравнение его характеристик с импульсным устройством. Итогом работы стал запуск производства серии (96 шт.) разработанных импульсных источников питания корректоров.

Научные руководители — канд. техн. наук О. В. Беликов, А. А. Крылов

УДК 621.384.66

**Модернизация блока питания развертки промышленного ускорителя
типа импульсных линейных ускорителей**

А. А. Евдокимов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

С 1970-х гг. в ИЯФ СО РАН разрабатываются и производятся промышленные импульсные линейные ускорители, используемые для холодной пастеризации пищевой продукции, полимеризации, деполимеризации и других целей. Ускорители через систему выпуска сканируют пучком рабочую зону горизонтальной разверткой по типовой ширине облучаемой продукции около 70 см. Система развертки включает магнит развертки с соответствующим источником питания. Магнит развертки должен равномерно поворачивать пучок от $+50^\circ$ до -50° за характерное время и также обеспечивать линейно меняющееся магнитное поле с нелинейностью не более 5 % для качественного облучения выходной продукции.

В связи с развитием полупроводниковой промышленности появился запрос на модернизацию питания магнита развертки с целью упрощения и удешевления конструкции источника, облегчения калибровки ускорителя, увеличения КПД. Задача разработки усложнена тем, что магнит развертки находится на горловине, внутри которой проходит пучок. Горловина состоит из нержавеющей стали и создает паразитные магнитные поля, которые нарушают линейность магнитного поля.

Данная работа посвящена модернизации питания магнита развертки и включает новую схему питания магнита, аналитические выражения для зависимостей тока источника и магнитного поля от времени, экспериментальную установку, подтверждающую расчеты.

Научный руководитель — Ш.Р. Сингатулин

Полевая эмиссионная ячейка с концентрическим катодом

А. И. Ковалец

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Одной из актуальных задач современной наноэлектроники является разработка наноразмерных автоэмиссионных катодов. Анализ современного состояния исследований в области автоэлектронной эмиссии показал, что полевая электронная эмиссия является наиболее экономичным видом эмиссии свободных электронов, позволяющим создавать новые поколения эффективных электронных устройств. Перспективность автоэмиссионных структур также связана со следующими свойствами: отсутствием нити накала, высокой плотностью тока, устойчивостью к колебаниям температуры, экспоненциально высокой крутизной вольт-амперных характеристик и низкой чувствительностью к внешнему воздействию.

Однако на данный момент требуется решать проблемы неравномерности распределения напряженности поля, оптимизации геометрических параметров, долговечности, а также проблемы подбора эмиссионных материалов катода.

Среди множества различных материалов и покрытий, используемых в автоэмиссионных ячейках, перспективными являются углеродные наноматериалы, такие как графен. Графен — это материал нового поколения, обладающий высокой плотностью тока, химической инертностью, высокой теплопроводностью, он обладает супергидрофобностью в нанометровом масштабе. Карбид кремния, в свою очередь, является отличной основой для синтеза графена и к тому же обладает отличной теплопроводностью, прочностью и температурной стойкостью.

Достичь равномерного распределения напряженности электрического поля позволило физико-математическое моделирование матричной автоэмиссионной ячейки с лезвийным концентрическим катодом. Катод модели выполнен в виде концентрических лезвий с углом раствора 95° и закруглением в 50 нм. Однако основной вклад в распределение поля в катод-анодном зазоре ячейки с бесконечным анодом вносит относительная высота лезвийных окружностей. Максимальной равномерности электрического поля удалось добиться при следующем соотношении высот лезвий: $0,9954 : 1 : 1 : 1 : 0,9986$, высота центральных лезвий при этом составила 500 нм. Неравномерность поля — менее 0,15 %.

Таким образом, разработан автоэмиссионный катод с увеличенным временем жизни и сниженным энергопотреблением благодаря подобранным материалам и геометрии. Устройство послужит основой для создания устойчивых, обладающих высокой плотностью токов автоэмиссионных диодов и триодов, применимых в электронике нового поколения.

Научный руководитель — И. В. Ковалец

УДК 621.317.757

Разработка модифицированного прибора контроля и регистрации помех

З.Д. Корнев

Новосибирский государственный университет

Для постоянного сигнала помехами называют любые отклонения от среднего значения. В ходе работы электрических приборов их функциональность может ухудшаться при наличии в цепях питания помех, вплоть до полного отказа при превышении некоторого допустимого порогового значения.

Для обеспечения постоянного контроля качества бортового электропитания космического аппарата в процессе его отработки и в ходе проведения электрических испытаний отделом аэрокосмических исследований НГУ было разработано контрольное оборудование — ПКРП (прибор контроля и регистрации помех). На текущий момент ПКРП позволяет измерять напряжение от -200 до $+200$ В с погрешностью $0,1$ В и полосой пропускания до 10 МГц.

ПКРП применяется для измерения помех в цепях питания и других низкочастотных линиях при наземных испытаниях. Для контроля помеховой обстановки на борту космического аппарата используется схожий прибор — МПП (монитор питания и помех). Для упрощения детального анализа помех при передаче со спутника на землю и для сопоставления измеренных значений необходима унификация приборов ПКРП и МПП.

В ходе развития электроники для повышения производительности рабочая частота интегральных схем увеличивается, что влияет на выбор компонент при разработке новых спутников. Переключающиеся сигналы генерируют собственные помехи, появляется необходимость проверять, допустимо ли их присутствие для других приборов и не ухудшают ли они требуемые характеристики прибора. В ходе длительного пребывания в космосе из-за деградации материалов и компонентов оборудования под действием факторов космического пространства ухудшается помехоустойчивость, что увеличивает восприимчивость к помехам.

Наземные испытания космических аппаратов могут иметь продолжительность до нескольких месяцев, чтобы оценить среди прочего влияние помех в шине питания на работоспособность. Для получения полной картины наблюдаемых помех недостаточно следить только за профилем напряжения, дополнительно нужно иметь возможность получать профиль тока.

В ходе данной работы была произведена модификация ПКРП, включающая создание плат для модулей измерения тока и напряжения, с более широкой полосой пропускания 20 МГц. Модули измерения тока предусматривают возможность измерений от -75 до $+75$ А.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Н. Горев

УДК 533.922

Методика двухэтапного моделирования для решения задач кильватерного ускорения

Д. Д. Кутергин

Новосибирский государственный университет

Лазер-плазменные методы ускорения в последнее время привлекают к себе все больше внимания благодаря перспективам создания компактных высокоградиентных ускорителей. Энергия ускоренных электронов уже достигла 10 ГэВ при длине ускорения 10 см. Использование преимуществ проектируемой российской установки XCELS (*eXawatt Center for Extreme Light Studies*) позволит получить еще большую энергию. Отсутствие строгости в определении будущих параметров, а также их обилие существенно затрудняет прямой поиск предельных возможностей установки. Методика двухэтапного моделирования сокращает число параметров на каждом из этапов и эффективно решает поставленную задачу.

Моделирование производится с помощью программного комплекса LCODE, разработанного в ИЯФ СО РАН. Расчет одного варианта занимает около 1000 ч процессорного времени. Разбить моделирование на два этапа позволяет квазистатическое приближение, заложенное в основе LCODE.

В основном (тяжелом) расчете моделируется только лазер-плазменное взаимодействие, без учета электронного пучка. Варьируется радиус, длительность лазерного импульса и параметры плазменного канала. Поскольку начальную энергию электронов считаем достаточно большой, пренебрегаем их смещением относительно окна моделирования, движущегося со скоростью света. Набранную в зависимости от продольной координаты в окне энергию оцениваем интегральной суммой продольного поля на оси. Она определяет оптимальность выбранных параметров и предполагаемое расположение витнесса.

Состояния плазмы, сохраняемые с некоторой периодичностью непосредственно перед местом предполагаемого расположения витнесса, позволяют провести дополнительные (легкие) расчеты. В них моделируется взаимодействие только электронного пучка и кильватерной волны. Серия легких расчетов позволяет учесть влияние пучка на ускоряющие его поля и оптимизировать его параметры.

Несмотря на то что интерес к плазменным методам ускорения возник благодаря высоким градиентам полей (рекорд 200 ГВ/м), в работе показано, что использование меньшего градиента при увеличении длины ускорения позволит получать большую итоговую энергию электронов. Кроме того, эффективное моделирование позволило хорошо согласовать пучок с волной и найти область параметров, в которой его энергоразброс составил менее 1 %.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. К. В. Лотов

УДК 533.922

Устойчивое моделирование захвата плазменных электронов кильватерной волной в квазистатическом коде

И. К. Лотов

Новосибирский государственный университет

В последнее время все больше исследований посвящено уменьшению размеров ускорителей заряженных частиц. Плазменное кильватерное ускорение — удачный для этого метод, при котором электроны ускоряются в полях, достигающих сотен гигаВольт на метр. Особенно интересным представляется режим ускорения, для которого не требуется отдельного инжектора ускоряемых частиц. В этом случае ускоряемый пучок формируется из захваченных волной плазменных электронов. Захват происходит в сильно нелинейном режиме взаимодействия, для исследования которого использует численное моделирование. Современные задачи требуют значительных вычислительных мощностей, поэтому важно развивать эффективно их использующие коды, такие как LCODE, разрабатываемый в ИЯФ СО РАН. Он использует квазистатическое приближение, дающее выигрыш в быстродействии вплоть до 6 порядков в сравнении с моделированием из первых принципов. Однако пока что квазистатические коды при исследовании захвата плазменных электронов показывали только качественное согласие с кодами без дополнительных приближений.

В квазистатическом приближении частицы плазмы и пучка описываются разными физическими моделями. При захвате плазменной частицы ее необходимо начать рассматривать как частицу пучка. Сложность заключается в том, что если при захвате напрямую подменить плазменную частицу на пучковую, то развиваются сильнейшие шумы, из-за которых дальнейшее моделирование становится абсолютно неправильным.

Развитие численной неустойчивости удалось побороть следующим образом. Теперь шаг моделирования, на котором происходит захват плазменных частиц, вычисляется несколько раз, причем быстрые частицы плазмы заменяются частицами пучка. В этот момент согласованно изменяются токи системы, чтобы не возникало скачка производной в уравнениях на электромагнитные поля. В итоге впервые в мире получилось достичь количественного совпадения тока захваченного пучка с результатами расчетов без квазистатического приближения. Это доказывает возможность использования таких кодов для исследования захвата плазменных электронов кильватерной волной.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. В. Туев

УДК 681.2:531.7

Модернизация и экспериментальная отработка аппаратуры контроля вибрационного воздействия

А. И. Митянин

Новосибирский государственный университет

В процессе эксплуатации космического аппарата (КА) возникает потребность получения информации о его состоянии. Одним из важных параметров мониторинга являются данные о внешних механических воздействиях на конструкции корпуса КА.

Цель работы — модернизация и экспериментальная отработка бортовой аппаратуры контроля вибрации.

