МНСК Международная научная студенческая конференция

Материалы секции
ФИЗИКА

17-26 апреля 2023

НОВОСИБИРСК

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

МНСК-2023

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
61-й Международной научной студенческой конференции

17–26 апреля 2023 г.

Новосибирск
2023

УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519; 532-539; 544; 62; 621; 662; 669; 681; 33; 15.010; 63
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб; 31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431
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 61-й Междунар. науч. студ. конф. 17–26 апреля 2023 г. / Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2023. — 320 с.

ISBN 978-5-4437-1442-4

Данное издание представляет собой публикации тезисов 61-й Международной научной студенческой конференции 2023 г. (МНСК-2023) 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 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519; 532-539; 544; 62; 621; 662; 669; 681; 33; 15.010; 63
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб; 31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431

© СО РАН, 2023
© Новосибирский государственный университет, 2023

ISBN 978-5-4437-1442-4
DOI 10.25205/978-5-4437-1442-4

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

ISSC-2023

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 61th International Scientific Student Conference

April, 17–26, 2023

Novosibirsk
2023

УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519; 532-539; 544; 62; 621; 662; 669; 681; 33; 15.010; 63
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб; 31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431
А992

А992 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 61th International Scientific Student Conference. April, 17–26, 2023 / Novosibirsk State University. — Novosibirsk : IPC NSU, 2023. — 320 p.

ISBN 978-5-4437-1442-4

This edition represents the publications of the 61th International Scientific Student Conference 2023 (ISSC-2023) theses in .

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

УДК 533; 535; 533.9; 53; 004.67; 519; 532-539; 544; 62; 621; 662; 669; 681; 33; 15.010; 63
ББК 22.3; 22.34я431; 22.379я431; 30вб; 31.3; Б в672я431; Ю9; 40я431

ISBN 978-5-4437-1442-4
DOI 10.25205/978-5-4437-1442-4

© SB RAS, 2023
© Novosibirsk State University, 2023

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 *Д. А. Бунтин*
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. *D. A. Bountin*
Cand. Phys.-Math. Sci. *A. S. Vereshchagin*
Cand. Phys.-Math. Sci. *G. V. Shoev*
Cand. Phys.-Math. Sci. *A. A. Filippov*

УДК 533

Нанесение наноструктурированного покрытия с использованием МГД-ускорителя

Т. И. Гареев

Новосибирский государственный университет

В работе описаны физико-химические принципы получения наноразмерных частиц из различных материалов с использованием импульсного дискового магнитогидродинамического ускорителя. Изложена схема эксперимента. Описаны методы измерений и исследования покрытий, получаемых в результате эксперимента. Приведены результаты анализа покрытий: морфология, элементный состав и механические свойства.

Работа выполнена на МГД-ускорителе, описанном в [1]. Экспериментальная установка предназначена для генерации плазменных потоков заданного состава и плотности энергии. Для получения напыления используется возможность ускорять поток газа до скоростей порядка 10 км/с.

Субмикронное покрытие на поверхности образуется из химических элементов, вносимых в ускоряемый газ, при натекании плазмы на поверхность. При этом имеется возможность внесения прекурсора в жидкой фазе с последующим его испарением. В предшествующих работах рассматривалась возможность получения алмазоподобных пленок при осаждении углеродосодержащей плазмы [2].

В текущем исследовании приведены результаты использования жидкого прекурсора $TiCl_4$ и азота в качестве плазмообразующего газа для получения нитрида титана.

1. Поздняков Г. А. Дисковый газофазный магнитогидродинамический ускоритель // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 11. С. 52–56.

2. Golubov A. I., Katsnelson S. S., Pozdnyakov G. A. Interaction of a Highenthalpy Plasma Jet with Surfaces and Chemically Active Media // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. Vol. 38, № 8. P. 1840–1849.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Г. А. Поздняков

УДК 532.526.4

Расчеты двухпараметрических профилей скорости пограничного слоя для трехмерных течений

Н. В. Демиденко

Новосибирский государственный университет

Сглаживание профилей скорости, основанное на физике течения, может улучшить нахождение положения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) на обтекаемом потоком теле без увеличения количества узлов расчетной сетки. Для увеличения точности аппроксимации предлагается использовать профили из двухпараметрического семейства профилей, которое является расширением классического семейства автомодельных профилей пограничного слоя скользящего клина Фокнера — Скэн — Кука. Рассмотрение ограничено случаем несжимаемого потока.

В ИТПМ СО РАН разрабатывается программный комплекс LOTRAN для расчета положения ЛТП в пограничных слоях течений вязкой сплошной среды [1]. LOTRAN использует ANSYS Fluent, рассчитывающий основное течение. Проблемой является применение в LOTRAN линейной интерполяции данных о скорости из ANSYS Fluent на нормали к поверхности обтекаемого потоком тела. Использование сглаживания профилей скорости, основанного на физике течения, может помочь улучшить качество прогноза положения ЛТП на обтекаемом потоком теле без увеличения количества узлов расчетной сетки и времени расчета. Чтобы аппроксимировать профили скорости, ранее иногда использовались автомодельные профили.

В данной работе предлагается применять профили из двухпараметрического семейства профилей [2], подмножеством которого являются профили, получаемые при решении автомодельных уравнений Фокнера — Скэн — Кука (однопараметрическое семейство), когда второй параметр равен нулю. Для сравнения результатов предлагается использовать аппроксимацию профилей из ANSYS Fluent профилями из этих семейств методом наименьших квадратов. Исследования проводились на нормали вдоль выбранной линии тока вытянутого сфероида, находящегося под углом атаки, и скользящего крыла.

1. Инженерное моделирование ламинарно-турбулентного перехода: достижения и проблемы (обзор) / А. В. Бойко, С. В. Кириловский, А. А. Маслов и др. // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 5. С. 30–49.
2. Gaster M. A two-parameter family of laminar boundary layer profiles on swept wings // AIAA Paper. 2008. No. 4335. 6 p.

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

УДК 532.1+616.1

Численное моделирование расслоения аорты

А. Д. Ерохин

Новосибирский государственный университет

Расслоение аорты — серьезное заболевание, при котором разрывается внутренний слой стенки аорты, а затем кровь устремляется через расщелину, что приводит к расслоению внутреннего и среднего слоя. Несмотря на методы диагностики и современные методы хирургического лечения (стентирование), это заболевание часто приводит к летальному исходу. Однако быстрые и точные численные методы могут быть полезны для клиницистов в выборе подходящего лечения или хирургической стратегии для отдельных пациентов. Для успешного проведения операции необходимо уметь предсказывать взаимодействие кровотока и слоев стенок аорты в зависимости от того или иного типа расслоения, а компьютерное моделирование реального расслоения аорты может этому способствовать.

В данной работе для моделирования аорты мы пользовались программным обеспечением COMSOL Multiphysics, где применялась механика сплошной среды для анализа расслоения аорты и соответствующих моделей потока жидкости в здоровой аорте и через ее расслоение. Была разработана параметрическая модель здоровой аорты с заданными граничными условиями, соответствующими медицинским данным [1] (средняя скорость течения и расход крови, давление, реальные размеры и материалы), а затем были смоделированы три основных типа расслоения аорты. Для приближения нашей модели к реальной аорте, помимо граничных условий, в геометрии слоев учитывались углы между волокнами: 29° для срединного слоя и 62° для внешнего [2], а также взаимодействие между слоями и турбулентность потока крови. Теоретической основой работы является механика жидкости и механика деформируемого тела. Основной метод, использованный в работе, — метод конечных элементов, применяемый для решения системы.

По результатам моделирования нам удалось получить численные значения давления на стенки, механических напряжений внутри, между слоями и на внешний слой аорты при разных типах ее расслоения. Также нам удалось оптимизировать геометрию и сетку модели и, соответственно, добиться минимального времени расчета.

1. Menichini C. Mathematical Modelling of Thrombus Formation in Type B Aortic Dissection. L.: Imperial College London, 2018.
2. Медведев А. Е., Самсонов В. И., Фомин В. М. О рациональной структуре кровеносных сосудов // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 3. С. 24–30.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. А. Е. Медведев

УДК 535.36; 551.501.776

Программная реализация алгоритма расчета параметров дрейфа самолетных следов с применением данных радиозондового зондирования и реанализа ERA5

О.Ю. Локтюшин

Томский государственный университет

Неточность прогнозов погоды и климата связана с рядом малоизученных атмосферных процессов и явлений. К их числу относятся облака верхнего яруса (ОВЯ), включая конденсационные следы самолетов. Самолетные следы, существующие дольше 10 минут, и образованные из них перистые облака признаны Всемирной метеорологической организацией единственным типом искусственных кристаллических облаков [1]. Как и в естественных ОВЯ, в таких аэрозольных образованиях несферические ледяные частицы могут иметь преимущественную пространственную ориентацию.

Оценка микроструктуры облаков выполняется при помощи поляризационного лидара НИ ТГУ. Лидар позволяет получать полную матрицу обратного рассеяния света [2]. Эта характеристика содержит в себе информацию о микроструктуре рассеивающего объема. Для интерпретации результатов лидарных измерений используются данные аэрологических станций Новосибирска и Колпашево, а также данные реанализа ERA5. Преимуществом реанализа ERA5 как источника вертикальных профилей метеовеличин является более высокое пространственно-временное разрешение.

Для выявления условий, при которых образуются долгоживущие конденсационные следы с преимущественной горизонтальной ориентацией ледяных частиц, необходимо накопить массив сопоставленных лидарных, траекторных и метеорологических данных. С этой целью разработан и программно реализован алгоритм расчета дрейфа следов под действием ветра, в котором используются данные как аэрологических станций, так и реанализа ERA5. В докладе приводятся примеры результатов обработки экспериментальных данных и их анализ.

1. Kärcher B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus // Nat. Commun. 2018. No. 9. P. 1824.

2. Самохвалов И. В., Кауль Б. В., Насонов С. В. и др. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. И. В. Самохвалов

УДК 532.593.2, 533.6.011.5

Явление гистерезиса при взаимодействии косых гидравлических прыжков на мелкой воде

У. В. Михайлова

Новосибирский государственный технический университет

Активное развитие сверхзвуковых летательных аппаратов обуславливает актуальность задач, связанных с различными ударно-волновыми структурами. Одной из таких задач является переход между двумя типами отражения: регулярным (РО) и маховским (МО). Границы их существования определяются так называемыми критериями перехода: критерий механического равновесия α_N является наименьшим углом падения, при котором может существовать маховская конфигурация, а критерий максимального угла поворота α_D — максимальным углом падения скачка, при котором возможно регулярное отражение. Внутри области $\alpha_N \leqslant \alpha \leqslant \alpha_D$ теоретически возможно как РО, так и МО. Следствием существования области двойного решения является явление гистерезиса. Однако его изучение в воздушном потоке сильно затруднено, поэтому было принято решение заменить воздушную среду на мелкую воду.

В представленной работе были аналитически получены критерии перехода между РО и МО на мелкой воде. Помимо α_N и α_D, приводятся теоретические значения звукового критерия α_S. Графическое представление результатов в виде кривых зависимостей от числа Фруда Fr позволило выдвинуть гипотезу о том, что добиться смены типа отражения можно двумя способами: изменяя угол наклона клина или варьируя число Фруда набегающего потока.