Данное изделие предназначено для регистрации вибрационных и ударных ускорений в диапазоне от 0,1 до 5000 г в полосе частот от 10 до 10 000 Гц. Конструктивно аппаратура состоит из блока электроники и датчиков вибрации (ДВ).

С целью дальнейшего применения аппаратуры на большинстве российских КА была проведена модернизация его составных частей. Так, блок электроники получил модульный конструктив, позволяющий масштабировать прибор в зависимости от необходимого количества подключаемых датчиков вибрации. Проведена унификация модулей коммутации первичного бортового питания и модуля распределения питания на ДВ. В части модернизации ДВ улучшено отношение сигнал/шум регистрируемого сигнала.

В рамках данной работы были проведены натурные механические испытания ДВ на вибрационном и ударном стендах с целью их калибровки и проверки чувствительности. Разработано программное обеспечение для визуализации регистрируемых данных.

Научный руководитель — А. В. Пелемешко

УДК 535-34

Оптимизированное устройство генерации излучения для наноскопии в «окне прозрачности воды»

А. В. Мурзина

Новосибирский государственный университет
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Одним из актуальных направлений современной биологии является изучение динамики молекулярных и клеточных процессов *in vivo* с нанометровым пространственным разрешением и миллисекундным временным разрешением. Для решения этой задачи могут быть применены методы наноскопии, основанные на использовании мягкого рентгеновского излучения, в диапазоне энергий «окна прозрачности воды» (с длинами волн 2,3–4,3 нм и энергиями от 280 до 540 эВ от К-края поглощения углерода до К-края поглощения кислорода) [1]. В этом диапазоне энергий белковые соединения поглощают излучение приблизительно на порядок сильнее, чем вода, что позволяет получать достаточный контраст при исследовании объектов, находящихся в естественной среде, как зондовым, так и широкопольным методами на поглощение. Основным преимуществом является отсутствие необходимости предварительной обработки живой клетки, например: внедрением флуоресцентных меток, окрашиванием тяжелыми металлами или нарезкой, т. е. возможно проведение максимально неинвазивных исследований.

Генератором рентгеновского излучения в данном диапазоне может являться ондулятор, располагаемый в прямолинейном промежутке кольцевого накопителя энергии. Новейшие источники синхротронного излучения четвертого поколения, основанные на кольцевых накопителях, такие как MAX-IV в Швеции и ЦКП «СКИФ» в России, обладают ультранизким эмиттансом (~100 пм·рад [2, 3]), следствием чего является малый размер источника и высокая степень когерентности излучения.

Цель данной работы — рассмотрение вариантов ондуляторов для экспериментальной станции второй очереди «Наноскоп» [1] на ЦКП «СКИФ» и станции SoftiMax на MAX-IV, оптимизация их и расчет параметров генерируемого синхротронного излучения с учетом когерентных свойств. В рамках данной работы проведено количественное сравнение ондуляторов типа APPLE-II, Delta, а также сверхпроводящего ондулятора в режимах круговой и линейной поляризации по следующим параметрам: угловой расходимости, спектральным характеристикам и доле когерентных фотонов. Найдены оптимальные длины периодов вставных устройств для максимизации интенсивности излучения, генерируемого в «окне прозрачности воды». Рассчитаны мощностные характеристики и оценено влияние когерентных свойств генерируемого излучения.

1. Chkhalo N. I. et al. X-ray Optical Scheme for Station “Nanoscope” for Biological Research in the Water Window // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2299. 060005.

2. Pedro F. Tavares et al. The MAX IV storage ring project // J. Synchrotron Radiat. 2014.

3. Левичев Е. Б. и др. Проект создания синхротронного источника поколения 4+ ЦКП «СКИФ» в р. п. Кольцово Новосибирской области: общая информация и статус реализации // Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ». 2022. Т. 1.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Ракшун

УДК 621.384.6

Разработка модуля обратной связи для бустера НИКА

А. Р. Непеин

ООО «Бюро Ф», Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований (научноград Дубна) создается ускорительный комплекс НИКА, в состав которого входит 3 кольцевых ускорителя: бустер, нуклотрон и коллайдер. В работе представлен модуль обратной связи для бустера, частота ВЧ в котором изменяется в диапазоне от 500 кГц до 5 МГц. Задача модуля — подавление синхротронных колебаний в области частот 500–1500 Гц, которое достигается путем подстройки задающей частоты в зависимости от измерений положения пучка в месте с максимальной дисперсией.

Данные с пикапов проходят через синхронный детектор и оцифровываются на частоте 10 кГц. Затем при помощи разностных уравнений рассчитывается воздействие и передается в модуль, генерирующий задающую частоту. Предусмотрено внесение поправок по результатам предыдущих циклов (*Feed-forward*). Кроме того, реализована работа с оптической сетью MRF для синхронизации с ВЧ-системой и компенсации задержки оптической сети, передачи поправки и работы по сценариям управляемых событий. Управление осуществляется с ПК через PCI express и UART.

В ходе работы было разработано встраиваемое ПО для блока обратной связи на основе SoC Zynq Z-7015, реализующее вышеописанный функционал и возможность удаленного обновления, а также инженерное ПО для ПК, проведена симуляция работы обратной связи.

Симуляция показала подавление синхротронных колебаний обратной связью, планируется проверка модуля обратной связи в сеансе с пучком. После введения в эксплуатацию бустера в дальнейшем планируется разработка модулей обратной связи для нуклотрона и коллайдера.

Научный руководитель — канд. техн. наук Г. А. Фаткин

УДК 621.3.07

Статус-монитор VME-крейтов локальных контроллеров больших ускорительных комплексов

И. С. Петров

Институт ядерной физики им Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Современные физические эксперименты и исследования в большинстве своем проводятся при помощи дорогостоящих и сложных установок. Подобные установки могут достигать размеров до нескольких сотен метров в длину, в связи с чем возникает необходимость в удаленном мониторинге различных параметров контроллеров управления, выполненных в виде магистрально-модульной системы для обеспечения корректного функционирования установки.

С этой целью было разработано устройство «статус-монитор». Основные его задачи заключаются в мониторинге питания контроллеров в диапазоне $\pm 3\%$, удаленном включении и выключении источника питания, измерении температуры внутри крейтов с двух термодатчиков на контроллере и источнике питания и отключении питания при превышении температуры, измерении давления элегаза с ускоряющих модулей.

В ходе работы был выбран удобный двухплатный модульный форм-фактор 3U для быстрого доступа к платам, разработана схемотехника и выполнена разводка печатных плат. Для готового распаянного устройства была написана прошивка для микроконтроллера и программируемой логической схемы.

Научные руководители — канд. техн. наук С. В. Тарарышкин, Е. В. Быков

УДК 621.384.6

Исследование динамической апертуры в бустерном синхротроне с электронным охлаждением

Д. М. Попов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В настоящее время ионные ускорительные комплексы низкой и средней энергии с электронным охлаждением получили широкое распространение и используются в научных и прикладных целях [1].

В ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН разрабатывается ионный ускорительный комплекс для технологических целей. Комплекс состоит из двух линейных ускорителей, бустерного синхротрона с электронным охлаждением и основного синхротрона. Установка разработана для генерации интенсивных ионных пучков в широком диапазоне: от протонов до ионов висмута.

Основными особенностями динамики пучка в бустерном синхротроне являются: связь поперечных бетатронных колебаний, пространственный заряд, а также движение частиц в нелинейных магнитных полях. Основными источниками нелинейных магнитных полей являются: хроматические секступольные магниты, нелинейные краевые поля основных магнитных элементов, а также вихревые токи в стенках вакуумной камеры дипольных магнитов.

Нелинейные магнитные поля описываются нелинейным потенциалом в гамильтониане частицы. Наличие нелинейного потенциала приводит к ограничению области устойчивого движения частицы. В связи с чем возникает задача исследования влияния резонансов на динамику пучка и оптимизации рабочей точки. Влияние резонансов наиболее существенно на энергии инжекции, а также при медленном резонансном выпуске с ВЧ-раскачкой.

С учетом вышеперечисленных факторов выбраны рабочие точки для инжекции и ускорения ($\nu_x = 3,2$; $\nu_y = 3,195$), а также для медленного выпуска ($\nu_x = 3,1833$; $\nu_y = 3,115$) и построены динамические апертуры в этих точках. Расчет проводился с учетом нелинейностей краевых полей основных магнитных элементов, а также с учетом нелинейностей магнитных полей вихревых токов, индуцируемых в стенках вакуумной камеры при ускорении.

1. Parkhomchuk V. V., Yang X. D., H. W. Zhao et al. HIRFL-CSR electron cooling devices // Proc. Int. Workshop Beam Cooling Related Topic. 2004. P. 144–149.

Научный руководитель — В. А. Востриков

УДК 621.384.6

Измерение продольного профиля пучка на второй очереди Новосибирского ЛСЭ

С.В. Рева

Новосибирский государственный университет

В ИЯФ СО РАН действует мощный источник узкополосного терагерцевого и инфракрасного излучения — Новосибирский лазер на свободных электронах (НовоЛСЭ) [1]. Его излучение используется для исследований в разных отраслях науки, таких как материаловедение, биология, молекулярная спектроскопия, фотоника и многих других. Для соответствия запросам, предъявляемым к характеристикам излучения в рамках данных исследований, систематически проводятся исследования режимов генерации излучения с целью получения наиболее оптимальных его параметров для тех или иных задач.

Данная работа описывает создание диагностической системы по измерению продольного профиля пучка на третьей дорожке НовоЛСЭ. Ранее такой диагностики на установке не было. Важность данной диагностики заключается в том, что продольный профиль пучка во многом определяет продолжительность импульса излучения. Методика измерения продольного профиля пучка опирается на измерение длительности черенковского излучения, генерируемого пучком, при прохождении пластины из кварца, производимое с помощью стрик-камеры.

1. Vinokurov N.A., Shevchenko O.A. Free electron lasers and their development at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS // Phys. Usp. 2018. Vol. 61 (5). P. 435–448.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О.И. Мешков

УДК 681.513.1+621.3.076.7

Разработка и управление обратимым трехфазным выпрямителем с обратной связью

Д. Н. Руднев

Новосибирский государственный университет

Развитие элементной базы силовой электроники, а также микроконтроллеров и DSP, позволяющих реализовывать алгоритмы управления силовыми преобразователями в реальном масштабе времени, дают возможность получить новые качества для систем преобразования энергии. Так, вместо классического трехфазного управляемого выпрямления, широко используемого в схемах силовой электроники для питания нагрузки постоянного напряжения, например в системах зарядного устройства в автомобилестроении и аэрокосмической промышленности, возможно создание управляемых обратимых систем с качественной стабилизацией выходных параметров, малым коэффициентом гармоник в токе и возможностью рекуперации энергии в питающую сеть.

В работе представлен прототип обратимой трехфазной системы питания, основанной на высокоскоростных IGBT-транзисторах, управляемых микроконтроллером Piccolo серии 2000 TI. Выходное напряжение поддерживается с точностью 0,1 % ($\Delta V/V$). В алгоритме управления реализована следящая ФАПЧ, позволяющая отслеживать входную фазу сети с обеспечением высокого уровня помехоустойчивости. На аппаратном уровне ФАПЧ реализован на системе оптопар, сигнал с которых поступает на аналоговые измерительные выходы микроконтроллера. В целях отладки алгоритмов было разработано программное обеспечение для визуализации спектров сигналов, формирующихся на всех этапах ФАПЧ. Функция регулировки уровня выходного напряжения обеспечивается путем формирования дополнительного ШИМ-сигнала, наполняющего исходный управляющий сигнал транзисторов-переключателей, с его последующим интегрированием на емкостной нагрузке. Гармоники, возникающие вследствие использования высокочастотного сигнала, подавляются с помощью п-образного фильтра на входе системы.

Научный руководитель — канд. техн. наук Д. В. Сеньков

УДК 629.78

Расчет надежности функционирования бортовых систем МКА «Норби» на солнечно-синхронной орбите с учетом теплового режима

Г. Д. Самуйленкова

Новосибирский государственный университет

Модульная спутниковая платформа форм-фактора CubeSat разработана отделом аэрокосмических исследований Новосибирского государственного университета совместно с опытно-конструкторским бюро «Пятое поколение» в рамках Федеральной целевой программы Министерства образования и науки РФ.

МКА «Норби» CubeSat 6U был запущен 28.09.2020 г. с космодрома Плесецк на ракете-носителе «Союз-2.1б». На данный момент МКА «Норби» находится на орбите более 3,5 лет и, с небольшим исключением, функционирует в полном объеме. Схемотехнические решения, примененные на МКА «Норби», начинают заимствоваться при разработке других космических аппаратов. Поэтому возникла необходимость провести анализ надежности бортовых подсистем и платформы МКА «Норби» в целом.

Расчет надежности, наряду с тепловым, механическим, радиационным и ЭМС-расчетом, является важной частью анализа и прогнозирования надежности и стойкости электронной аппаратуры и позволяет судить о надежности ЭРИ, отдельных подсистем и системы в целом.

При расчете были получены значения ВБР, позволяющие рассчитывать суммарную интенсивность отказов модулей без резервирования согласно «Автоматизированной системе расчета надежности», разработанной на базе справочника «Надежность электрорадиоизделий» [1]. Все комплектующие ЭРИ к началу эксплуатации проходят дополнительные испытания. В соответствии с этим при расчете ВБР комплектующих ЭРИ введены поправочные коэффициенты.

В состав МКА «Норби» входят следующие модули: бортовой радиокомплекс, модуль сопряжения, система ориентации и позиционирования (СОП), датчик Солнца и горизонта (ДСГ), система электроснабжения (СЭС), модуль аккумуляторных батарей, солнечная батарея. СЭС состоит из трех блоков, объединенных между собой: блока контроля и управления, блока генерации электроэнергии и блока преобразования электроэнергии.

Все модули платформы МКА «Норби» имеют резервирование, часть модулей работают в режиме горячего резервирования, а для модулей СОП и ДСГ предусмотрено общее ненагруженное резервирование, что было также учтено при расчете.

Полученный в результате расчета ВБР для МКА «Норби» в целом с учетом значений ВБР составных частей и в соответствии со структурной схемой надежности при эксплуатации в течение 5 лет составляет 0,992.

1. Надежность ЭРИ ИП: справочник. М.: МО РФ, 2006.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Н. Горев

УДК 621.372.88

Измерения и моделирование элементов СВЧ-тракта линейного ускорителя инжектора СКИФ

К. И. Смирнов

Новосибирский государственный технический университет
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В текущий момент в разработке находится проект «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ) [1]. СКИФ состоит из основного кольца, кольца накопителя и инжектора, в роли которого выступает линейный ускоритель, рассчитанный на энергию в 200 МэВ [2]. Линейный ускоритель проекта СКИФ состоит из пяти секций регулярных ускоряющих структур, предускорителя-группирователя, источника электронов, магнитной системы, а также волноводного СВЧ-тракта, необходимого для доставки СВЧ-мощности от трех клистронов (50 МВт каждый) до ускоряющих структур.

На данном этапе в ИЯФ СО РАН собрана и тестируется первая часть линейного ускорителя, состоящего из предускорителя, первой секции ускоряющей структуры и волноводного СВЧ-тракта. Параллельно работе линейного ускорителя по получению пучка проводилась настройка и оптимизация параметров элементов волноводного СВЧ-тракта, помимо этого было проведено моделирование работы элементов тракта в нескольких режимах работы.

В данной работе представлены результаты моделирования и измерения элементов волноводного СВЧ-тракта от первого клистронов до предускорителя и первой секции регулярной ускоряющей структуры.

1. Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I. et al. Lattice optimization of a four-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk // *Phys. Rev. Accelerator Beam*. 2021. Vol. 24.
2. Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A. et al. Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // *J. Instrum.* 2022. Vol. 17, No. 2.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. А. Е. Левичев

УДК 621.384.66

Система регистрации потерь пучка Новосибирского лазера на свободных электронах

И. А. Терентьев

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) — установка, разработанная ИЯФ СО РАН совместно с ИХКиГ СО РАН [1], которая используется учеными для проведения исследований с применением терагерцевого и инфракрасного излучения. Для обеспечения стабильного режима работы установки требуется минимизировать потери пучка электронов, которые при взаимодействиях со стенками вакуумной камеры создают сильный радиационный фон в зале ускорителя.

Проблема потери частиц касается не только ЛСЭ, но и других ускорителей. Решение проблемы заключается в настройке положения пучка при помощи корректирующих магнитов. При этом оператору установки необходима информация об уровне потерь пучка при его движении по орбите. Можно предположить, где находятся участки максимальных потерь частиц и расположить на них датчики потерь.

С этой целью на поворотных магнитах ЛСЭ закреплено кварцевое оптоволокно [2], в котором вторичные электроны, образующиеся в результате потерь частиц пучка на стенках вакуумной камеры, вызывают черенковское излучение, регистрируемое фотоумножителем. Сигнал с фотоэлектронного умножителя регистрируется аналого-цифровым преобразователем (АЦП), подключенным к ЭВМ. Данные, пришедшие с АЦП, обрабатывает программа, написанная на языке СИ++, демонстрирующая на мониторе оператора графику, исходя из которой он производит настройку магнитной структуры ускорителя.

В докладе обобщен опыт работы с системой регистрации потерь пучка при ее использовании для настройки режимов работы ЛСЭ.

1. Новосибирский ЛСЭ. URL: <https://inp.nsk.su/nauka/issledovatel'skaya-infrastruktura/tsentry-kollektivnogo-polzovaniya/tsentr-sinkhrotronnogo-i-teragertsovogo-izlucheniya/207-unu/novosibirskij-lse/1462-novosibirskij-lse> (дата обращения: 12.02.2024).

2. Мальцева Ю.И. Beam Loss Monitor System based on the Cherenkov effect for the Novosibirsk FEL Facility // Конф. RuPAC2023. Новосибирск, 2023.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О.И. Мешков

УДК 537.5

Исследование медленного выпуска пучка на основе бетатронного сердечника из ионного синхротрона

В. С. Турло

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается ионный синхротрон для широкого спектра технологических применений. В данном синхротроне реализован медленный выпуск на резонансе третьего порядка. Такой метод позволяет обеспечить выпуск пучка малыми контролируруемыми порциями в течение длительного времени, вплоть до нескольких секунд.

Для реализации медленного выпуска на некотором азимуте ускорителя создается секступольное возмущение. Такое возмущение приводит к появлению области неустойчивого движения вблизи резонанса третьего порядка [1]. При попадании частицы в область неустойчивого движения амплитуда колебаний начинает неограниченно нарастать, что приводит к постепенному вылету частицы из ускорителя.

В процессе выпуска необходимо достаточно точно контролировать полученную объектом дозу облучения. Это налагает высокие требования к однородности тока выпускаемого пучка.

В работе проведено моделирование интенсивности выпуска пучка во времени двумя способами: аналитически и при помощи трекинга частиц. Получена зависимость тока в электромагните бетатронного сердечника от времени, которая обеспечивает максимальную однородность тока выпуска пучка. Кроме того, в ходе работы были сформулированы технические требования к источнику тока для бетатронного сердечника, который обеспечивает полученную зависимость.

1. "Proton-ion medical machine study" Accelerator Complex Study Group supported by the Med-AUSTRON, onkologie-2000 and the TERA foundation and hosted by CERN.

Научный руководитель — М. Ф. Блинов

УДК 621.384.6

Определение связи с помощью пооборотных измерений положений пучка

Н. А. Чепурной

Новосибирский государственный университет

Современные источники синхротронного излучения должны производить излучение требуемой яркости. Однако неточная выставка магнитов, ошибки в величине питающих магниты токов ведут к искажению оптической структуры и значительному снижению яркости. Одним из наиболее быстрых и точных методов диагностики магнитной структуры является диагностика, основанная на анализе резонансных членов (*resonance driving terms* или RDT), полученных из измеренных пооборотных положений пучка. С помощью анализа RDT можно определить расстояние до рабочего или нежелательных резонансов, определить местоположения и силу азимутальных возмущений магнитного поля внутри ускорителя. В то время как для диполей и квадрупольных существуют другие основанные на измеренных параметрах пучка методы определения ошибок в силе магнитов (измерения орбиты и оптических функций), для скью-квадрупольных и мультиполей современные методы диагностики либо занимают много времени, либо ограничены измерением только глобальных величин (таких как зависящая от амплитуды колебаний расстройка частот, нелинейный хроматизм и др.). Поэтому возникает необходимость в методе, позволяющем в режиме реального времени настроить силу и полярность корректирующих магнитов за несколько сотен оборотов пучка в ускорителе. Кроме того, неточности выставки параметров магнитной структуры могут вызвать связь горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний, что влечет за собой изменение поперечных размеров пучка и яркости синхротронного излучения.

На коллайдере ВЭПП-4М были измерены координаты пучка после одиночного удара в течение 8000 оборотов. Анализ фурье-спектра собранных данных позволил получить коэффициент связи, отношение поперечных эмиттансов пучка и силу одного из скью-квадрупольных, его положение, а также проверить эффективность компенсации поля соленоида детектора КЕДР.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. В. Богомягков

УДК 621.384.6.01

Когерентные бетатронные колебания при инъекции в накопитель

С. П. Шерстюк

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Важной частью работы ускорительного комплекса ВЭПП-2000 является инъекция частиц из бустера в коллайдер. Однооборотная инъекция часто происходит при малой интенсивности инжектируемого пучка по сравнению с циркулирующим. Возникающие благодаря поперечным импедансам коллективные эффекты могут ограничивать эффективность инъекции.