Было проведено численное моделирование взаимодействия гидравлических прыжков в канале, сужающаяся часть которого образована двумя наклонными поверхностями (клиньями), симметрично установленными под углом θ. В первой серии экспериментов изменялся угол наклона клина при постоянном числе Фруда набегающего потока $Fr = 5$. Во второй серии экспериментов менялось число Фруда набегающего потока, а угол наклона клина оставался постоянным $\theta = 20°$. Экспериментальные критерии перехода в обоих случаях оказались близкими к теоретическим.

В представленной работе определена точная верхняя граница области двойного решения — угол падающего скачка $\alpha = \alpha_D$. Помимо этого, впервые получены теоретические значения звукового критерия перехода α_S. Также было доказано, что РО $\leftrightarrow$ МО переход может происходить не только в результате смены угла наклона падающего гидравлического скачка, но и при изменении числа Фруда набегающего потока.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. Н. Кудрявцев

УДК 532.526

Прямое численное моделирование нестационарных вихрей Гёртлера в сжимаемом пограничном слое на вогнутой пластине

М. С. Николаев

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

Проблема определения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) пограничного слоя является одной из актуальных задач аэрогазодинамики. На данный момент нет универсальных и надежных методов определения ЛТП для сжимаемых пограничных слоев. Поэтому необходимо изучить причины возникновения перехода и методов локализации его положения.

На возникновение и развитие ЛТП влияют различного рода неустойчивые возмущения. В представленной работе рассматриваются вихри Гёртлера — парные продольные структуры, возникающие внутри пограничного слоя на вогнутой поверхности.

Цель работы — исследование нестационарных вихрей Гёртлера в сжимаемом пограничном слое на вогнутой поверхности. В рамках исследования был проведен подбор геометрии модели (вогнутой пластины) для обеспечения нарастания вихрей и отсутствия отрыва пограничного слоя. Проведено численное моделирование обтекания модели сжимаемым газом при числе Маха 3,8 в двумерной и трехмерной постановке. Проведено прямое численное моделирование модели с источником стационарных и нестационарных искусственных возмущений синусоидальной формы различной амплитуды, с длиной волны, характерной для неустойчивости Гёртлера. Результаты расчетов показали экспоненциальный рост введенных возмущений в условиях моделирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-19-00393.

Научный руководитель — С. О. Морозов

УДК 533.2, 542.7

Исследование проницаемости и сорбционной емкости полых микросферических частиц из силикатных материалов по отношению к водороду

К. Э. Прокопьев

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, предложенная в ИТПМ СО РАН, основана на использовании в качестве мембранных элементов полых микросферических частиц из силикатных материалов и сорбентов на их основе. Вследствие этого такие частицы могут применяться 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 водородно-гелиевых смесей.

Цель работы — экспериментальное изучение водородной проницаемости и сорбционной емкости различных типов полых микросферических частиц из силикатных материалов, получение коэффициентов водородной проницаемости для исследуемых частиц, сравнение с ранее полученными коэффициентами гелиевой проницаемости [3].

1. Аппен А. А. Химия стекла. Л.: Химия. Ленингр. отд-ние. 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 // Инж.-физ. журн. 2016. Т. 89. С. 24–36.

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

УДК 532.526

Численное исследование влияния радиуса кривизны вогнутой пластины на устойчивость сжимаемого ламинарного пограничного слоя

Е. Д. Шаманов

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

Пограничный слой — тонкий пристенный слой жидкости или газа, где проявляются эффекты вязкости. Ламинарный пограничный слой устойчив только при некоторых очень особенных условиях. В общем же случае в таком пограничном слое возникают возмущения. Если эти возмущения затухают вниз по потоку, то течение считается устойчивым, но если они продолжают нарастать, то могут спровоцировать ламинарно-турбулентный переход.

На основании уравнений линейной устойчивости сжимаемого пограничного слоя из работы [1] с добавлением слагаемых, отвечающих за кривизну поверхности, создана программа для расчета коэффициентов нарастания пространственных возмущений с различной частотой и фазовой скоростью. По полученным коэффициентам роста определены N-факторы роста возмущений первой/второй мод Мэка и вихрей Гёртлера. В настоящей работе рассматривается пограничный слой на модели, состоящей из плоской пластины и следующей за ней вогнутой пластины с постоянным радиусом кривизны. Варьировались соотношение длин прямой и вогнутой части, а также радиус кривизны. Показано, что в пограничном слое при исследуемых параметрах больше всего нарастают возмущения первой/второй мод Мэка. На вогнутой поверхности вихри Гертлера нарастают быстрее мод Мэка, но за счет меньшей области роста их N-фактор остается меньше для всех исследованных радиусов кривизны.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-19-00393.

1. Бойко А. В., Демьянко К. В., Нечепуренко Ю. М. О расчете положения ламинарно-турбулентного перехода в пограничных слоях с учетом сжимаемости // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2015. № 81. 21 с.

Научный руководитель — С. О. Морозов

УДК 531.4

Определение механических характеристик гетерогенного материала при трехточечном изгибе

П. А. Шупик

Новосибирский государственный университет

Материалы, сочетающие в себе прочность и легкость, находят широкое применение во многих отраслях промышленности, например, деревянные композиты на основе легких пород деревьев активно используются для создания сердечников в конструкциях лыж и сноубордов. Достижение наилучших физико-механических свойств является актуальной задачей многих конструкторов.

Цель данной работы — определить оптимальную концентрацию материалов в композите из бальсы и липы для получения минимальной массы при сохранении высоких модулей упругости и прочности. В качестве образцов для испытаний деревянных сердечников использовались балки из склеенных реек бальсы и липы. Объемное содержание пород деревьев и ширина реек варьировались. Механические испытания на трехточечный изгиб проводились для образцов размерами 400 × 70 × 10 мм. Для прогнозирования предела прочности и модуля упругости была использована модель Фойгта. Построены и сравнены с теоретическими значениями графики отношений плотностей, модулей упругости и прочностей от концентрации бальсы. Получено хорошее совпадение модели Фойгта для оценки прочности и модуля упругости деревянного композита с экспериментальными данными во всем диапазоне концентраций.

Для трехточечного изгиба наименьший прогиб балки при фиксированном весе дает материал с минимальным параметром $\frac{\rho}{\sqrt[3]{E}}$.

В случае композитного материала данный параметр запишется в виде

$$\frac{\rho}{\sqrt[3]{E}} = F\left(k_1\right) = \frac{k_1\rho_1 + \rho_2 - k_1\rho_2}{\sqrt[3]{k_1E_1 + E_2 - k_1E_2}}.$$

Для определения оптимальной концентрации материала была взята и приравнена к нулю производная, затем была выражена концентрация

$$k_1 = \frac{3E_1\rho_2 - \rho_1E_2 - E_2\rho_2}{2E_2\rho_1 + 2\rho_2E_1 - 2E_2\rho_2 - 2\rho_1E_1}.$$

Для исследуемых материалов экстремум в пределах прочности от 0 до 1 не был получен, что позволяет сделать следующий вывод: в представленном композите для получения оптимальных удельных прочности и модуля упругости стоит использовать только бальсу.

1. Кристенсен Р. М. Ведение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 336 с.
2. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 336 с.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Филиппов

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
д-р физ.-мат. наук, проф. *Е. В. Бакланов*
д-р техн. наук *В. П. Корольков*
канд. физ.-мат. наук, доц. *Б. Н. Нюшков*
чл.-корр. РАН *И. И. Рябцев*
чл.-корр. РАН, проф. *М. П. Федорук*
д-р физ.-мат. наук, проф. *П. Л. Чаповский*
д-р физ.-мат. наук *Д. В. Чуркин*

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
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. *E. V. Baklanov*
Dr. Eng. Sci. *V. P. Korolkov*
Cand. Phys.-Math. Sci., Assoc. Prof. *B. N. Nyushkov*
Corr. Member RAS *I. I. Ryabtsev*
Acad. RAS, Prof. *M. P. Fedoruk*
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. *P. L. Chapovsky*
Dr. Phys.-Math. Sci. *D. V. Churkin*

УДК 535.8

Solving the Travelling Salesman Problem using a Quantum Computer

Chen Junxi

Novosibirsk State University

Quantum computing is widely acknowledged as a revolutionary paradigm in computational technology, which enables significant speedup over classical computing for wide range of problems. The power of quantum computing originates from quantum algorithms, which can achieve substantial speedups on certain computing tasks thanks to quantum superposition.

The Travelling Salesman Problem (TSP) is one of the most well-known NP-hard combinatorial optimization problems. This problem considers a number of cities connected by paths of various lengths, and the salesman tries to determine the shortest cyclic tour that visits each city exactly once.

Our aim is to use quantum algorithms to solve the TSP. Following the proposal [1], we design the unitary matrix which encodes each path and use a quantum phase estimation algorithm to determine the cost of this path. The unfinished solution of TSP using a quantum computer is published on the website of Qiskit library [2].

After estimation of the costs of different paths we use a modification of a Grover-Long algorithm to find the minimum in the unsorted database of different path costs [3].

We used IBM Qiskit library and Aer quantum simulator from IBM to write a code for solving a TSP. We obtained correct estimates for the costs of the paths using quantum phase estimation and designed the code for 2-qubit and 6-qubit Grover-Long algorithm using Qiskit library, following Ref.[3]. This code will be used for solving TSP.

Our work is related to the recent progress in experimental implementation of quantum gates with neutral atoms [4] which requires finding the quantum algorithms most suitable for atomic systems.

1. Srinivasan K., Satyajit S., Behera B. K., Panigrahi P. K. Efficient quantum algorithm for solving travelling salesman problem: An IBM quantum experience // arXiv:1805.10928v1. 2018.
2. https://qiskit.org/textbook/ch-paper-implementations/tsp.html
3. Chen Y., Wei S., Gao X. et al. An Optimized Quantum Maximum or Minimum Searching Algorithm and its Circuits // arXiv:1908.07943. 2019.
4. Beterovabc I. I., Yakshinaab E. A., Tret'yakovab D. B. et al. Implementation of one-qubit quantum gates with individual addressing of two rubidium atoms in two optical dipole traps // Quantum Electron. 2021. Vol. 51 (6). P. 464–472.

Scientific supervisor — Dr. I. I. Beterov

УДК 530.145

Reducing laser phase noise for enhanced fidelity in Rydberg gates

Navjeet Kour[1,2], Daniil Svirsky[2,3], Evgeny Lomov[3]

[1]Moscow Institute of Physics and Technology
[2]Russian Quantum Center
[3]Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Quantum computing holds the potential to solve complex computational problems that classical methods are incapable of resolving [1]. However, a substantial number of logical qubits are needed for the actual implementation of quantum algorithms, and this necessitates a large improvement in quantum gate fidelities. Single atoms in optical traps is one of the promising platforms for quantum computing. This system has long coherence times, high-fidelity single qubit gates, and beyond nearest neighbors connectivity.

Most proposals for high-fidelity two-qubit gates for neutral atoms rely on strong interaction in highly excited Rydberg states. The excitation is typically achieved through the use of laser light. However, the presence of laser noise greatly impacts the quality, reducing efficiency and accuracy of coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states. The noise arises due to instabilities in the laser source, phase drifts in the optical path, and technical limitations in the laser control and stabilization systems [2]. In order to minimize the effect of laser phase noise and improve the coherence of Rydberg excitation, we propose to use high-finesse filtering cavities.

We discuss a design and perform a preliminary test of a tunable filter cavity to explore the impact of finite phase noise in excitation lasers on the damping of oscillations in a Rydberg atom system. The experimental setup uses two extended-cavity diode lasers and locks the phases using the Pound — Drever — Hall technique [2]. We have performed simulations to validate our estimate of the phase noise and its effect on the system, which gives us the finesse of 30,000 approximately. The cavity parameters are characterized by cavity ringdown spectroscopy and compared to a numerical model taking into account diffraction and scattering losses.