В работе анализировалось взаимодействие двух групп частиц, одномерных нелинейных осцилляторов. В некоторых случаях результатом такого взаимодействия может стать рост амплитуд колебаний отдельных частиц. Также была рассмотрена связь между взаимным расположением групп частиц, их эволюцией в фазовом пространстве и эволюцией положения центра заряда. Координаты центра заряда можно наблюдать при помощи электростатических датчиков положения пучка. На основе сравнения реальных сигналов с предсказаниями теории сделаны выводы о начальных положениях инжектируемого и циркулирующего пучков.

Полученные результаты позволяют оператору коллайдера лучше контролировать процесс инъекции, что повышает общую эффективность работы комплекса.

Научный руководитель — Е. А. Переведенцев

УДК 53.08

Модернизация блока датчиков давления: датчик Пирани

З.Р. Шигаев

Новосибирский государственный университет

Отдел аэрокосмических исследований НГУ разрабатывает космическую аппаратуру широкого спектра применения. Одним из таких приборов является блок датчиков давления (БДД), поставляемый в составе диагностического комплекса для космических аппаратов серии ГЛОНАСС. БДД состоит из двух типов датчиков: инверсно-магнетронного датчика для измерения высокого вакуума и датчика Пирани для низкого вакуума. Такой набор датчиков позволяет измерять давление в диапазоне от 760 до 10^{-8} торр. В ходе разработки появилась необходимость в замене готового импортного датчика Пирани на датчик собственного производства на базе лампы накаливания СМН 10-50-1.

Цель данной работы — изучить параметры вновь разработанного датчика давления, работающего на принципе Пирани, проанализировать зависимости измеряемых величин от давления при различных режимах работы. Произведен теоретический анализ работы датчика, сняты экспериментальные зависимости показателей датчика от давления в режимах постоянного сопротивления, постоянной разности температур датчика и корпуса, постоянного тока. Проведен анализ чувствительности датчика в различных режимах. На основе полученных данных выбрано решение, максимально использующее измерительный потенциал разработанного вакуумного преобразователя.

Научный руководитель — А.С. Стюф

УДК 621.384.6

Изучение и оптимизация режимов магнитной структуры Новосибирского ЛСЭ

Е. С. Эптешев

Новосибирский государственный университет

Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) — вид лазера, в котором активной средой является поток релятивистских электронов, распространяющийся в знакопеременном периодическом магнитном или электрическом поле. Одним из отличительных свойств ЛСЭ является возможность генерации мощного лазерного излучения с любой длиной волны из допустимого диапазона, а также ее плавная перестройка.

Электронный коэффициент полезного действия (КПД) ЛСЭ порядка 0,1 %. Поэтому в целях повышения эффективности ЛСЭ можно использовать ускоритель-рекуператор (УР). На сегодняшний день Новосибирский ЛСЭ — это единственный работающий комплекс с работающим ЛСЭ на УР. ЛСЭ может работать в трех различных конфигурациях одно-, двух- и четырехдорожечном УР с установленными ЛСЭ.

В 2021 г. на двухоборотном УР был заменен электромагнитный ондулятор на ондулятор с постоянными магнитами и изменяемым периодом, что позволило существенно расширить диапазон генерируемого излучения.

Рекордные значения мощностей излучения, получаемых на ЛСЭ на УР, при невысоком электронном КПД влекут за собой необходимость работы с высоким средним электронным током, что, соответственно, накладывает жесткие условия на уровень потерь электронов. Получение генерации излучения ЛСЭ еще не гарантирует работу установки в стабильном режиме в течение рабочего дня, т. е. с допустимым уровнем потерь электронного пучка.

Одной из важных проблем, появляющихся при использовании установки с рекуперацией энергии, являются потери электронного пучка. Из-за взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной его энергетический разброс увеличивается, усиливаясь при торможении в резонаторах. Вследствие этого влияние дисперсии на размер пучка становится более существенным.

В работе обсуждаются рассчитанные режимы магнитной структуры ЛСЭ и их ограничения и первые эксперименты по настройке. Для моделирования движения электронного пучка использовались математические библиотеки языка программирования Python и программа Elegant.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Гетманов

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Houchun Zhou169	Бочаров Н. М.....195	Дрижак И. В.9
Maksimov M. A.73	Бояркина В. Е.....307	Евдокимов А. А.309
Manuel Alejandro	Брущенко А. И.192	Евсеев И. Д.....177
Quispe Torres19	Бугров Е. Д.228	Егоров Д. А.....83
Paramonova M. A.....74	Булатов А. А.193	Ермак К. Н.....84
Shuklina A. A.255	Булатова У. Д.51	Ерохин А. Д.....10
Абдульменова А. В.188	Бурхинова Н. Ю.194	Ерушин Е. Ю.....24
Абед Н.305	Бутикова Е. А.173	Забанов Ж. Г.7
Акинина М. Д.....170	Буянов Д. А.174	Зайцев К. В.....230
Акрамов И. М.....117	Быстров С. А.....175	Зайцев О. В.....132
Алексеев В. А.....189	Бычкова С. А.22	Захаров Ф. А.....54
Алехин С. А.....118	Вакуленко М. В.196	Захарчук М. М.....55
Алешкова М. А.171	Ван Гуаньлун79	Захожев К. Е.85
Алимов Д. В.224	Ванда В. С.23	Зиренко Т. А.86
Алябьев А. А.190	Васильев М. М.156	Золотарев Н. А.201
Апостол Ю. С.....119	Верчук М. М.....80	Золоторенко Д. А.231
Апрелов Н. А.....20	Витошкин И. Е.197	Зорькина А. И.133
Артишевский К. В.120	Волохов А. Ф.....122, 125	Зотьева А. А.134
Артюшин С. В.....195	Вопиловский А. М.....81	Зубанов К. С.....135
Асылкаев А. М.....277	Ворохов А. В.258	Зубарев И. Б.259
Атамурзаева А. А.....225	Вострикова М. В.24	Ибрагим И. С.178
Атнюкова А. Н.172	Гаврисенко Д. Ю.....52	Иванов А. Д.....202
Афанаскин Д. С.....121	Гамов В. В.53, 58	Иванова А. А.136
Афанасьев М. Д.293	Гареев Т. И.....128	Измайллов Л. Н.....102, 203
Бабич Н. С.38	Гатиятуллина Д. Д.279	Ильенко Н. С.56
Баженов А. О.....75	Гвозденко А. А.195, 196	Исаева Я. Г.....27
Баздырев Н. А.21	Герцель И. С.197	Кабанник И. А.....260
Барладян А. А.256	Голик А. Б.....195, 196	Какаулин С. В.....135
Барнаков А. В.....76	Гончаренко А. М.....176	Канарская М. А.....180
Басова П. С.....122, 125	Гордиенко М. Р.135	Караван А. В.....280
Башегурова Е. А.....77	Грибанов Д. С.....25	Каргина А. М.....137
Бельчиков И. А.....211	Гриценко В. О.82, 100	Касьянов Д. В.....87
Бердюгин А. А.226	Громов И. В.26, 30	Катаманин И. Н.....117
Бердюгина А. В.....306	Гусев К. С.7, 199	Кахидзе Н. И.204
Бетке И. А.....78, 123	Давыдов Д. А.129	Кибирский А. Д.190
Бобков М. Е.191	Дементьев С. А.229	Клименко А.....138
Богомолова А. И.124	Демиденко Н. В.....8	Клименков А. Д.....222
Богомягков Д. А.294	Деревянников И. А.130	Ковалец А. И.310
Бодина В. А.122, 125	Дерибина Е. И.....77	Кожевников А. В.....57
Божайкина Т. Е.....257	Деринг Е. Д.131	Козенко К. В.....28
Борискин А. А.....126	Диаб Х.176	Козлова К. С.....29
Бородулина А. В.227	Дик Д. В.....200	Козьмина П. В.....26, 30
Бороздин П. А.127	Дмитриев М. С.....308	Колбасова О. А.....11
	Долгирев В. О.37	Колесниченко К. С.....53, 58

Колоколов М. И.....	232	Лукин А. А.	208	Пантелеев С. А.....	145, 153
Колпаков М. Е.	12	Лукин С. Э.....	281	Папченко А. В.	35
Кольжецов В. Д.....	261	Лукьянов А. А.	145, 153	Параскун А. Г.	283
Комлина С. В.....	88	Лукьянов Ан. А.	146	Пастушук Г. Г.	268
Конев С. В.	139	Лутченко И. И.	147	Перевалов Т. Д.	102
Коновалова В. Д.....	181	Майдэбура Я. Е.....	92, 209	Пестрецова В. Д.....	154
Константинов В. В.....	182	Майор И. А.....	13	Петренко П. В.	300
Константинов И. С.	205	Макаренко А. Е.	210	Петров И. С.	318
Коржаневский К. И.....	295	Мальцева С. В.	240	Петякин Н. В.	214
Корж В. А.	59	Мальцев Д. А.	241	Пластинина Д. М.	243
Корнев З. Д.	311	Манцурова С. В.	93	Платонов Б. Р.....	215
Корниевский М. А.	296	Манько Е. С.....	94	Подаров Р. А.	244
Короткова Е. В.	210	Марактаев Б. И.....	282	Поздняков Н. А.	269
Косвинцева С. В.....	233	Махмудиан М. М.	95	Пономаренко А. М.....	62
Косовских И. А.	140	Мезенцев С. И.....	142, 148	Попов А. В.....	270
Красильников Д. Н.	141	Мещерякова В. А.	185	Попов Д. М.....	319
Кудрявцев А. Л.....	206	Микаева А. С.....	96	Прилуцкая А. А.....	36
Кузнецов Д. А.....	234	Милюшин Д. М.....	97	Прокопьев М. А.	64
Кузнецов Т. А.	262	Миронов Н. А.....	98	Простодушев А. О.	65
Кузнецова А. К.....	102	Митянин А. И.....	314	Пудова С. С.	245
Кузнецова Л. С.	89	Михайлов А. В.	165	Райзвих А. Е.....	246
Кузьмина К. С.	183	Михайлов А. М.	34	Растрьгин Д. С.	37
Кузьмин Н. С.....	90	Михеев С. С.....	99	Рахронов У. Х.	103
Кульбакин И. С.	210	Морозова Ф. В.....	186	Рева С. В.	320
Купцова А. О.	31	Морозов О. П.	61	Рехман З. А.....	196
Курмачев Д. А.	91	Мосягин Н. С.	241	Розенталь С. Р.....	38
Куршаков В. А.....	60	Мубараков Р. Г.....	204, 211	Романенко В. М.....	66
Кутергин Д. Д.....	312	Мунгалов А. С.....	130	Руднев Д. Н.....	321
Кутузова Н. В.	142, 148	Мурзин А. О.	82, 100	Рябченко Н. А.....	14
Кушнарев Д. А.	297	Мурзина А. В.	315	Саввинов А. Е.	155
Лаврехин Д. В.	207	Нагибин П. С.....	149	Сагайдак А. Е.....	271
Лавронов К. Д.	143	Нарваткина А. К.....	264	Салтыков И. Р.....	284
Лагунов Т. А.....	182	Науменко А. Б.	150	Самохвалов Ф. А.....	156
Лактионова А. В.	235	Непеин А. Р.....	317	Самуйленкова Г. Д.....	322
Лапин Н. С.....	32	Непомнящих В. А.	151	Сарыпов Д. И.	104
Лапшин К. А.....	184	Новиков М. А.	212	Саутнер Д. О.....	272
Ледовский В. Е.....	135	Нуриахметов З. Н.	213	Сафин Р. Р.	247
Леонов Д. А.	236	Нурисламов А. Р.	182	Семухин Р. И.	16
Липская А. С.	243	Овсянник В. В.	299	Сендир Е. А.....	157
Ли Р. В.....	263	Одуд И. М.	241	Симакова С. С.	105
Литвинов И. А.....	237	Олейниченко А. В.....	241	Симонян Г. А.....	273
Литвинова Д. В.	144	Омельченко А. Н.....	242	Синица Н. А.	216
Литвинцева К. А.	238	Ооржак А. А.	265	Синкина И. Л.	204
Литовских Н. Е.	239	Офицеров А. Д.	266	Син Цихуэй.....	39
Логачев В. И.	33	Павленко К. А.	152	Скорюпин А. И.	158
Лотов И. К.	313	Павлов Г. Р.	101	Скрипников Л. В.....	241
Ломачук Ю. В.....	241	Панасенко Л. А.	267	Следнев В. А.	141