1. Brun T. A. Quantum Computing // Blum E., Aho A. (eds) Computer Science. N. Y.: Springer, New York, 2011. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1168-0_14
2. Léséleuc S., Barredo D., Lienhard V., Browaeys A., Lahaye T. Analysis of imperfections in the coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states // Phys. Rev. A. 2018. Vol. 97. 053803.

Scientific supervisor — prof. S. S. Straupe

УДК 535.3

Оптическая связь межслоевых экситонов в тонких пленках с резонансными кремниевыми наноструктурами

Т. В. Антипов, А. Д. Гартман

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

В последние годы широкое применение в квантовых технологиях находят твердотельные однофотонные излучатели, к наиболее распространенным из которых относятся центры окраски, квантовые точки, углеродные нанотрубки. Все эти материалы имеют свои недостатки и преимущества, однако в данной работе рассматриваются тонкие пленки таких материалов, как дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), которые являются перспективными излучателями для соединения с интегральной фотоникой. Совмещение подобных пленок с волноводными интегральными структурами может служить перспективной платформой для неклассических источников света на чипе.

Источником однофотонного излучения в ДПМ являются локализованные экситоны — связанные состояния электрона и дырки, следовательно, излучение подобного источника имеет дипольный характер. Чаще всего такой диполь ориентирован случайным образом в плоскости пленки материала, что приводит к большим потерям и низкой эффективности заведения излучения непосредственно на оптический чип.

Решением могут стать поперечно-ориентированные экситоны, которые возникают, например, в тонких пленках InSe или гетероструктурах из монослоев ДПМ, где электрон и дырка разделяются по слоям и создают диполь, ориентированный вне плоскости. Такие дипольные излучатели могут обеспечить более эффективную связь с модами волновода.

В данной работе была исследована интеграция экситонных излучателей в пленках InSe с резонансными волноводными структурами, состоящими из полосковых кремниевых волноводов с центральной частью в виде цепочки кремниевых нанодисков. Эффективность оптической связи дипольных источников со структурами рассчитывалась из сравнения интенсивности фотолюминесценции, выведенной через дифракционную решетку на конце волновода, для волноводной системы с нанодисками и случая сплошного кремниевого волновода такой же ширины. Экспериментально показано увеличение детектируемого на выходе волновода сигнала фотолюминесценции пленки InSe на длине волны 950 нм, соответствующей экситонному переходу в InSe, в 45 раз в случае волновода с цепочкой Ми-резонансных кремниевых нанодисков. Полученный результат может быть использован в дальнейшем для различных приложений интегральной фотоники.

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

УДК 621.373.826

Создание импульсного волоконного лазера для спектроскопии 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 требуется широкополосный источник инфракрасного излучения, для спектрального анализа которого необходимо 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».

Настоящая работа направлена на создание импульсного волоконного лазера, генерирующего вблизи длины волны 1520 нм для решения задачи определения концентрации примесного аммиака в воздухе с помощью дисперсионного преобразования Фурье. Для генерации рассмотрены различные схемы пассивной синхронизации мод. В качестве усиливающей среды было выбрано волокно, легированное ионами эрбия, так как максимум спектра усиления эрбия находится вблизи 1530 нм, т. е. вблизи требуемых длин волн. Перестройка генерации на разные длины волн осуществляется с помощью оптического фильтра на основе коллиматора с двойным волокном и дифракционной решетки. В рамках работы определены достижимые параметры генерации в таких схемах лазера, а также подготовлена измерительная установка для анализа концентрации газов с использованием смесителя газов и газовой ячейки.

1. Goda K., Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements // Nat. Photonics. 2013. Vol. 7, № 2. P. 102–112.
2. Zhdanov I. S. et al. Energy scaling of an erbium-doped mode-locked fiber laser oscillator // OSA Continuum. 2021. Vol. 4, № 10. P. 2663–2670.

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

УДК 535.3, 535.4

Формирование и исследование бесселевых пучков в среднем ИК-диапазоне

Н. А. Баздырев

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

В настоящее время наблюдается спрос на увеличение скорости и объемов беспроводной передачи данных. Требуется модернизация старых технологий и поиск новых методик для решения данной задачи. Одной из таких методик является применение пучков с орбитальным угловым моментом, так называемых оптических вихрей. Оптические вихри, обладающие бесселевой модой, имеют ряд преимуществ, такие как «бездифракционность» и «самовосстановление», что делает их устойчивыми к оптическим флуктуациям среды (тепловых, конвекционных, мелкодисперсных аэрозолей и др.) Для обеспечения высокой скорости передачи информации предполагается использование среднего ИК-диапазона, поскольку в этом частотном диапазоне происходит увеличение пропускной способности и уменьшение рассеивания в пространстве за счет большой длины волны.

В данной работе представлены результаты по формированию и исследованию бесселевых пучков с топологическим зарядом $l = +5$. В качестве источника использовался квантово-каскадный лазер, генерирующий излучение Гауссовой моды в среднем ИК-диапазоне на длине волны 8,45 мкм. Для формирования бесселевых пучков применялся изготовленный из подложки высокоомного кремния методом ионно-плазменного травления бинарный фазовый дифракционный оптический элемент, работающий как аксикон. Пучки, проходя через аксикон, формировались и сохраняли свое распределение интенсивности на расстоянии $z = 400 \div 1300$ мм.

В результате работы были определены экспериментальные и расчетные диаметры внутренних колец распределения интенсивности бесселева пучка, обладающего топологическим зарядом $l = +5$, в свободном пространстве и в фокальной плоскости линзы ($F = 100$ и 200 мм). Сравнение экспериментальных диаметров колец с рассчитанными аналитически показало согласие между ними в пределах экспериментальной погрешности.

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

УДК 535.4

Исследование пространственно-временной динамики при распространении импульсного лазерного излучения в семисердцевинном волокне в линейном режиме

Н. В. Бочкарев

Новосибирский государственный университет

Многосердцевинные волокна в последнее время пользуются особым вниманием в контексте вечно растущих требований к пропускной способности телекоммуникационных сетей [1]. Помимо этого, интерес к таким волокнам лежит и в области фундаментальной физики. Теоретические предсказания, такие как временное сжатие и когерентное объединение импульсов [2, 3], нуждаются в экспериментальной проверке. В связи с этим актуальными являются задачи введения импульсного лазерного излучения во все сердцевины волокна одновременно, с возможностью контроля параметров вводимого в волокно излучения, и изучения динамики структурированного излучения при его распространении.

Цель данной работы — исследование пространственно-временной динамики при распространении импульсного лазерного излучения в семисердцевинном волокне в линейном режиме, а именно перераспределение энергии между сердцевинами и изменение длительности импульсов на выходе. Собрана экспериментальная установка, включающая пространственный модулятор света, автокоррелятор, камеру и измеритель мощности. Введено импульсное лазерное излучение во все сердцевины волокна с возможностью вариации распределения интенсивностей между сердцевинами волокна. Эффективность заведения в настоящее время составляет 32,4 %. Набрана статистика распределения мощности на выходе волокна в зависимости от условий заведения излучения, сделан вывод, что распределения мощностей на выходе из волокна не зависят от условий заведения в линейном режиме. Планируется провести эксперименты по измерению автокорреляционных функций выходных пучков.

1. Richardson D. J., Fini J. M., Nelson L. E. Space-division multiplexing in optical fibres // Nat. Photonics. 2013. Vol. 7, № 5. P. 354–362.
2. Rubenchik A. M. et al. Nonlinear pulse combining and pulse compression in multi-core fibers // Opt. Lett. 2015. Vol. 40, № 5. P. 721–724.
3. Chekhovskoy I. S. et al. Nonlinear discrete wavefront shaping for spatiotemporal pulse compression with multicore fibers // JOSA B. 2018. Vol. 35, № 9. P. 2169–2175.

Научный руководитель — М. Д. Гервазиев

УДК 543.4

Оптические свойства полуорганического кристалла GUHP, перспективного для генерации терагерцового излучения

С. А. Бычкова

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

В настоящее время не решена проблема создания компактных источников ТГц-излучения с высокой спектральной яркостью. Один из методов генерации ТГц-излучения — оптическое выпрямление ультракоротких лазерных импульсов в кристаллах с высоким значением нелинейно-оптического коэффициента, в качестве которого предлагается к исследованию новый моноклинный полуорганический кристалл гидрофосфата гуанилмочевины (GUHP) [1].

В данной работе исследованы показатель преломления и поглощение кристалла в видимом и терагерцовом спектрах излучения. Исследована обусловленная моноклинной сингонией частотная зависимость вращения главных оптических осей кристалла относительно кристаллографических для обоих диапазонов.

Показано отсутствие дисперсии угла поворота главных оптических осей кристалла в диапазоне 420–1064 нм при исследовании с использованием излучения параметрического генератора света «Solar LS» LQ529A-LP601. Измерен спектр пропускания кристалла в диапазоне от 300 до 850 нм в поляризованном свете для осей *x* и *z* на двухканальном спектрофотометре Shimadzu UV-2501.

При исследовании дисперсии угла поворота главных оптических осей кристалла с помощью излучения перестраиваемого ТГц-источника TeraScan в диапазоне 300–900 ГГц показана линейная зависимость 2,3° на 100 ГГц. С помощью импульсного широкополосного терагерцового спектрометра исследованы спектры показателя преломления и коэффициента поглощения кристалла в диапазоне 0,2–2,2 ТГц. Впервые охарактеризованы пики поглощения оси *x* в окрестности 1,43 и 1,88 ТГц.

Полученные результаты будут полезны специалистам для разработки нелинейно-оптических генераторов ТГц-излучения на базе кристалла GUHP.

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

1. Sinko A. 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 535.4

Двухволновой импульсный лазер с квазисинхронной накачкой

Г. Е. Вишняков

Новосибирский государственный университет

Двухволновая генерация на разных длинах волн представляет интерес для таких сфер, как лидарные измерения, генерация разностных частот в среднем ИК-диапазоне, когерентная рамановская спектроскопия. Типичные методы получения двухволновой генерации: применение различных активных сред в одном резонаторе, внутрирезонаторная и внешне резонаторная генерация комбинационного рассеяния. Однако реализация указанных методов для генерации в одном резонаторе осложнена необходимостью компенсировать групповую задержку между излучениями с различными длинами волн.

В данной работе представлен лазер с синхронизированной двухволновой импульсной генерацией за счет компенсации групповой задержки генерируемых излучений путем управления скоростью распространения импульсов основной длины волны при квазисинхронной накачке [1, 2]. Продемонстрировано, что за счет ускорения импульсов накачки на длине волны 1067 нм путем завышения частоты квазисинхронной накачки возможна компенсация групповой задержки при каждом обходе резонатора. Показано, что квазисинхронная накачка обеспечивает стационарную двухволновую импульсную генерацию, несмотря на значительную дифференциальную групповую задержку, возникающую между импульсами с различными длинами волн (на длине волны накачки 1067 нм и стоксовой длине волны 1240 нм) во время их внутрирезонаторного обхода. Показано, что частоты обхода резонатора для импульсов с длиной волны 1067 и 1240 нм совпадают с высокой точностью.

1. Nyushkov B., Ivanenko A., Smirnov S., Kobtsev S. High-energy pulses from all-PM ultra-long Yb-fiber laser mode-locked with quasi-synchronous pumping // Opt. Fiber Technol. 2021. Vol. 66. 102650.