Указатель авторов

Смирнов А. А.	222	Фань Ч.	109, 112	Чэнь Дунци	113
Смирнов К. И.	323	Федоров В. В.	303	Шаин А. М.	289
Смирнов Н. И.	156, 159	Федоров М. А.	67	Шарифуллин Б. Р.	160
Снегирев А. В.	106	Федяй В. Е.	44	Шаров Н. С.	68
Собина У. Г.	301	Филиппов А. А.	197	Шахов Н. В.	47
Соловова Н. Ю.	107	Фоменко М. В.	248	Шахова В. М.	241
Сорокин С. В.	274	Фомин А. А.	45	Шерстюк С. П.	327
Спирин С. А.	40	Фролов Д. И.	110	Шигаев З. Р.	328
Стерлягов С. А.	302	Фролов М. Е.	111	Шипеев К. А.	225
Стуколов И. С.	108	Хайновский М. А.	220	Шуляев С. А.	163
Сулиман Г.	41	Хандогин Г. А.	225	Шурупов В. А.	164
Тарасов И. А.	217	Харченко Т. И.	162	Шутов И. В.	284
Терентьев И. А.	324	Хлебановский Н. А.	287	Щербак В. В.	48
Теслина П. П.	42	Цишевская А. А.	187	Эптешев Е. С.	329
Тинтулова М. В.	160	Цыплаков М. М.	288	Юровских Е. А.	165
Ткаченко Д. С.	218	Цю С.	109, 112	Юсупова А. Д.	166
Токарев А. Ю.	62	Чепурной Н. А.	326	Якушевский Э. И.	210
Туманик А. С.	286	Черепанов А. В.	249	Янибеков И. И.	114
Туркия Г. Р.	43, 161	Черепанов А. С.	221	Янчат А. Т.	135
Турло В. С.	325	Черненко Д. В.	222	Яншин А. О.	251
Уракова А. О.	219	Четвериков А. О.	250	Ярцева М. А.	304
Усов Д. А.	142, 148	Чжан Сяосюй.	223	Ярыгова В. М.	69
Уткина Д. Ю.	222	Чирков С. В.	46		

СОДЕРЖАНИЕ

АЭРОФИЗИКА

Гусев К. С., Забанов Ж. Г. Формирование Pd-мембран на подложках Al_2O_3 , полученных из прекерамической бумаги методом ИПС	7
Демиденко Н. В. Течение в пограничном слое с двумя областями неустойчивости.....	8
Дрижак И. В. Исследование движения дугового разряда в самосогласованном магнитном поле	9
Ерохин А. Д. Модель гемодинамики автономного комплекса «сердце + легкие»	10
Колбасова О. А. Изучение аэротермоакустического эффекта в резонирующей полости для биканальной системы Гартманского типа	11
Колпаков М. Е. Разработка сильноточного низкоэрозионного термохимического катода	12
Майор И. А. Исследование водородно-гелиевой проницаемости кремнеземных микросфер	13
Рябченко Н. А. Оценка возможности применения FlowVision для численного моделирования процессов сверхзвукового взаимодействия набегающего потока и выдува с боковой поверхности твердого тела струи	14
Семухин Р. И. Особенности выбора энергоустановки для стратосферного летательного аппарата.....	16

ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Manuel Alejandro Quispe Torres. Quantum Supremacy with NISQ quantum processors and simulators	19
Апрелов Н. А. Спектроскопия поглощения аммиака методом дисперсионного преобразования Фурье	20
Баздырев Н. А. Формирование и исследование терагерцевых вихревых бесселевых пучков, полученных с помощью отражающих аксиконов.....	21
Бычкова С. А. Дисперсия оптических характеристик кристалла GUNP в видимом, ближнем инфракрасном и терагерцевом диапазонах	22
Ванда В. С. Исследование оптических характеристик металлических поверхностей методом терагерцевой плазмонной интерферометрии.....	23
Вострикова М. В., Ерушин Е. Ю. Исследование нелинейно-оптических характеристик кристалла $BaGa_2GeSe_6$ при воздействии излучением с длиной волны 1053 нм	24
Грибанов Д. С. Измерение плотности электронно-дырочной плазмы в полупроводнике и диэлектрических свойств планарных проводников методом импульсной терагерцевой спектроскопии	25
Громов И. В., Козьмина П. В. Исследование свойств резонансов КПН в поле встречных волн	26

Исаева Я. Г. Измерение дисперсии оптических волокон с использованием волоконного фемтосекундного синтезатора частот	27
Козенко К. В. Исследование двойной структуры резонанса насыщенного поглощения на открытом дипольном переходе в атомах цезия для стабилизации частоты лазерного излучения	28
Козлова К. С. Магнито-индуцированная прецессия атомного спина в поле эллиптически поляризованной световой волны для приложений к атомной магнитометрии.....	29
Козьмина П. В., Громов И. В. Разработка методов по преобразованию лазерных пучков	30
Купцова А. О. Исследование воздействия мощного излучения накачки на активные элементы лазерного усилителя при криогенных температурах.....	31
Лапин Н. С. Спектроскопия квадрупольного часового перехода иона иттербия-171	32
Логачев В. И. Моделирование формирования вихревых пучков при дифракции на полигональных спиралях.....	33
Михайлов А. М. Теория нелинейных высококонтрастных резонансов в парах цезия под действием встречных бихроматических лазерных пучков	34
Папченко А. В. Оптимизация выходных параметров диссипативных солитонов в усилителе на основе тейперированного иттербиевого волокна	35
Прилуцкая А. А. Стабилизация частоты полупроводникового лазера для экспериментов с одиночными атомами в оптических дипольных ловушках.....	36
Растрьгин Д. С., Долгирев В. О. Дифракция света на чирпированных многослойных неоднородных голографических ФПМ-ЖК дифракционных структурах.....	37
Розенталь С. Р., Бабич Н. С. Исследование влияния гибридного анапольного состояния на оптические силы	38
Син Цихуэй. Исследование оптических свойств кластеров азотно-вакансионных центров в искусственных алмазах	39
Спирин С. А. Измерение добротности цилиндрических микрорезонаторов мод шепчущей галереи на поверхности стандартного оптоволокна.....	40
Сулиман Г. Трехфотонное лазерное возбуждение одиночных ридберговских атомов в оптической дипольной ловушке.....	41
Теслина П. П. Механическая эксфолиация двумерных галогенидных перовскитов	42
Туркия Г. Р. Исследование чувствительности и быстродействия пироэлектрического детектора МГ-32	43
Федяй В. Е. Создание антиотражающих структур на поверхности нелинейных кристаллов методом фемтосекундной лазерной абляции	44
Фомин А. А. Исследование прецессии оптически наведенного спинового выстраивания	45
Чирков С. В. Исследование параметров ультракоротких импульсов в области существования режима синхронизации мод в волоконном лазере на эффекте нелинейной эволюции поляризации.....	46

Шахов Н. В. Исследование методов построения ультрафиолетовых люминесцентных устройств для связи и ориентации БПЛА.....	47
Щербак В. В. Построение модели люминесценции ансамбля перовскитных квантовых точек в приближении одиночного возбуждения.....	48

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Булатова У. Д. Исследование ВЧ-драйвера стационарного источника отрицательных ионов для тандемного ускорителя	51
Гаврисенко Д. Ю. Разработка высокочастотного плазменного драйвера для инжекторов с многосекундным режимом работы.....	52
Гамов В. В., Колесниченко К. С. Инжекторы нейтральных атомов установки КОТ.....	53
Захаров Ф. А. Исследование электромагнитных характеристик индуктора ВЧИ-плазмотрона	54
Захарчук М. М. Пространственно-угловое рассеяние лазерного излучения плазмой при облучении мишеней из алюминия и вольфрама	55
Ильенко Н. С. Модернизация ионно-оптической системы источника отрицательных ионов водорода с большой площадью эмиссии	56
Кожевников А. В. Исследование диамагнетизма и колебаний магнитного поля плазмы на установке СМОЛА	57
Колесниченко К. С., Гамов В. В. Создание мишенной плазмы в эксперименте на установке КОТ.....	58
Корж В. А. Измерение интенсивности D-D-реакции на установке ГДЛ с измененной магнитной конфигурацией	59
Куршаков В. А. Плазменные равновесия с $\beta > 1$	60
Морозов О. П. Моделирование захвата нейтральных пучков и последующей столкновительной релаксации быстрых ионов в плазме методом частиц в ячейках.....	61
Пономаренко А. М., Токарев А. Ю. Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния для исследования периферийных локализованных мод на токамаке «Глобус-М2»	62
Прокопьев М. А. Поддержание материального баланса плазмы в ГДЛ с помощью коаксиального плазменного ускорителя	64
Простодушев А. О. Повышение качества паяных соединений печатных плат неравновесной плазмой атмосферного давления.....	65
Романенко В. М. Исследование спаренного согласующего устройства, используемого в двухплечевом генераторе для питания ВЧ-плазменного эмиттера.....	66
Федоров М. А. Измерение параметров плазмы в установке ГОЛ-НВ.....	67
Шаров Н. С. Моделирование процесса подпитки плазмы веществом в установке ГДМЛ.....	68
Ярыгова В. М. Изменения ускоряющего поля при разделении плазменной секции в эксперименте AWAKE.....	69

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Maksimov M. A. Microphotoluminescence characterization of crystalline defects in MAPbCl ₃ single crystals	73
Paramonova M. A. Annealing effect on Pt/InAlAs Schottky contacts electrophysical characteristics	74
Баженов А. О. Особенности магнетосопротивления и эффекта Холла в пленках трехмерного топологического изолятора на основе халькогенидов висмута и сурьмы	75
Барнаков А. В. Формирование нанокластеров кремния в пленках монооксида кремния	76
Башегурова Е. А., Дерибина Е. И. Изучение областей размерного квантования в квантовых точках GaAs/AlGaAs	77
Бетке И. А. Химическая стабильность сверхтонких пленок Bi/InAs(111)A	78
Ван Гуаньлун. Диффузия имплантированного германия из пленки SiO ₂ в кремний и формирование фазы Si _{1-x} Gex	79
Верчук М. М. Измерение фотоЭДС на поверхности p-GaAs(Cs,O) методами фотоотражения и фотоэмиссии	80
Вопиловский А. М. Кинетика затухания люминесценции и светоиндуцированного поглощения кристалла ниобата лития, легированного магнием	81
Гриценко В. О., Мурзин А. О. Исследование фазового перехода в тонких пленках галогенидного перовскита FA _x MA _{1-x} PbI ₃	82
Егоров Д. А. Измерения длины электрон-электронного рассеяния в подвешенных полупроводниковых микроструктурах	83
Ермак К. Н. Переключения сопротивления в нестехиометрических пленках SiO _x	84
Захожев К. Е. Рост SnSe ₂ , инициированный кристаллизацией тонкого аморфного слоя на поверхностях Bi ₂ Se ₃ (0001) и Si(111)	85
Зиренко Т. А. Эпитаксия и свойства барьера в InAlSb/InSb nVn-гетероструктурах	86
Касьянов Д. В. Энергетический спектр новых GaSbP/AlP квантовых точек	87
Комлина С. В. Исследование смачиваемости бифильных медь-графеновых поверхностей	88
Кузнецова Л. С. Исследование морфологии и оптических постоянных буферных слоев ZnTe/Si методами эллипсометрии и профилометрии	89
Кузьмин Н. С. СВЧ-фотопроводимость квантовых ям CdHgTe/HgTe/CdHgTe критической толщины	90
Курмачев Д. А. Двумерный топологический андерсоновский изолятор в режиме квазибаллистического транспорта	91
Майдэбура Я. Е. Структурные и люминесцентные свойства островков GaN, выращенных методом капельной эпитаксии на аморфном и графеноподобном слоях SiN	92
Манцурова С. В. Влияние ростовых условий на морфологию планарных кремниевых нанопроволок на поверхности Si(100) (Монте-Карло моделирование)	93

Манько Е. С. Моделирование сверхструктурных перестроек при гетероэпитаксии Ge на структурированных подложках Si	94
Махмудиан М. М. Диффузия и проводимость двумерного газа невзаимодействующих электронов в системе примесей в присутствии сильного магнитного поля	95
Микаева А. С. Электронная структура поверхности легированных индием пленок (111) (Pb,Sn)Te/BaF ₂ вблизи точки инверсии зон	96
Милюшин Д. М. Резистивные переключения в микроструктурах на основе диоксида ванадия с фазовым переходом «полупроводник — металл»	97
Мионов Н. А. Моделирование электромагнитного отклика цилиндрических нанорезонаторов ИК-диапазона на основе кремния и диоксида ванадия	98
Михеев С. С. Вклад фотонного переноса в транспорт электронов в p-GaAs-фотокатоде	99
Мурзин А. О., Гриценко В. О. Перенос энергии между орторомбической и тетрагональной фазами и их сосуществование в монокристалле MAPbI ₃	100
Павлов Г. Р. Электрон-фононное взаимодействие в MgB ₂	101
Перевалов Т. Д., Измайлов Л. Н., Кузнецова А. К. Намагниченность кластеров железа	102
Рахронов У. Х. Особенности фотолюминесценции эпитаксиальных пленок твердых растворов (ZnSe) _{1-x} (Si ₂) _x (GaP) _y , выращенных на Si- и GaP-подложках	103
Сарыпов Д. И. Эффект Гуржи в подвешенных GaAs точечных контактах	104
Симакова С. С. Исследование бислойных пленок с решеткой антиотечек методом компьютерного моделирования	105
Снегирев А. В. Гальваномеханические эффекты в тригональных дираковских монослойных материалах	106
Соловова Н. Ю. Кристаллическая структура тонких пленок Bi/InAs(111)A	107
Стуколов И. С. Исследование влияния отжига на электрофизические параметры границы раздела CdHgTe-HfO ₂	108
Фань Ч., Цю С. Исследование поверхности структур (Bi _{1-x} Sbx) ₂ (Te _{1-y} Se _y) ₃ /Bi ₂ Te ₃ /Si(111) и (Bi _{1-x} Sbx) ₂ (Te _{1-y} Se _y) ₃ /Gr/SiC(111) методом атомно-силовой микроскопии	109
Фролов Д. И. Изучение влияния содержания кислорода на температурные зависимости коэффициента термоЭДС в слоистом кобальтате YBaCo _{3,5} Al _{0,5} O _{7+x}	110
Фролов М. Е. Метод характеристики дефектности и структурной подвижности в кристаллических гибридных, металл-органических пористых координационных полимерах	111
Цю С., Фань Ч. Рост пленок (Bi _{1-x} Sbx) ₂ (Te _{1-y} Se _y) ₃ на подложках Gr/SiC методом молекулярно-лучевой эпитаксии	112
Чэнь Дунци. Термическая стабильность пленок кремния на изоляторе нанометровой толщины	113
Янибеков И. И. Расчет энергии образования точечных дефектов в гексагональном нитриде бора	114

ТЕПЛОФИЗИКА

Акрамов И. М., Катаманин И. Н. Исследование влияния содержания кислорода на термоэлектрические свойства оксидов $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$	117
Алехин С. А. Особенности превращения карбамида в водоокислородном флюиде	118
Апостол Ю. С. Численное моделирование закрученной струи несмешивающихся жидкостей	119
Артишевский К. В. Изучение смачиваемости поверхностей методом молекулярной динамики.....	120
Афанаскин Д. С. Прогнозирование усталостной прочности термобарьерного покрытия	121
Басова П. С., Бодина В. А., Волохов А. Ф. Исследование структуры двухфазного потока при кипении жидкости в микроканалах	122
Бетке И. А. Исследование сенсорных свойств графена к высыхающим на нем каплям.....	123
Богомолова А. И. Влияние структуры CVD-графена и подложки на его сенсорные свойства	124
Бодина В. А., Басова П. С., Волохов А. Ф. Исследование влияния геометрии параллельных прямоугольных микроканалов на эффективность охлаждения.....	125
Борискин А. А. Двумерная дифракция волн горения и детонации в водородных смесях.....	126
Бороздин П. А. Исследование способов управления движением падающей капли наножидкости в постоянном электрическом поле.....	127
Гареев Т. И. Синтез 0D–2D-наноструктур методом NiPIMS	128
Давыдов Д. А. Верификация результатов моделирования рабочего цикла поршневого двигателя, работающего на разных видах топлива, посредством стендовых испытаний	129
Деревянников И. А., Мунгалов А. С. Динамика пузырьков и сухих пятен под нагреваемой подложкой.....	130
Деринг Е. Д. Об измерении поступательной температуры в неравновесном сверхзвуковом потоке	131
Зайцев О. В. Влияние малого анода на магнетронный разряд и свойства тонких пленок нитрида титана	132
Зорькина А. И. Исследование тепловых потоков в области контактной линии при росте одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации	133
Зотьева А. А. Отладка двухцветного ПЛИФ-метода для измерения температуры в жидкости.....	134
Зубанов К. С., Гордиенко М. Р., Какаулин С. В., Ледовский В. Е., Янчат А. Т. Разработка метода ультразвуковой диагностики двухфазного потока	135
Иванова А. А. Исследование процессов осаждения капли коллоидного раствора в магнитном поле	136

Каргина А. М. Влияние электрического поля на поведение капли наножидкости диоксида титана, полученной методом наносекундной импульсной лазерной абляции.....	137
Клименко А. Влияние характеристик фрагментации капель при соударении водоугольных суспензий с пиролизирующимися частицами угля.....	138
Конев С. В. Экспериментальное исследование теплообмена в пленке жидкости, стекающей по вертикальному цилиндру с однослойным и двухслойным сеточными покрытиями.....	139
Косовских И. А. Исследование влияния давления на структуру и эволюцию микрослоя при кипении жидкости	140
Красильников Д. Н., Следнев В. А. Влияние формы поперечного сечения канала на структуру стационарного потока в цилиндре и интенсивность теплоотдачи во впускной системе поршневого двигателя.....	141
Кутузова Н. В., Мезенцев С. И., Усов Д. А. Моделирование работы теплообменного аппарата регенеративного типа с разной формой поперечного сечения каналов	142
Лавронов К. Д. Экспериментальное исследование влияния электрического поля на распределение температуры в пламени в форме конуса	143
Литвинова Д. В. Изучение гидродинамической кавитации на основе алгоритмического анализа экспериментальных данных.....	144
Лукьянов А. А., Пантелеев С. А. Ламинаризация турбулентного течения в цилиндрическом канале путем создания М-образного профиля средней скорости.....	145
Лукьянов Ан. А. Численное моделирование газового пузырька Тейлора в нагреваемой трубке при учете зависимости вязкости воды от температуры	146
Лутченко И. И. Численное исследование подавления прецессирующего вихревого ядра в модельной гидротурбине Френсиса с помощью активных методов	147
Мезенцев С. И., Кутузова Н. В., Усов Д. А. Исследование эффективности теплообменной насадки сложной структуры	148
Нагибин П. С. Использование гидрата метана для интенсификации горения низкосортных угольных топлив.....	149
Науменко А. Б. Управление охлаждением поверхности многокомпонентным импульсным спреем.....	150
Непомнящих В. А. Влияние отношения толщин пленок α -Ge/Au на золото-индуцированную кристаллизацию аморфного германия	151
Павленко К. А. Изучение эффективности теплопередачи при некипящем распылительном охлаждении.....	152
Пантелеев С. А., Лукьянов А. А. Влияние формы специального устройства ламинаризатора на режим течения жидкости в цилиндрической трубке	153
Пестрецова В. Д. Исследование влияния сильного электрического поля на конденсацию парогазовой смеси	154