2. Smirnov S., Nyushkov B., Ivanenko A. et al. Shaping of nanosecond pulses in ytterbium fiber lasers by synchronous sine-wave pump modulation // JOSA B. 2020. Vol. 37, № 10. P. 3068–3076.

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

УДК 535.015

Экспериментальное и численное исследование параметров диссипативных ВКР-солитонов, генерируемых во внешнем волоконном резонаторе с накачкой от эрбиевого лазера с синхронизацией мод

В. М. Волоси

Новосибирский государственный университет
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Одними из активно применяемых типов лазеров являются волоконные генераторы ультракоротких импульсов, отличающиеся большой эффективностью по накачке, компактностью и отсутствием элементов объемной оптики, требующих регулярной юстировки [1]. Данный тип лазеров особенно интересен для анализа биологических объектов. Так, например, актуальными являются источники излучения на длинах волн 1,3 и 1,6–1,7 мкм, ввиду наличия в данных спектральных областях так называемых окон прозрачности воды [2]. Для получения таких импульсов могут использоваться различные нелинейные эффекты, в частности генерация импульсов на сдвинутой длине волны за счет вынужденного комбинационного рассеяния (диссипативные ВКР-солитоны).

В ходе работы было выполнено моделирование распространения импульсов накачки во внешнем волоконном резонаторе с целью исследования их характеристик и улучшения качества генерируемых ВКР-солитонов. В качестве импульсов накачки выступали сильночирпованные диссипативные солитоны с центральной длинной волны 1,55 мкм. Варьируемыми параметрами являлись: мощность импульса накачки, коэффициент обратной связи, а также центральная длина волны диссипативных ВКР-солитонов, подстройка которой проводилась за счет изменения временной задержки импульса. Расчетные данные хорошо согласуются с результатами эксперимента.

На конференции будут представлены результаты моделирования ВКР-солитонов на длинах волн вблизи 1,66 мкм и данные, полученные по итогам проведенных экспериментов. Также получены зависимости характеристик диссипативных ВКР-солитонов от мощности импульса накачки и подстройки длин резонаторов.

1. Харенко Д. С., Бабин С. А. Генерация диссипативных солитонов в волоконных фемтосекундных лазерах // Автометрия. 2013. Т. 49, № 4. С. 100–120.
2. Xu C., Wise F. W. Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy // Nat. Photonics. 2013. Vol. 7, № 11. P. 875–882.

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

УДК 535-14

Импульсная терагерцовая спектроскопия диэлектрических материалов и слоя фотовозбужденных носителей зарядов

Д. С. Грибанов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Растущий интерес к терагерцовому (ТГц) электромагнитному диапазону обусловлен в том числе развитием систем беспроводной связи. Например, считается, что будущие поколения связи (6G и т. д.) будут работать именно в терагерцовой области. Сейчас уже проведены первые эксперименты по передаче информации в данном диапазоне частот. Дальнейшее развитие подобных систем связи требует большой научно-технической базы. Необходимо изучать свойства различных материалов в данном диапазоне частот, а также развивать различные методы управления и модуляции терагерцового излучения.

В данной работе описана конструкция прибора генерации и детектирования терагерцовых импульсов. Также описаны методы обработки его сигналов. С целью изготовления ТГц дифракционных элементов из доступных материалов исследованы терагерцовые оптические свойства прозрачной офисной пленки и нанесенного на нее слоя чернил лазерного принтера. Создан регулируемый ТГц-фильтр на основе эффекта насыщения кремниевой пластины фотовозбужденными носителями заряда.

Показано наличие зависимости пропускной способности кремниевой пластины от концентрации свободных носителей заряда, а также оценены диэлектрические характеристики слоя красителя лазерного офисного принтера.

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

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

УДК 535.421

Преобразование амплитудных характеристик световых пучков электрически управляемыми трехслойными неоднородными голографическими дифракционными структурами с ФПМ-ЖК

В. О. Долгирев, Д. С. Растрыгин

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

На сегодняшний день оптика занимает важную роль в развитии современных информационных технологий, применяемых как в повседневной жизни человека, так и в промышленности и инфраструктуре. Поэтому поиск и разработка новых элементов для оптических устройств на сегодняшний день является актуальной задачей, стоящей перед учеными всего мира.

Многослойные неоднородные голографические дифракционные структуры (МНГДС) могли бы найти широкое применение в области оптики, например в качестве основных элементов оптических спектральных фильтров [1] или для генерации последовательности фемтосекундных лазерных импульсов [2].

В данной работе на основе разработанной теоретической модели дифракции света на электрически управляемых МНГДС, сформированных в фотополимерных материалах с нематическими жидкими кристаллами (ФПМ-ЖК), и численного моделирования продемонстрирована возможность преобразования амплитудных характеристик световых пучков трехслойной голографической дифракционной структуры (ГДС).

Установлено, что при воздействии на дифракционные слои электрическим воздействием с разной полярностью происходит смещение угловой селективности в противоположные стороны, а также ее трансформация. Изменение угла поляризации, отличного от поляризации собственных необыкновенных волн в образце, для считывающего излучения приводит дополнительно к дифракции на обыкновенных волнах, что влечет к появлению еще одного вида угловой селективности, соответствующей трехслойной ГДС без воздействия электрического воздействия. Таким образом, при воздействии электрического поля с разной полярностью на МНГДС с ФПМ-ЖК, а также при изменении поляризации считывающего пучка возможно трехкратно расширить спектральные свойства стандартных МНГДС.

1. Dudnik D. I., Semkin A. O., Sharangovich S. N. Interaction between Light and Transmission Multi-Layered Heterogeneous Photopolymer Holographic Diffraction Structures // Bull. Russ. Acad. Sci: Phys. 2021. Vol. 85. P. 8–14.
2. Yan X., Gao L., Yang X., Dai Y., Chen Y. and Ma G. Generation of individually modulated femtosecond pulse string by multilayer volume holographic gratings // Opt. Express. 2014. Vol. 22, № 21. P. 26128–26140.

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

УДК 53.08

Математическое описание процесса квантовых измерений в компьютерном симуляторе *Quantum Flytrap*

М. Д. Князев

Новосибирский государственный университет

Объектом исследования послужил компьютерный симулятор *Virtual Lab* компании *Quantum Flytrap*, позволяющий моделировать реальные оптические эксперименты с одиночными фотонами и лазером [1]. Этот симулятор был выбран, поскольку он корректно воспроизводит результаты экспериментов по квантовой оптике, выполненные в реальных лабораторных условиях [2]. Цель исследования — выяснить, какой математический аппарат был использован для описания необратимых процессов в виртуальной лаборатории, таких как поглощение фотона на поляризаторе или фильтре, регистрация фотона детектором одиночных фотонов.

В процессе исследования была проведена систематизация типов квантовых измерений, описанных в литературе [3–4]. Затем был проведен ряд модельных экспериментов в виртуальной лаборатории, чтобы проверить, какие из типов измерений наиболее точно соответствуют полученным результатам. По итогам анализа результатов модельных экспериментов был сделан вывод, что в симуляторе для описания необратимых процессов используются следующие математические модели измерений: проективные (поляризатор), POVM-измерения (детектор), неразрушающие (специальный детектор).

1. Виртуальная лаборатория. URL: https://lab.quantumflytrap.com/lab?mode=waves
2. Migdał P., Jankiewicz K., Grabarz P., Decaroli C., Cochin P. Visualizing quantum mechanics in an interactive simulation — Virtual Lab by Quantum Flytrap // Opt. Eng. 2022. Vol. 61.
3. Braginsky V. B., Voronstov Y. I., Thorne K. S. Quantum Nondemolition Measurements // Sci. 1980. Vol. 209.
4. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информатика. М.: Науч. мир, 2006.

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

УДК 535.8

Модуляция отстройки частоты лазера с помощью акустооптического модулятора в двухпроходной схеме

К. В. Козенко

Новосибирский государственный университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Лазерное охлаждение — это метод охлаждения ансамбля атомов за счет взаимодействия с лазерным излучением [1]. Данный метод находит широкое применение в области лазерной спектроскопии, в частности гравиметрии.

Для реализации охлаждения на нашей установке необходимо иметь способ плавной отстройки частоты в диапазоне порядка 40 МГц. Для стабилизации частоты лазерного излучения, а также в целях минимизации нагрузки на лазерный диод осуществляется внешняя перестройка на основе акустооптического модулятора (АОМ), использующего для изменения диэлектрической проницаемости бегущую акустическую волну. Для применения АОМ необходимо определить частоты, перестройка между которыми обеспечит максимальную интенсивность излучения на его выходе.

В результате данной работы было установлено, что наибольшая оптическая мощность наблюдалась в диапазоне работы АОМ от 70 до 110 МГц.

Так как при прохождении через модулятор излучение отклоняется на угол, зависящий от частоты модуляции, — угол Брэгга, то перестройка частоты приводит к выходу дифрагированного луча из оптической системы. В целях компенсации этого эффекта в рамках проделанной работы была собрана двухпроходная схема, состоящая из поляризационного делителя пучка и четвертьволновой пластинки [2].

1. Филипс У. Д. Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169, № 3. С. 305–322.

2. Donley E. A. et al. Double-pass acousto-optic modulator system // Rev. Sci. Instrum. 2005. Vol. 76, № 6. P. 063112.

Научный руководитель — А. О. Макаров

УДК 535.8

Исследование резонансов Ханле в атомах рубидия для применений в магнитометрии

К. С. Козлова

Новосибирский государственный университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

В настоящее время магнитометры находят применение во многих областях науки и технологий. Оптические магнитометры имеют ряд преимуществ перед другими типами магнитных сенсоров. В частности, высокая чувствительность, малый размер, работа при комнатной температуре, низкая цена по сравнению с другими типами магнитометров, а также некоторые типы оптических магнитометров позволяют измерять абсолютное значение магнитного поля [1].

Основным параметром оценки чувствительности магнитометра является магнитооптический резонанс. Важные характеристики резонанса — это его ширина и контраст по отношению к сигнал-шуму. В данной работе изучались резонансы Ханле в однопроходной схеме. В установке использовался полупроводниковый лазер с внешним резонатором, ячейка размерами 5 мм с щелочным металлом ^{87}Rb, буферным газом N_2 300 Торр, синусоидальная термостабилизация на нагревательных шлейфах, фотоприемник. При модуляции внешнего магнитного поля катушками Гельмгольца регистрировался магнитооптический резонанс типа Ханле [2].

В результате работы были определены оптимальные параметры установки для наблюдения резонансов Ханле с наибольшим контрастом и наименьшей шириной: диаметр пучка и плотность мощности излучения, температура ячейки.

1. Brazhnikov D. V. et al. High-quality electromagnetically-induced absorption resonances in a buffer-gas-filled vapour cell // Laser Phys. Lett. 2018. Vol. 15.
2. Brazhnikov D. V. et al. Electromagnetically-induced-absorption resonance with high contrast and narrow width in the Hanle configuration // Laser Phys. Lett. 2014. Vol. 11.

Научный руководитель — А. О. Макаров

УДК 628.9

Анализ эффективности выращивания тепличного базилика с помощью компьютерного зрения

В. А. Колесникова, Н. С. Дашиева

Томский политехнический университет

Компьютерное зрение является крупным прорывом и имеет большой потенциал для дальнейшего развития. Данная технология уже используется в растениеводстве, например для проведения мониторинга качества урожая. Однако на данный момент из-за отсутствия достаточного количества информации и результатов исследований компьютерное зрение используется только в экспериментальных либо небольших частных теплицах [1–2]. В связи с этим целью данной работы является оценка эффективности применения технологий компьютерного зрения при выращивании тепличного базилика в условиях светокультуры.

В ходе исследования экспериментальные образцы базилика помещались в изолированные ячейки фитотрона с одинаковыми климатическими условиями (t = 22 °C, влажность 70–80 %). Освещение в каждой ячейке подбиралось таким образом, чтобы облученность образцов была одинаковая. Спектральное распределение в каждой ячейке подбиралось индивидуально на основе литературного обзора и результатов прошлых экспериментов. В каждой ячейке была установлена веб-камера, которая один раз в минуту делала фотографию образцов. Полученные фотографии анализировались и обрабатывались по заранее написанному на языке Python алгоритму, который определял пространственное расположение исследуемого объекта и его геометрические характеристики (длину, ширину, площадь листьев).

Результаты эксперимента показали, что технологии компьютерного зрения при наличии базы данных смогут обеспечить эффективный контроль и оперативную диагностику выращиваемых растений. По итогам исследования предложено использование технологий компьютерного зрения в связке с интеллектуальной системой освещения, регулировка которой будет происходить на основе результатов обработки фотоизображений выращиваемого растения.

1. Сарсикеев Е. Ж. Анализ применения компьютерного зрения в растениеводстве. URL: https://kazatu.edu.kz/webroot/js/kcfinder/upload/files/наука/СЧ-17/Сарсикеев%20Е.Ж.pdf (дата обращения: 08.02.2023).
2. Компьютерное зрение становится основой агрономии будущего. URL: https://www.agroxxi.ru/selhoztehnika/stati/kompyuternoe-zrenie-stanovitsja-osnovoi-agronomii-buduschego.html/ (дата обращения: 08.02.2023).

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. С. Б. Туранов

УДК 535.543.4

Лазерное охлаждение ионов иттербия-171 в полихроматическом поле без применения магнитного поля

Д. С. Крысенко

Новосибирский государственный технический университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

В настоящее время методы лазерного охлаждения хорошо развиты и применяются для охлаждения и удержания нейтральных атомов и ионов, находящих широкое применение для различных областей современных исследований: спектроскопии сверхвысокого разрешения, создания квантовых сенсоров на основе атомных интерферометров [1, 2]. Одно из наиболее перспективных направлений, использующих холодные атомы и ионы, — развитие современных оптических стандартов частоты [3, 4], для создания которых ион $^{171}Yb^{+}$ является одним из главных кандидатов.

Стандартные методы лазерного охлаждения иона $^{171}Yb^{+}$ в радиочастотной ловушке предполагают использование когерентных световых полей, резонансных оптическим переходам линии $2S_{1/2}–2P_{3/2}$, а также использование магнитного поля [5, 6], позволяющего разрушить так называемое КПН-состояние на уровне $2S_{1/2}(F = 1)$. Однако впоследствии для проведения прецизионных метрологических измерений с использованием часовых оптических переходов (квадрупольного и октупольного), для исключения сдвигов частоты, связанных с магнитным полем, требуется его отключение и дальнейший прецизионный контроль остаточного магнитного поля.

Поэтому поиск новых методов лазерного охлаждения иона $^{171}Yb^{+}$ — это важная актуальная задача, что является ключевым шагом для дальнейшей реализации прецизионных методов опроса иона в ловушке.

В представленной работе предложен новый метод лазерного охлаждения иона иттербия-171, исключающий использование магнитного поля. Для глубокого лазерного охлаждения предлагается применять конфигурацию полихроматического поля. Выполнен численный расчет, а также представлены аналитические выражения, позволяющие определить оптимальные параметры световых полей для достижения наименьшей температуры лазерного охлаждения иттербия-171.

Работа поддержана РНФ (№ 23-22-00198).

1. Borde Ch. J. Atomic interferometry with internal state labelling // Phys. Lett. A. 1989. Vol. 140. P. 10.
2. Canuel B., Leduc F., Holleville D. et. al. Six-axis inertial sensor using cold-atom interferometry // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. P. 010402.
3. Gao K. The 40Ca+ ion optical clock // Nat. Sci. Rev. 2020. Vol. 7. P. 1799–1801.

4. Brewer S. M., Chen J. S. et al. $^{27}Al^{+}$ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10^{-18} // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 123. P. 033201.
5. Fisk P. T. H., Lawn M. A., Coles C. Laser cooling of $^{171}Yb^{+}$ ions in a linear paul trap // Appl. Phys. B: Lasers and Optics. 1993. Vol. 57. P. 287–291.
6. Прудников О. Н., Чепуров С. В. и др. Лазерное охлаждение ионов $^{171}Yb^{+}$ в частотно-модулированном поле // Квант. электрон. 2017. Т. 47. С. 806.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук О. Н. Прудников

УДК 621.373.826

Исследование процесса усиления в мощном криогенно-охлаждаемом лазерном усилителе

А. О. Купцова

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

В настоящее время для многих применений востребовано лазерное излучение с одновременно высокой энергией и частотой повторения импульсов. Перспективным направлением работ по этой теме является разработка систем с криогенно-охлаждаемыми активными элементами, допированными ионами иттербия.

Данная работа посвящена исследованию процесса лазерного усиления в активных элементах криогенно-охлаждаемого мультидискового многопроходного Yb:YAG-усилителя с общей средней мощностью диодной накачки до 1,6 кВт [1]. Усилитель разрабатывается для получения излучения с частотой повторения импульсов до 1 кГц с энергией в импульсе до 300 мДж.

Разработана оптическая схема усиления в нескольких активных элементах усилителя с двумя проходами через каждый активный элемент. Для усиления использовалось излучение с центральной длиной волны 1030 нм, частотой повторения импульсов 200 Гц, длительностью импульсов 400 пс. Исследованы зависимости коэффициента усиления в активных элементах от мощности излучения накачки. Также были исследованы пространственные и спектральные характеристики усиленного излучения.

Проведено исследование пространственного распределения коэффициента усиления излучения в одном из активных элементов при частоте повторения импульсов 1 кГц. Показано, что распределение коэффициента усиления имеет гладкий и симметричный профиль.

По итогу проведенного исследования показано, что на выходе мультидискового многопроходного Yb:YAG усилителя может быть достигнута высокая энергия в импульсах усиленного излучения. Результаты, полученные в ходе исследования, будут использованы для оптимизации работы лазерного усилителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках научного проекта FWGU-2021-0005 Минобрнауки РФ.

1. 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, № 11. P. 805.

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

УДК 535

Развитие методов компенсации спектрально-углового чирпа импульсов параметрически усиленной холостой волны

Д. Б. Луценко

Новосибирский государственный университет

В мультитераваттной лазерной системе, созданной в ИЛФ СО РАН [1] на основе неколлинеарного параметрического усиления чирпованных импульсов в кристаллах LiB3O5 (LBO), генерируется сигнальная волна в области 830 нм и холостая волна в области 1500 нм со спектрально-угловым чирпом. Наличие спектрально-углового чирпа в импульсе холостой волны не позволяет сжать его до исходной длительности ~ 30 фемтосекунд. В работе развиваются методики детектирования и компенсации спектрально-углового чирпа холостой волны после параметрического усилителя на основе LBO-кристалла.

Созданная схема детектирования спектрально-углового чирпа основана на методе интерферометрии со спектральным разрешением [2]. Определение значений спектрально-углового чирпа для различных спектральных компонент импульса осуществляется по интерференционной картине, формируемой дифракционной решеткой. Показано, что основными факторами, ограничивающими точность измерений, является нелинейная зависимость спектрально-углового чирпа в холостой волне от длины волны, размер пикселя и апертура регистрирующей CCD-камеры.

Схема компенсатора спектрально-углового чирпа состоит из телескопа и дифракционной решетки. Разработана методика моделирования и выполнены эксперименты по оптимизации основных параметров схемы: угла падения на решетку и коэффициента увеличения телескопа. Согласно результатам моделирования, для достижения остаточного спектрально-углового чирпа менее 200 нрад/нм необходимо выставление угла падения с точностью до нескольких минут и коэффициента увеличения телескопа с точностью ~ 10–4.

Разработанная экспериментальная схема детектирования позволяет измерять спектрально-угловой чирп в пределах от 0,5 ± 0,1 до 300 ± 3 мкрад/нм. Схема компенсации обеспечивает снижение величины остаточного спектрально-углового чирпа до уровня ~сотен нрад/нм, что позволяет сжать усиленный чирпованный импульс холостой волны до исходной длительности. Исследованные схемы могут масштабироваться по энергии импульсов и применяться в других спектральных диапазонах.

Реализация синхронной генерации фемтосекундных импульсов тераваттной мощности в области 830 и 1500 нм открывает возможности проведения экспериментов по генерации гармоник высокого порядка в газовых и твердотельных мишенях с высокой эффективностью [3].

1. Bagayev S. N., Trunov V. I., Pestryakov E. V. et al. Optimization of wide-band parametric amplification stages of a femtosecond laser system with coherent combining of fields // Quantum Electron. 2014. Vol. 44 (5). P. 415–425.

2. Varju K., Kovacs A. P., Kurdi G. High-precision measurement of angular dispersion in a CPA laser // Appl. Phys. B. 2002. Vol. 74 (1). P. 259–263.
3. Shao R., Zhai C., Zhang Y. et al. Efficient soft x-ray high-order harmonic generation via dual-pulse driving lasers in the overdriven regime // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2021. Vol. 54 (6). P. 064001.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. В. И. Трунов

УДК 535.015

Разработка методов внесения значительных вариаций радиуса цилиндрического микрорезонатора

Н. А. Макарова

Новосибирский государственный университет

Микрорезонаторы мод шепчущей галереи (МШГ) позволяют создавать множество перспективных источников излучения. Отличительной чертой одного из видов микрорезонаторов — цилиндрических микрорезонаторов на поверхности оптического волокна — является возможность внесения наперед заданных вариаций эффективного радиуса в волокно. Это позволяет управлять скоростью аксиального распространения мод и изменять их дисперсию. Кроме того, существенное изменение эффективного радиуса способствует удалению кварцевой оболочки оптического волокна, при этом МШГ будут распространяться в сердцевине оптоволокна. Если сердцевина будет легирована редкоземельным элементом и иметь достаточный размер, то можно создать лазерную генерацию в таком микрорезонаторе с удаленной кварцевой оболочкой.

Настоящая работа направлена на разработку методов удаления кварцевой оболочки оптоволокна. Свойства поверхности оказывают заметное влияние на свойства МШГ, в частности на их добротность. При реализации разработанных методов следует добиться однородности и гладкости поверхности оптоволокна после снятия кварцевой оболочки. В ходе работы были исследованы различные методы по удалению кварцевой оболочки оптоволокна, измерен спектры МШГ в разных образцах и определена добротность мод.

Одним из предложенных методов по удалению кварцевой оболочки является метод травления с помощью NaOH. В этом методе глубина травления, при которой наблюдается однородность поверхности вдоль образца, не превышала 20 мкм. При более высокой глубине травления возникала сильная неоднородность поверхности, и возбудить на ней МШГ не удается. Следующим методом удаления кварцевой оболочки является метод абляции [1]. В данном методе была получена достаточно однородная поверхность образца, чтобы МШГ возбуждались в нем, а глубина травления могла составлять больше 60 мкм. В образце со снятой кварцевой оболочкой методом абляции были возбуждены МШГ, а также измерен спектр данных мод. Добротность мод в таком образце достигает величины 10^4–10^5.