Саввинов А. Е. Линейная устойчивость ламинарной затопленной струи: непараллельные эффекты	155
Самохвалов Ф. А., Васильев М. М., Смирнов Н. И. Металл-индуцированная кристаллизация аморфного кремния, инициированная наносекундными импульсами лазерного излучения.....	156
Сендир Е. А. Исследование поведения капли водно-спиртового раствора в электрическом поле	157
Скорюпин А. И. Численное исследование эффекта резкого увеличения обратного потока при сверхзвуковом истечении газа из двух соосных кольцевых сопел в камеру низкого давления.....	158
Смирнов Н. И. Эволюция геометрии капли жидкости на природных и биомиметических поверхностях в постоянном электрическом поле.....	159
Тинтулова М. В., Шарифуллин Б. Р. Экспериментальное исследование структуры вихревого течения в газовихревом биореакторе с плавающей шайбой.....	160
Туркия Г. Р. Предсказание длины и скорости снарядов при течении несмешивающихся жидкостей в микроканалах с использованием методов машинного обучения.....	161
Харченко Т. И. Осаждение наноструктур вольфрама методом импульсного лазерного осаждения из газовой фазы	162
Шуляев С. А. Взаимодействие капель и частиц перспективных компонентов композиционных топлив.....	163
Шурупов В. А. Вскипание перегретой воды, истекающей через короткий овальный канал.....	164
Юровских Е. А., Михайлов А. В. Влияние нестационарного набегающего потока нагретой жидкости на поле температуры в тонкой стенке в режимах тепловой гравитационно-капиллярной конвекции.....	165
Юсупова А. Д. Влияние постоянного электрического поля на скорость испарения капли воды.....	166

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Биомедицинская физика

Houchun Zhou. Use sliding window to detect burst and pause in spike trains of patients with movement disorders	169
Акинина М. Д. Физико-математическая схема замещения вестибулярного аппарата для многоканальной стимуляции органов внутреннего уха	170
Алешкова М. А. Применение источника генерации рентгеновского излучения X-RAD 320 для изучения радиопротекторных и радиосенсибилизирующих эффектов соединений в экспериментах <i>in vivo</i> и <i>in vitro</i>	171

Атнюкова А. Н. Кластеризация и локализация спин-меченого диклофенака в модельной биологической мембране.....	172
Бутикова Е. А. Поиск сигнатурных метаболических путей методом ВЭЖХ-МС/МС для изучения биологических эффектов ТГц-излучения в клетках меланомы	173
Буянов Д. А. Неинвазивная оценка метаболизма биологических тканей с использованием ближней инфракрасной спектроскопии: результаты экспериментов и перспективы применения.....	174
Быстров С. А. Оценка чувствительности спор <i>Penicillium nalgiovense</i> к широкополосному импульсному ультрафиолетовому излучению	175
Диаб Х., Гончаренко А. М. Программа расчета тепловых полей при лазерном воздействии на живые биологические ткани.....	176
Евсеев И. Д. Бор-гадолиний-содержащие нанокompозиты арабиногалактана для мультимедийной тераностики	177
Ибрагим И. С. Разработка ряда дозиметрических методик метода БНЗТ и их верификация на установке источника нейтронов на базе ускорителя ВИТА.....	178
Канарская М. А. Исследование устойчивости самоограниченных комплексов РНК к действию искусственных рибонуклеаз	180
Коновалова В. Д. Метод мгновенной гамма-спектрометрии для контроля терапевтической дозы при бор-нейтронозахватной терапии	181
Константинов В. В., Лагунов Т. А., Нурисламов А. Р. Моделирование механизмов укладки хроматина в хромосомах типа ламповых щеток	182
Кузьмина К. С. Создание дозиметра Фрикке для бор-нейтронозахватной терапии	183
Лапшин К. А. Количественное определение химических элементов в биологических образцах методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения	184
Мещерякова В. А. Фотохимия и фотофизика диридиевого комплекса, перспективного для применения в фотохимиотерапии.....	185
Морозова Ф. В. Гибридизационные свойства бензозольных производных олигодезоксирибонуклеотидов в присутствии соразтворителей	186
Цишевская А. А. Получение <i>de novo</i> нуклеопротеина нового ортонайровируса <i>Yezo virus</i> и изучение его пространственной структуры.....	187

Физические методы исследования функциональных материалов и наносистем

Абдульменова А. В. Стойкость к высокотемпературному окислению функциональных ламинированных композитов Nb/Ti ₃ Al(Si)C ₂ -TiC.....	188
Алексеев В. А. Квантово-химическое исследование влияния допирования дисульфида молибдена (MoS ₂) атомами азота на электрохимические свойства.....	189

Алябьев А. А., Кибирский А. Д. Изучение автоэмиссионных свойств полиакрилонитрила и углеродных нанотрубок	190
Бобков М. Е. Моделирование размещения катионов в структуре цеолитов FAU.....	191
Брущенко А. И. Алгоритм <i>unfolding-synthesis</i> в некорректных задачах обработки мессбауэровских спектров.....	192
Булатов А. А. Структурные характеристики вольфраматов лантаноидов $Ln_{14}W_4O_{33}$ ($Ln = La, Nd, Ho, Yb, Tm$)	193
Бурхинова Н. Ю. Титаноматричные композиты, упрочненные наночастицами нитрида титана.....	194
Гвозденко А. А., Голик А. Б., Бочаров Н. М., Артюшин С. В. Исследование влияния комплексов эссенциального микроэлемента цинка с аскорбиновой кислотой и незаменимыми аминокислотами на дисперсный состав молока	195
Гвозденко А. А., Рехман З. А., Голик А. Б., Вакуленко М. В. Изучение фазового состава наноразмерного карбоната меди, стабилизированного гидроксипропилцеллюлозой	196
Герцель И. С., Витошкин И. Е., Филиппов А. А. Исследование структурно-фазового состава титаноматричных композитов с использованием синхротронного излучения и сканирующей электронной микроскопии.....	197
Гусев К. С. Влияние высокого и низкого содержания Nb на водородную проницаемость многокомпонентных сплавов системы Nb-Ni-Ti-Zr-Co.....	199
Дик Д. В. Керамика на основе карбида бора с добавкой диборида хрома	200
Золотарев Н. А. Разработка эффективных поверхностных контактов на полимерных композитах, модифицированных однослойными углеродными нанотрубками.....	201
Иванов А. Д. Методы машинного обучения при исследовании пористой структуры адсорбентов и катализаторов.....	202
Измайлов Л. Н. Знакомство с детекторами регистрации нейтрино.....	203
Кахидзе Н. И., Мубараков Р. Г., Синкина И. Л. Исследование структуры и прочностных свойств сплава АК9, упрочненного субмикрочастицами ErF_3	204
Константинов И. С. Получение гибридных слоистых материалов на основе сульфидов молибдена и графена	205
Кудрявцев А. Л. Реализация схемы Бонда на современном монокристалльном дифрактометре	206
Лаврехин Д. В. Разработка рентгенодифракционного эталона для малых углов	207
Лукин А. А. Исследование изменения морфологии твердых растворов со структурой перовскита La-Ca-Mn-Co-O методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии в различных средах.....	208
Майдэбура Я. Е. Капельная эпитаксия островков GaN со структурой цинковой обманки на поверхности графеноподобной структуры g-SiN	209
Макаренко А. Е., Кульбакин И. С., Короткова Е. В., Якушевский Э. И. Структура и свойства дисперсионно-твердеющего сплава 47ХНМ	210

Мубараков Р. Г., Бельчиков И. А. Получение высокоэнтропийной керамики системы Hf-Cr-Ti-FeV-N методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.....	211
Новиков М. А. Изучение влияния параметров CVD-синтеза на структуру и сенсорные свойства пленок графена.....	212
Нуриахметов З. Н. Исследование проводимости материалов на основе одностенных углеродных нанотрубок в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц.....	213
Петякин Н. В. Пьезорезистивные свойства композитов на основе жидких силиконов и электропроводящих добавок.....	214
Платонов Б. Р. Исследование оптических свойств двумерных MoS ₂ , WS ₂ , полученных методами «скотча» и CVD.....	215
Синица Н. А. Окислительный термолиз дигидрата оксалата железа в гематит: исследование структурных особенностей промежуточных фаз.....	216
Тарасов И. А. Исследование адсорбции метанола на поверхности монокристалла Ag(111) при низких температурах.....	217
Ткаченко Д. С. Влияние оболочки ZnO на структуру и магнитные характеристики наночастиц типа «ядро — оболочка» Fe ₃ O ₄ /ZnO.....	218
Уракова А. О. Исследование закономерностей формирования сферических и стержневидных магнитных наночастиц MnFe ₂ O ₄ , полученных микроволновым гидротермальным методом для биомедицинских приложений....	219
Хайновский М. А. Моделирование свойств кристаллов [Co(NH ₃) ₅ (NO ₂)]Cl(NO ₃), проявляющих фотомеханические эффекты.....	220
Черепанов А. С. Модельные биметаллические Pd-Co/ВОПГ катализаторы: приготовление и исследование методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и сканирующей туннельной микроскопии ...	221
Черненко Д. В., Клименков А. Д., Смирнов А. А., Уткина Д. Ю. Изучение структурных особенностей при износе холоднокатаной стали 05X22AГ15Н8МФ по линиям дифрактограмм.....	222
Чжан Сяосюй. Моделирование сверхструктурных перестроек на поверхности структурированных подложек Si.....	223

Химическая и биологическая физика

Алимов Д. В. Исследование структурных переходов в МОКП методами ЭПР-спектроскопии и молекулярной динамики.....	224
Атамурзаева А. А., Шипеев К. А., Хандогин Г. А. Методы спектроскопии для изучения растительных объектов.....	225
Бердюгин А. А. Исследование структурных и гибридизационных свойств несовершенных комплексов фосфорамидных имидазольных олигонуклеотидов с ДНК.....	226
Бородулина А. В. Расчет числа π с помощью квантового алгоритма: реализация на спиновых кубитах с использованием импульсного электронного парамагнитного резонанса.....	227