1. Guo W. et al. Fabrication of long-period fiber gratings through periodic ablation using a focused CO2-laser beam // Opt. Mater. Express. 2015. Vol. 5, № 11. С. 2702–2714.

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

УДК 535.8

Фемтосекундная лазерная запись отражательных структур с различной поперечной геометрией в многомодовых оптических волокнах

Ж. Э. Мункуева

Новосибирский государственный университет
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Эффект рэлеевского рассеяния излучения на естественных неоднородностях показателя преломления внутри сердцевины волокна широко применяется в волоконных лазерах со случайной распределенной обратной связью (СРОС) [1] и распределенных сенсорных системах [2]. Однако малая величина коэффициента обратного рассеяния ($\varepsilon = 4{,}5 \times 10^{-5}$) приводит к необходимости использовать относительно длинные участки волокна (~ 1–100 км) и высокую мощность накачки при создании волоконных лазеров. Усиление рэлеевского рассеяния путем увеличения концентрации неоднородностей в сердцевине волокна является привлекательным решением для создания компактных лазерных систем со СРОС и сенсорных систем с передовыми характеристиками.

Среди методов, используемых для повышения уровня обратного рассеяния в волокне, наиболее гибким является метод фемтосекундной лазерной модификации материалов, который позволяет формировать внутри сердцевины волокна отражательные структуры со сложной поперечной геометрией. Наибольший интерес представляет запись структур в многомодовых волокнах, позволяющих генерировать определенные поперечные моды волоконного лазера.

В работе представлены результаты по записи точечных рэлеевских отражателей с различной поперечной геометрией в многомодовом оптическом волокне с градиентным профилем показателя преломления: 1) в центре сердцевины (1D-отражатель); 2) плоскости со случайным смещением в поперечном направлении (2D-отражатель); 3) объеме со случайными смещениями в поперечных направлениях (3D-отражатель). Записанные структуры охарактеризованы с помощью метода оптической рефлектометрии во временной области с высоким пространственным разрешением. Оптимизация энергии импульсов и условий фокусировки позволила повысить уровень обратного рассеяния на 54, 52 и 45 дБ/мм в случаях 1D-, 2D- и 3D-отражателей соответственно. Представлены применения полученных отражателей для создания многомодовых волоконных СРОС-лазеров.

1. Turitsyn S. K. et al. Random distributed feedback fibre laser // Nat. Photonics. 2010. Vol. 4, No. 4. P. 231–235.
2. Hartog A. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors // CRC Press: Boca Raton. FL, USA, 2018.

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

УДК 535.35

Лазерно-индуцированная флуоресценция оксида фосфора

С. Н. Мурашко

Томский государственный университет

Проведен расчет спектра флуоресценции оксида фосфора (PO) при возбуждении излучением с длинами волн, соответствующих максимумам интенсивности поглощения дублетных полос $B^2\Sigma^+$ ($v' = 0$) — $X^2\Pi_{1/2}$ ($v'' = 0$) и $B^2\Sigma^+$ ($v' = 0$) — $X^2\Pi_{3/2}$ ($v'' = 0$). Расчет выполнен в предположении, что линия возбуждающего излучения имеет гауссову форму с шириной $\Delta\lambda = 5$ пм. Полученная β-система полос в диапазоне 323–356 нм состоит из трех дублетных полос $B^2\Sigma^+$ ($v' = 0$) → $X^2\Pi$ ($v'' = 0, 1, 2$) – β(0, 0), β(0, 1) и β(0, 2) соответственно.

При регистрации флуоресценции оксида фосфора, возбуждаемой в условиях реальной атмосферы, необходимо учесть, что интенсивное аэрозольное и молекулярное рассеяние лазерного излучения будет спектрально перекрывать β(0, 0)-полосу флуоресценции. В спектральных областях расположения других полос флуоресценции также может присутствовать «паразитное» излучение. Это может быть стоксово свечение случайных примесей атмосферы, свойства которых трудно оценить априорно, или стоксово спонтанное комбинационное рассеяние на молекулах основных атмосферных газов.

Как известно, положение колебательно-вращательной полосы при комбинационном рассеянии определяется частотным сдвигом относительно линии возбуждающего излучения и изменяется при изменении длины волны возбуждения. Положение же полос флуоресценции определяется значениями молекулярных термов и не зависит от положения линии возбуждающего излучения. Это обстоятельство позволяет выбирать длины волн возбуждения молекулы PO таким образом, чтобы избежать наложения спектров комбинационного рассеяния и флуоресценции.

Показано, что при возбуждении PO-излучением с длиной волны вблизи кантов в ветвях ($Q_{11} + P_{21}$) или ($P_{22} + Q_{12}$) перехода $B^2\Sigma^+$ ($v' = 0$) — $X^2\Pi$ ($v'' = 0$) полосы β(0, 1) и β(0, 2) спектра флуоресценции частично или полностью перекрывается с колебательно-вращательными полосами спектра комбинационного рассеяния на молекулах азота и кислорода. При возбуждении PO-излучением с длинами волн 324,44 и 326,96 нм полосы β(0, 2) и β(0, 1) соответственно спектра флуоресценции PO не перекрывается со спектральными откликами от основных компонент атмосферы, что обосновывает выбор этих полос флуоресценции в качестве основных рабочих.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. В. Горлов

УДК 535.2

Изменение формы цилиндрического микрорезонатора из-за диссипации энергии излучения МШГ

А. Д. Новиков

Новосибирский государственный университет

Цилиндрические резонаторы мод шепчущей галереи (МШГ) — это микрорезонаторы, сформированные на поверхности оболочки оптоволокна. Моды, распространяющиеся в таком резонаторе, чувствительны к малым изменениям эффективного радиуса. Эта особенность позволяет контролировать распространение вдоль оси резонатора. Такие резонаторы имеют малые потери. Они могут быть использованы для создания линий задержек, оптических сенсоров, генерации оптической гребенки [1–3]. Эти приложения требуют высокой мощности, которая может вызвать нагрев резонатора и его тепловое расширение. Мы представляем модель, описывающую нагревание резонатора, и экспериментально подтверждаем изменение в распределении мод, вызванное нагревом вследствие диссипации энергии моды.

Модель включает одномерное уравнение теплопроводности, чтобы описать распределение температуры и соответствующее ей изменение эффективного радиуса, а также стационарное уравнение Шредингера для вычисления распределения мод и мощности внутри резонатора, которая накачивается внешним источником через элемент связи. Модель учитывает рассеивание на этом элементе.

Мы сравниваем распределение мод холодного резонатора и нагретого резонатора с одной возбужденной модой лазерным излучением мощностью 18 дБм. Структура мод визуализирована с помощью спектрограммы спектра пропускания. Спектры измерены в разных точках по оси резонатора. Результаты эксперимента показывают изменение межмодового расстояния до 20 %, что составляет несколько пикометров. Мы уверены, что эта модель является мощным инструментом, который продвинет изучение нелинейной динамики в системах на основе микрорезонаторов МШГ.

Работа поддержана Российский научным фондом (№ 22-12-20015) и правительством Новосибирской области.

1. Sumetsky M. Optical bottle microresonators // Prog. Quantum Electron. 2019. Vol. 64. C. 1–30.
2. Toropov N. et al. Microresonator devices lithographically introduced at the optical fiber surface // Opt. Lett. 2021. Vol. 46, № 7. C. 1784–1787.
3. Gardosi G. et al. Photonic microresonators created by slow optical cooking // ACS Photonics. 2021. Vol. 8, № 2. C. 436–442.

Научный руководитель — Д. В. Кудашкин

УДК 535.4

Моделирование массива линз для голографии

С. Р. Ноговицына

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

В данной работе рассматриваются способы оценки аберраций, возникающие в методе осевой голографии Габора для исследования структур объектов. Суть метода осевой голографии Габора состоит в том, что волна от источника, проходя через объект исследования, регистрируется на некотором расстоянии детектором. Из литературных данных известно [1], что разрешение такого метода ограничено только геометрическими данными, а именно расстоянием источник — объект. Также к наиболее значимым проблемам, препятствующим лучшему разрешению, можно отнести аберрации комплексной волны, оценка которой является целью данной работы. В рамках данной работы предлагается применить массив микролинз для оценки аберраций волнового фронта.

В рамках данной работы рассмотрены три модели массива микролинз:

$$T_1 = e^{-i\frac{\pi}{f*\lambda}\left(x^2+y^2\right)} * rect\left(\frac{x}{d}\right) * rect\left(\frac{y}{d}\right),$$

где f — фокусное расстояние линзы; λ — длина волны; d — сторона квадратной линзы.

$$T_2 = \frac{2\pi}{\lambda}\sum_{m=-M}^{+M}\sum_{n=-M}^{+M} S_p\left(x-mp, y-np\right)\left[mp\left(x-mp\right)+np\left(y-np\right)\right],$$

где $S_p(x,y)$ — квадратная функция; p — шаг дискретизации микролинзы.

$$T_3 = e^{-i\frac{\pi}{f*\lambda}\left(x^2+y^2\right)} * circ\left(x, y, d\right),$$

где f — фокусное расстояние линзы; λ — длина волны; d — сторона круглой линзы.

Также рассматривается модель шестиугольной линзы в одномерном случае:

$$t_{exp}\left(x\right) = 2\cos\left(\frac{N\delta}{2}\right)\left\{\frac{\sin\left[\frac{\left(N+1\right)\delta}{2}\right]}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}\right\} - 1,$$

где N — разрешение микролинзы; $\delta = 2\pi xd/\lambda f$, d — период массива линз; f — фокусное расстояние микролинзы.

Получены численные результаты в виде распределения интенсивности для случая одной линзы и массива микролинз. Результаты полученных данных в последующем будут применены для распределения волнового фронта в осевой голографии Габора.

1. Egorov N. V., Karpov A. G., Fedorov A. G. et al. Technique for Investigating the Spatial Structure of Thin Films at a Nanolevel // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2011. Vol. 5, No. 5. P. 992–995.

Научный руководитель — канд. техн. наук А. Г. Федоров

УДК 535.42

Мультиплексированные чирпированные голографические ФПМ дифракционные структуры

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 (ФПМ) [1–3].

Например, в работах [1, 2] было получено уширение угловой селективности ГДС за счет последовательной записи нескольких решеток, где коэффициент уширения был прямо пропорционален количеству решеток. В работе [3] получены кривые углового отклика чирпированных решеток, вследствие изменяющегося периода записанной дифракционной структуры происходит уширение угловой селективности относительно стандартной ГДС.

В данной работе экспериментально показано формирование мультиплексированных чирпированных ГДС в ФПМ. В результате последовательной записи получено увеличение ширины угловой селективности в 2 раза относительно одиночной ГДС, при формировании чирпированной ГДС ширина угловой селективности увеличивается более чем в 2 раза относительно стандартной ГДС. При записи мультиплексированной чирпированной ГДС получено увеличение угловой и спектральной селективности в 4 раза относительно одиночной стандартной ГДС. Представленные результаты позволяют применить полученные ГДС в дальнейшем для разработки оптических устройств связи, таких как спектральные оптические фильтры, мультиплексоры/демультиплексоры [1–3].

1. Шишова М. В., Жердев А. Ю., Лушников Д. С. и др. Мультиплексные брэгговские дифракционные решетки для световодов системы дополненной реальности // HOLOEXPO 2020: XVII Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. С. 253–263.
2. Довольнов Е. А., Шарангович С. Н. Нелинейная модель последовательной записи наложенных голографических решеток в фотополимерных композиционных материалах с учетом самодифракции на пространственных гармониках // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105, № 2. С. 336–345.
3. Dovolnov E. A., Sharangovich S. N., Sheridan J. T. Theoretical and experimental investigation of photopolymer chirped gratings formation // Photorefractive Effects, Materials, Devices. Optica Publishing Group. 2005. P. 469–474.

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

УДК 535.4

Особенности синтеза цифровых голограмм для контроля параметров ввода излучения в многосердцевинные оптические волокна

А. А. Ревякин

Новосибирский государственный университет

Экспериментальное исследование процессов, происходящих с излучением в многосердцевинных волокнах, таких как временное сжатие и когерентное объединение импульсов [1, 2], требует тонкого управления амплитудой и фазой излучения при его заведении в оптическое волокно. Такой контроль может быть осуществлен амплитудно-фазовой модуляцией света фазовым пространственным модулятором света (ФПМС). Этот прибор обеспечивает контроль над фазовым фронтом отраженного от него излучения. Для кодирования некоторого сигнала в голограмме используются такие методы, как точная запись, метод прямого поиска и другие. Для ускорения процесса кодирования и быстрого поиска оптимальных голограмм с большими показателями качества можно использовать более простой метод — Гершберга — Сакстона (ГС) с весами [3], также применяемый для создания массивов оптических ловушек.

Цель работы — заведение излучения с контролируемыми параметрами в сердцевины многосердцевинного волокна. Найдены условия устойчивой сходимости алгоритма, экспериментальная проверка свидетельствует о возможности контроля координат отдельных фокусных пятен и их интенсивности. Внесенные модификации позволяют совершить пространственное разделение пучков с контролем амплитуды поля в диапазоне 50–100 % от максимальной на входе в каждую сердцевину. Планируется экспериментальное определение точности такого контроля, а также сравнение алгоритма ГС и использования двойных фазовых голограмм [4], что может давать лучшие результаты для ФПМС с высоким разрешением экрана.

1. Chekhovskoy I. S., Rubenchik A. M., Shtyrina O. V. et al. Nonlinear discrete wavefront shaping for spatiotemporal pulse compression with multicore fibers // J. Opt. Soc. Am. B. 2018. Vol. 35. P. 2169–2175.
2. Rubenchik A. M., Chekhovskoy I. S., Fedoruk M. P. et al. Nonlinear pulse combining and pulse compression in multi-core fibers // Opt. Lett. 2015. Vol. 40. P. 721–724.
3. Di Leonardo Roberto et al. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays // Opt. Express. 2007. Vol. 15, iss. 4. P. 1913–1922.
4. Arrizón V., Sánchez-de-la-Llave D. Double-phase holograms implemented with phase-only spatial light modulators: performance evaluation and improvement // Appl. Opt. 2002. Vol. 41. P. 3436–3447.

Научный руководитель — М. Д. Гервазиев

УДК 535.8

Волоконный интерферометр Маха – Цендера на основе вставки из утоненного волокна для измерения показателя преломления

Х. А. Ризк

Новосибирский государственный университет
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Показатель преломления жидкости является одним из важных физических параметров, он играет очень важную роль в медицинской диагностике, химическом и биологическом анализе [1]. Использование оптических волоконных сенсоров позволяет улучшить характеристики коммерческих устройств из-за их преимуществ, таких как устойчивость к электромагнитным полям, высокая чувствительность, низкие потери, небольшие размеры и вес.

Поэтому данная работа посвящена разработке метода измерения показателя преломления окружающей среды с помощью искусственно утоненного волокна. Утонение волокна осуществляется с помощью сварочного аппарата Fujikura LZM-100 на основе CO_2-лазера. Принцип работы предлагаемой структуры основан на возбуждении мод высших порядков. Из-за несоответствия между диаметром сердцевины SMF-28 и утоненного волокна часть энергий перекачивается в моду оболочки, соответственно, усиливается эванесцентное поле на поверхности волокна, что увеличивает взаимодействие света с окружающим веществом, а сама высшая мода частично расположена вне волокна [2].

Изготовлены образцы разного диаметра и длины, измерены спектры интерференции изготовленных датчиков оптическим анализатором спектра Yokogawa AQ6370. Эти спектры были обработаны с помощью быстрого преобразования Фурье с использованием Python, показано, что интерференционные полосы датчика образованы основной модой и некоторой модой оболочки низкого порядка. Использовалась программа моделирования COMSOL Multiphysics для расчета количества возбуждаемых в волокне-вставке мод при различных степенях утонения, и таким образом было известно, какие моды участвуют в интерференции для каждого образца.

Изготовленные образцы планируется использовать для измерения показателя преломления водных растворов глицерина разной концентрации.

1. Urrutia A. et al. A Comprehensive Review of Optical Fiber Refractometers: Toward a Standard Comparative Criterion // Laser Photon. Rev. 2019.
2. Симонов В. А., Терентьев В. С. Интерферометр Маха — Цандера на основе утоненного волокна для измерения показателя преломления жидкости // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. 2021. Т. 6, № 174.

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

УДК 535.8

Создание стабилизированного источника излучения для квантового гравиметра

С. Э. Сере

Новосибирский государственный технический университет
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Для различных приложений в атомной физике требуются стабилизированные по частоте источники излучения. В основе стабилизации частоты лазера лежат узкие линии поглощения, к центру которых «привязывается» частота излучения. Для настройки частоты излучения к линии поглощения используется спектроскопия насыщенного поглощения, которая является эффективным методом для получения резонансов насыщенного поглощения (РНП) без доплеровского уширения.

Стабилизированные по РНП лазеры представляют интерес в физике ультрахолодных атомов (ФУХА), быстроразвивающейся области атомной физики. Гравиметрия на основе интерференции ультрахолодных атомов является одной из важных приложений ФУХА. Например, гравиметры используются для поисков залежей полезных ископаемых, для геологии, для высокоточной навигации и т. д. [1].

При использовании РНП для стабилизации частоты важным является точность «привязки» частоты излучения стабилизированного лазера к центру линии поглощения. С целью оптимизации параметров системы стабилизации частоты излучения была исследована форма РНП [2] в ячейке (длина 80 мм) с парами рубидия. В частности, проведено сравнение теоретической и экспериментальной зависимости контраста РНП от параметров встречных пучков.

Проведен эксперимент по регистрации РНП на переходе $F = 2 \rightarrow F' = 3$ D_2 линии ^{87}Rb при различных температурах ячейки. Получена зависимость амплитуды РНП от температуры в ячейке, которая позволила определить оптимальную температуру, равную 320 K.

В результате работы было получено стабилизированное по частоте лазерное излучение с шириной линии порядка 200 КГц, которое используется для лазерного охлаждения атомов Rb87 в магнитооптической ловушке.

1. Precision gravimetry with atomic sensors / M. Angelis et al. // Sci. Technol. 2009. № 20. P. 0957–0233.
2. Macadam A., Steinbach C. Saturated Absorption Spectroscopy // Dept. of Physics. 2008.

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

УДК 535.372:546.26-162

Измерение времен спиновой релаксации и фазовой когерентности в ансамблях отрицательно заряженных азотно-вакансионных центров в искусственных алмазах

Дун Сювэнь

Новосибирский государственный университет

Отрицательно заряженные азотно-вакансионные центры в алмазах многими исследовательскими коллективами рассматриваются в качестве прецизионных детекторов магнитного поля с высоким пространственным разрешением [1, 2]. Люминесценция этих атомно-подобных квантовых объектов благодаря спин-орбитальным и спин-спиновым взаимодействиям чувствительна к магнитным, электрическим, а также внутрикристаллическим деформационным полям. Долгоживущая спиновая когерентность основного состояния позволяет фиксировать малые сдвиги спиновых резонансов, вызванных внешними полями. Регистрация выполняется хорошо отработанной методикой оптического детектирования магнитных резонансов [3].

Чувствительность таких детекторов постоянных и переменных магнитных полей критически зависит от величины времени спиновой релаксации основного состояния T_1 и времени фазовой когерентности T_2. В ходе отбора качественных алмазных пластин, подвергнутых ионной имплантации азотом и последующим восстановительным отжигом при высоком давлении и температуре, необходимо проводить контрольные измерения этих параметров.

В работе представлены методика и результаты измерений времен спиновой релаксации и фазовой когерентности для образцов искусственных алмазов, выращенных при высоком давлении и температуре.

1. Taylor J., Cappellaro P., Childress L. et al. High-sensitivity diamond magnetometer with nanoscale resolution // Nat. Phys. 2008. Vol. 4, № 10. P. 810.
2. Degen C. Scanning magnetic field microscope with a diamond single-spin sensor // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. P. 243111.
3. Lai N., Zheng D., Jelezko F. et al. Influence of a static magnetic field on the photoluminescence of an ensemble of nitrogen-vacancy color centers in a diamond single-crystal // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95. P. 133101.

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

УДК 535-1

Детектирование терагерцовых волн в кристаллах $GaSe_{(1-x)}Sx$ на телекоммуникационной длине волны

О.Н. Шевченко[1,2], Н.А. Николаев[1,2], С.Л. Микерин[2], К.А. Кох[3]

[1]Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
[2]Новосибирский государственный технический университет
[3]Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск

Целевой диапазон следующего поколения 120–350 ГГц, который относится к так называемому миллиметровому диапазону, расположен в локальном окне прозрачности атмосферы и обеспечивает однонаправленную беспроводную передачу данных на километровые расстояния. Функциональные возможности кремниевой микроэлектроники резко падают на таких высоких частотах, и возникает необходимость в поиске новых материалов и методов, которые лягут в основу телекоммуникационных устройств следующего поколения.

Наиболее перспективными в этом направлении могут быть бинарные полупроводниковые соединения, такие как кристаллы селенида галлия (GaSe). Несмотря на множество работ, направленных на изучение свойств легированных и нелегированных кристаллов GaSe, лишь небольшое количество публикаций посвящено результатам по их линейным и нелинейным свойствам на телекоммуникационных длинах волн, а также в оптическом и терагерцовом диапазоне. В связи с этим крайне актуален вопрос исследования данных кристаллов на длинах волн в окрестности 1,5 мкм.

Кристаллы $GaSe_{(1-x)}S_x$, где x принимает значения 0; 0,03; 0,12; 0,16 и 0,22, были выращены из расплавов с использованием вертикального метода Бриджмена в присутствии вращающегося теплового поля.

Были исследованы показатели преломления кристаллов на длине волны λ = 1547 нм и в ТГц спектральном диапазоне. Показано, что по мере включения элементов серы в структуру кристалла показатель преломления уменьшается для обоих случаев. Также исследована эффективность детектирования ТГц-излучения в кристаллах $GaSe_{(1-x)}S_x$, выявлено, что наибольшей эффективностью обладает кристалл со значением x = 0,12. Впервые произведена оценка электрооптического коэффициента r_{22} кристаллов $GaSe_{(1-x)}S_x$ и получено, что для кристалла GaSe значение составляет 0,975 пм/В, а для $GaSe_{0,88}S_{0,12}$ равно 1,262 пм/В.

Исследования проведены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSUS-2020-0029). Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования ВТАН (Новосибирский государственный университет) за доступ к их экспериментальному оборудованию.