Бугров Е. Д. Физико-химические особенности асимметричного горения бинарной капли $Al - Al_2O_3$ в воздухе.....	228
Дементьев С. А. Исследование эффективности регистрации синглетного кислорода новыми спиновыми ловушками с улучшенными функциональными свойствами по данным ЭПР-спектроскопии	229
Зайцев К. В. Изучение фотопереключения спиновых состояний в молекулярных магнетиках $Cu(hfac)_2L^R$, содержащих двухспиновые кластеры, методом ЭПР.....	230
Золоторенко Д. А. Характеризация гидратации роговицы глаза человека с помощью спектроскопии рассеяния Мандельштама — Бриллюэна и комбинационного рассеяния света	231
Колоколов М. И. Исследование пространственного строения комплексов альбумина с порфиринами методами ЭПР и молекулярного моделирования....	232
Косвинцева С. В. Исследование формирования самоограниченных ДНК/РНК-комплексов	233
Кузнецов Д. А. Измерение сигнала ESEEM селективно дейтерированных нитроксильных радикалов методом прямого детектирования.....	234
Лактионова А. В. Особенности синтеза гидрогелей на основе коллагена и их характеристика методами оптической спектроскопии.....	235
Леонов Д. А. Определение структур потенциальных метаболитов психических заболеваний с помощью масс-спектрометрии высокого разрешения.....	236
Литвинов И. А. Метод ЭПР для изучения состояния ионизируемых групп в активном центре комплекса Fpg-ДНК.....	237
Литвинцева К. А. Окисление метанола на монослойном V_2O_5/TiO_2 -катализаторе: исследование методами <i>operando</i> ИК-Фурье-спектроскопии и <i>pseudo in situ</i> РФЭС	238
Литовских Н. Е. Метод компенсации эффекта дампинга во время селективных импульсов в ЯМР-спектроскопии.....	239
Мальцева С. В. Теоретическое исследование электронной структуры и магнитных свойств дифторзамещенных радикалов Блаттера	240
Одуд И. М., Ломачук Ю. В., Мальцев Д. А., Шахова В. М., Олейниченко А. В., Мосягин Н. С., Скрипников Л. В. Пилотное применение метода CCSD для расчета структурных параметров перовскитов в рамках технологии СТЕР.....	241
Омельченко А. Н. Исследование метаболизма преимплантационных эмбрионов мышцы с помощью комбинационного рассеяния света дейтерированных меток.....	242
Пластинина Д. М., Липская А. С. Лазерная ИК-спектроскопия горячих полос C_2HD в области первого обертона валентных C-H-колебаний.....	243
Подаров Р. А. Применение СВЧ-импульсов заданной формы в дипольной ЭПР-спектроскопии для спиновых меток на основе фотовозбужденного триплетного состояния.....	244

Пудова С. С. Оптимизация условий КР-эксперимента для обнаружения малых концентраций белка в растворе	245
Райзвих А. Е. Взаимодействие триарилметильных радикалов с кислородом и тиолами в биологических средах.....	246
Сафин Р. Р. Образование синглетного кислорода при фотовозбуждении золотых наночастиц.....	247
Фоменко М. В. <i>In vitro</i> окисление эрготионеина катионами меди	248
Черепанов А. В. Экспериментальное и теоретическое изучение химии образования катионов в пламени смеси аммиака с водородом	249
Четвериков А. О. Миграция носителей заряда на квазиодномерном молекулярном проводнике в переменном электрическом поле	250
Яншин А. О. Расчет кинетического изотопного эффекта при диссоциации димеров полиглицина как модельной системы для денатурации белков	251

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Shuklina A. A. Study of the reaction $^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha\alpha$ in the 0.15–2.2 MeV proton beam energy range	255
Барладян А. А. Определение вероятностей распадов $B^+ \rightarrow D^{*0} \bar{D}^0 K^+$ и $B^+ \rightarrow D^0 \bar{D}^{*0} K^+$ в эксперименте Belle II	256
Божайкина Т. Е. Изучение влияния гравитационных волн от двойных систем черных дыр промежуточной массы на спектр излучения пульсаров в теории массивной гравитации	257
Ворохов А. В. Изображение черной дыры в нелинейной электродинамике	258
Зубарев И. Б. Реализация установки гамма-гамма-совпадений с использованием ^{22}Na	259
Кабанник И. А. Калибровка сцинтилляционных детекторов установки TAIGA по космическим мюонам.....	260
Кольцецов В. Д. Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ с детектором КМД-3 на энергиях ϕ -мезона и выше	261
Кузнецов Т. А. Алгоритм реконструкции данных в ксеноновом калориметре КМД-3.....	262
Ли Р. В. Разработка время-проекционной камеры с оптическим съемом	263
Нарваткина А. К. Применение методики слепого анализа к поиску событий конверсионного распада омега-мезона в эта-мезон и электрон-позитронную пару.....	264
Ооржак А. А. Изучение электрон-позитронной аннигиляции в три фотона в области резонанса ϕ -мезона	265
Офицеров А. Д. Модернизация счетчика прототипа калориметра для Супер чарм-тау фабрики.....	266

Панасенко Л. А. Переход реликтовых гравитационных волн в фотоны под действием космологического магнитного поля.....	267
Пастушук Г. Г. Анализ процесса $e^+e^- \rightarrow K_L K_S^* \pi^+ \pi^-$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000	268
Поздняков Н. А. Лептогенезис в асимметричных захватах частиц и античастиц первичными черными дырами	269
Попов А. В. Вычисление полного сечения процесса аннигиляции электрон-позитронной пары в пару мюонов с точностью $O(\alpha^3)$ с учетом вклада реального излучения	270
Сагайдак А. Е. О финслеровом расширении специальной теории относительности.....	271
Саутнер Д. О. Определение тензорной поляризации дейтронной мишени по измеренной асимметрии в рассеянии электронов на малые углы.....	272
Симонян Г. А. Нарушение четности в рассеянии дейтронов высоких энергий на ядрах углерода и кислорода	273
Сорокин С. В. Однофотонная аннигиляция позитрона на атомном электроны при низких энергиях	274

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Асылкаев А. М. Ударное сжатие 3D-структурного алюминия.....	277
Гатиятуллина Д. Д. Двухуровневое моделирование деформации и разрушения дендритной структуры аддитивного алюминиево-кремниевого сплава.....	279
Караван А. В. Анализ неоднородностей плотности в структуре композиционного материала по данным рентгеновской микротомографии	280
Лукин С. Э. Исследование зависимости интенсивности механолюминесцентного отклика композита на основе эпоксидной смолы от массовой концентрации люминофора SAOE	281
Марактаев Б. И. Исследование зависимости импульса тороидального пузыря от времени	282
Параскун А. Г. Модели электрофизических процессов в спиральных генераторах с разделенными в пространстве индуктивной и емкостной частями.....	283
Салтыков И. Р., Шутов И. В. Прочность паяных соединений сплава АМг6	284
Туманик А. С. Исследование влияния способа изготовления заряда тротила на профиль массовой скорости.....	286
Хлебановский Н. А. Морфология металлических наночастиц, полученных методом детонационного синтеза	287
Цыплаков М. М. Ультразвуковое эхо-импульсное исследование изделия из сплава ВТ6, полученного методами металлического аддитивного производства.....	288
Шаин А. М. Падение капли жидкости на плоскую поверхность: влияние контактного угла	289

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Автоматизация эксперимента, моделирование и обработка данных

Афанасьев М. Д. Сбор и передача метеорологических данных в ИЯФ СО РАН	293
Богомягков Д. А. Хранение и обработка метеорологических данных в ИЯФ СО РАН	294
Коржаневский К. И. Встроенный алгоритм обработки данных бортовых тепловизионных датчиков системы управления ориентацией малого космического аппарата «Норби-3»	295
Корниевский М. А. Система синхронизации и коррекции данных для станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ	296
Кушнарев Д. А. Разработка программно-аппаратного обеспечения системы импульсного вдува на кромке сопла для контроля истечения струи газа.....	297
Овсянник В. В. Моделирование рентгеновской оптики для станции 1-1 «Микрофокус» в проекте СКИФ	299
Петренко П. В. Управляющая плата двухкоординатного рентгеновского детектора DIMEX-Si2D	300
Собина У. Г. Разработка магнитной системы масс-сепаратора в установке ионной имплантации	301
Стерлягов С. А. Разработка системы сбора термоанемометрической информации на основе измерительного комплекса ТАИК-3М	302
Федоров В. В. Создание программного комплекса для расчета динамики частиц во внешних электромагнитных полях.....	303
Ярцева М. А. Программное обеспечение счетного рентгеновского координатного детектора.....	304

Радиофизика и ускорители

Абед Н. Исследование поперечной динамики интенсивного пучка электронов с энергией до 30 кэВ для различных применений	305
Бердюгина А. В. Расчет и моделирование замедляющего зазора для ионного ускорителя ТМ-200 Т	306
Бояркина В. Е. Применение камеры Наногейт-38 для диагностики пучка в коллайдере ВЭПП-2000	307
Дмитриев М. С. Источники питания быстрых корректоров СКИФ	308
Евдокимов А. А. Модернизация блока питания развертки промышленного ускорителя типа импульсных линейных ускорителей.....	309
Ковалец А. И. Полевая эмиссионная ячейка с концентрическим катодом.....	310
Корнев З. Д. Разработка модифицированного прибора контроля и регистрации помех.....	311

Кутергин Д. Д. Методика двухэтапного моделирования для решения задач кильватерного ускорения	312
Лотов И. К. Устойчивое моделирование захвата плазменных электронов кильватерной волной в квазистатическом коде	313
Митянин А. И. Модернизация и экспериментальная отработка аппаратуры контроля вибрационного воздействия	314
Мурзина А. В. Оптимизированное устройство генерации излучения для наноскопии в «окне прозрачности воды»	315
Непеин А. Р. Разработка модуля обратной связи для бустера НИКА.....	317
Петров И. С. Статус-монитор VME-крейтов локальных контроллеров больших ускорительных комплексов	318
Попов Д. М. Исследование динамической апертуры в бустерном синхротроне с электронным охлаждением	319
Рева С. В. Измерение продольного профиля пучка на второй очереди Новосибирского ЛСЭ.....	320
Руднев Д. Н. Разработка и управление обратимым трехфазным выпрямителем с обратной связью.....	321
Самуйленкова Г. Д. Расчет надежности функционирования бортовых систем МКА «Норби» на солнечно-синхронной орбите с учетом теплового режима	322
Смирнов К. И. Измерения и моделирование элементов СВЧ-тракта линейного ускорителя инжектора СКИФ	323
Терентьев И. А. Система регистрации потерь пучка Новосибирского лазера на свободных электронах.....	324
Турло В. С. Исследование медленного выпуска пучка на основе бетатронного сердечника из ионного синхротрона.....	325
Чепурной Н. А. Определение связи с помощью пооборотных измерений положений пучка	326
Шерстюк С. П. Когерентные бетатронные колебания при инъекции в накопитель	327
Шигаев З. Р. Модернизация блока датчиков давления: датчик Пирани.....	328
Эптешев Е. С. Изучение и оптимизация режимов магнитной структуры Новосибирского ЛСЭ.....	329
Указатель авторов.....	330

Научное издание

МНСК-2024

**АЭРОФИЗИКА • ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ • ФИЗИКА ПЛАЗМЫ • ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА •
ТЕПЛОФИЗИКА • ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ • ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ,
АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ • ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД •
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ**

Материалы
62-й Международной научной студенческой конференции

17–23 апреля 2024 г.

Корректор *Д. И. Ковалёва*
Верстка *А. С. Терешкиной*
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 17.06.2024 г.
Формат 60 × 84 1/8. Уч.-изд. л. 43,75. Усл. печ. л. 40,6.
Тираж 46 экз. Заказ № 76.

Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Секция
ФИЗИКА

ISBN 978-5-4437-1620-6



N* Новосибирский
государственный
университет
***НАСТОЯЩАЯ НАУКА**