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

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

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

Ответственный секретарь секции — *Е. С. Сандалов*

Экспертный совет секции
д-р физ.-мат. наук *А. В. Бурдаков*
канд. физ.-мат. наук *Д. И. Сковородин*
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*
Cand. Phys.-Math. Sci. *D. I. Skovorodin*
Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Sudnikov*

УДК 53.096

Исследование возможности моделирования теплового воздействия плазмы на дивертор токамака с помощью частотно-импульсного электронного пучка

Н. Абед

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

Проблема эрозии вольфрамовой облицовки вакуумной камеры токамака-реактора, находящейся в непосредственном контакте с термоядерной плазмой, особенно остро стоит в области дивертора токамака. Наибольшую угрозу для элементов облицовки представляют интенсивные импульсные тепловые нагрузки — срывы плазменного шнура и периодические неустойчивости периферийной плазмы (ELM — *Edge Localized Modes*, тип 1).

Оценочная величина тепловых нагрузок вследствие ELM типа 1 для международного токамака ИТЭР достигает ~ 0,6 МДж/м^2 при субмиллисекундной длительности процесса. Частота возникновения ELM-событий в ходе рабочего импульса токамака может быть на уровне 10 Гц (при времени жизни плазмы ~ 100 с в одном рабочем импульсе), при этом полное число таких событий за весь жизненный цикл работы установки ИТЭР с термоядерной плазмой может превысить уровень 10^8.

Экспериментальных данных, позволяющих надежно оценить степень эрозии вольфрамовой облицовки токамака-реактора на протяжении всего срока службы, к настоящему моменту не существует.

Таким образом, изучение эрозии вольфрама при циклическом импульсном нагреве на частоте в 10–20 Гц, при совокупном числе импульсов нагрева $\geqslant 10^7$, плотностях энергии ~ 1 МДж/м^2, субмиллисекундной длительности импульса нагрева и размере облучаемой площади около 1 см^2 представляется актуальной задачей.

Для имитации теплового воздействия предполагается использовать частотно-импульсный источник электронного пучка с энергией 15–20 кэВ на основе накаливаемого катода. Пучок должен обеспечивать экспозиционную нагрузку ~ 100 Дж/см^2 при длительности импульса около 1 мс на поверхности мишени на площади около 1 см^2, работать на частоте 10–20 Гц при полном числе импульсов на мишень до 10^7 без необходимости технического обслуживания.

Научный руководитель — Д. А. Никифоров

УДК 533.9

Моделирование теплового режима высокочастотного драйвера и цезиевой распределительной галереи мощного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода

К. Н. Адамов

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

В Институте ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера разрабатывается мощный инжектор атомов водорода высокой энергии, использующий поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов с ВЧ-разрядом [1].

В качестве эмиттера ионов H− в источнике используется электрод с субмонослойным цезиевым покрытием, которое обеспечивает низкую работу выхода и усиленную генерацию отрицательных ионов. Пары цезия подаются на эмиссионный электрод через распределительную галерею [2], далее цезий перераспределяется за счет термодиффузии и распыления плазмой. Температура эмиссионной поверхности определяет скорость перераспределения цезия и принципиально важна для работы источника в режиме длинных импульсов.

В данной работе было проведено численное моделирование нагрева и охлаждения электродов, ограничивающих разряд, с помощью кода COMSOL. Получено распределение температуры на их поверхностях. Предложен оптимальный температурный режим работы ВЧ-драйвера источника — 3 секунды импульс и 4 минуты пауза. Установлено, что существующая система обеспечивает повышенную температуру стенок и оптимальное покрытие для генерации пучка ОИ.

1. Sotnikov O. et al. Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices // Nucl. Fusion. 2021. Vol. 61, № 11. P. 116017.
2. Константинов С. Г. Система распределенной подачи цезия для увеличения эффективности мощных источников отрицательных ионов водорода // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 82–85.

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

УДК 533.95:519.688

Восстановление коэффициента диффузии и скорости пинчевания частиц при ЭЦР-нагреве на Т-10 из решения обратных задач

А. С. Асеев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Во многих экспериментах при центральном ЭЦР-нагреве на токамаке Т-10 наблюдается вынос частиц из зоны нагрева на периферию плазмы [1]. Этот эффект называется *density pump-out*. Для его изучения анализируются две серии экспериментов. Первая серия — при «стандартном» состоянии камеры токамака; вторая серия — при «чистой» камере, после литиезации. Отметим, что в этом случае существенно уменьшается поток частиц со стенки камеры в плазму.

Каждая серия экспериментов обрабатывается с помощью двух различных подходов [2, 3]. Сначала на стационаре в омическом нагреве, на основе модели канонических профилей, моделируется стационарное состояние плазмы и находятся коэффициенты переноса и источник частиц (код ASTRA). Далее для переходного процесса после включения центрального ЭЦР-нагрева формулируется обратная коэффициентная задача (код COBRA).

При анализе обеих серий экспериментов рассматриваются три возможные постановки обратной задачи, в которых фиксирован источник частиц, найденный на стационаре: а) фиксируется коэффициент диффузии, найденный на стационаре, а находится скорость пинчевания частиц; б) фиксируется скорость пинчевания частиц, а находится коэффициент диффузии; в) находится коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц.

Сравнение коэффициентов переноса для обеих серий экспериментов и для трех постановок обратной коэффициентной задачи позволяет сделать предварительный вывод. При включении центрального ЭЦР-нагрева основной вынос частиц на периферию определяется в основном изменением скорости пинчевания частиц.

1. Andreev V. F. et al. Experimental study of density pump-out effect with on-axis electron cyclotron resonance heating at the T-10 tokamak // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. Vol. 58. P. 055008.

2. Касьянова Н. В., Андреев В. Ф. Восстановление коэффициента диффузии и скорости пинчевания частиц из анализа переходного процесса после включения ЭЦР-нагрева на токамаке Т-10 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. Вып. 4. С. 71.

3. Днестровский Ю. Н. Самоорганизация горячей плазмы. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. Н. Днестровский

УДК 533.9.082.5

Спектроскопия плазмы на установке ГОЛ-NB

В. В. Бочкарев

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

Одной из основных задач исследований, проводимых на открытой многопробочной ловушке ГОЛ-NB, является изучение процесса накопления быстрых ионов при инжекции нейтральных атомов водорода с энергией ~ 25 кэВ. Исследование динамики этого процесса возможно с использованием спектроскопических методов. При взаимодействии плазмы с быстрым нейтральным пучком возникают перезарядные спектры излучения. Их регистрация вблизи линии H_α (656,28 нм) осуществляется с высоким временным разрешением с помощью двух спектрометров с пространственным разрешением.

Первый — полихроматор — состоит из спектрометра МДР-23 и каналов регистрации излучения. Канал регистрации представляет собой световод, подключенный к ФЭУ для увеличения чувствительности. Сигнал на выходе каждого канала соответствует интегральной интенсивности света в спектральном диапазоне, соответствующем месту подключения световода к спектрометру. Временное разрешение системы составляет 5 мкс.

Второй — спектрометр МДР-12 с установленной на выходе высокоскоростной монохромной CMOS камерой Chronos v1.4. Временное разрешение камеры (~ 100 мкс) заметно уступает временному разрешению полихроматора, однако с ее помощью можно получать детальные виды спектров, необходимые для обработки данных измерений полихроматора.

Таким образом, совместные показания полихроматора и высокоскоростной камеры позволяют анализировать перезарядные спектры с временным разрешением 5 мкс. По изменению интенсивности участков спектра, соответствующих быстрым протонам, возможно получение информации о процессе их накопления в установке. Аналогичным образом фиксируется изменение концентраций мишенной плазмы и нейтрального газа в области инжекции нейтрального пучка.

В результате проекта была разработана и введена в эксплуатацию описанная спектральная диагностическая система. Измерены указанные параметры плазмы и рассмотрена их зависимость от режима работы установки.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Иванов

УДК 533.951.8

К неустойчивости стационарных решений системы уравнений Власова – Максвелла в трехмерной постановке

Я. А. Журенков

Новосибирский государственный университет

Как известно, математическая модель плазмы Власова — Максвелла до сих пор является одной из наиболее актуальных моделей физики плазмы. В первую очередь это связано с относительной простотой и наглядностью данной модели, благодаря чему она эффективно используется для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза.

В настоящей работе изучается задача линейной устойчивости стационарных пространственных решений системы уравнений Власова — Максвелла. Эти решения описывают трехмерные состояния динамического равновесия безграничной бесстолкновительной электронейтральной полностью ионизованной плазмы Власова — Максвелла, вмещающей в себя счетный набор сортов заряженных частиц со стационарными функциями распределения, которые переменны и по физическому континууму, и по пространству скоростей, причем данные частицы движутся в стационарных электрическом и магнитном полях, неоднородных по физическому континууму.

Прямым методом Ляпунова доказана абсолютная неустойчивость исследуемых стационарных решений по отношению к малым трехмерным возмущениям. Для этого в случае, когда данные возмущения в терминах поля лагранжевых смещений представимы в форме нормальных мод, было получено обыкновенное линейное дифференциальное неравенство второго порядка с постоянными коэффициентами на норму полей лагранжевых смещений в пространстве интегрируемых с квадратом функций. Из этого неравенства при выполнении счетного набора необходимых и достаточных условий линейной практической неустойчивости удалось вывести априорную экспоненциальную оценку снизу роста рассматриваемых возмущений. Стоит отметить, что полученные результаты всецело согласуются с теоремой Ирншоу о неустойчивости равновесных конфигураций точечных электрических зарядов, распространяют ее действие на безграничную бесстолкновительную электронейтральную полностью ионизованную плазму Власова — Максвелла, а также расширяют область применимости этой теоремы с классической механики на статистическую.

Важно, что установленным в данной работе необходимым и достаточным условиям линейной практической неустойчивости присуща конструктивность, которая позволяет использовать их как механизм тестирования и контроля при реализации физических экспериментов и проведении численных расчетов с целью разрешения проблемы управляемого термоядерного синтеза.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. Г. Губарев

УДК 533.9

Магнитные измерения на установке КОТ

Р. С. Иванов

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

В Институте ядерной физики в настоящее время введена в эксплуатацию установка КОТ (компактный осесимметричный тороид) — открытая магнитная ловушка, на базе которой проводятся поддерживающие эксперименты для установки ГДМЛ — демонстратора технологий УТС на основе линейной ловушки для удержания плазмы с термоядерными параметрами. Целью создания установки КОТ является отработка принципов диамагнитного удержания плазмы при помощи обращения ведущего магнитного поля азимутальным током — FRC (*Field Reversed Configuration*). Для его получения в двухкомпонентную мишенную плазму температурой 50 эВ инжектируются мощные атомарные пучки с энергией частиц 15 кэВ и эквивалентным током 250 А. В результате процессов ионизации и перезарядки формируется популяция быстрых ионов со средней энергией 10 кэВ и плотностью 10^{13} см$^{-3}$. Цель экспериментов на установке — развитие методов создания и стабилизации компактного плазменного образования. Важным элементом диагностики плазмы являются магнитные зондовые и диамагнитные измерения. Изучение диамагнетизма плазмы позволяет контролировать ее энергосодержание, что необходимо для оптимизации ее параметров.

Цель данной работы — создание диагностики для регистрации диамагнетизма мишенной плазмы и FRC в диапазоне $\beta \sim 10^{-3} \div 1$, а также построение модели, необходимой для процедуры восстановления ее энергосодержания. В результатах работы представлены экспериментальные данные о диамагнетизме мишенной плазмы, полученные с использованием диамагнитных петель.

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

УДК 533.9.16

Устойчивость поверхностных дрейфовых волн в диамагнитной ловушке

Д. Ю. Кардаш

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

В данной работе исследуются условия возбуждения поверхностных волн и дисперсионное соотношение для волн переходной области в двух приближениях для диамагнитной ловушки [1]. Одна из моделей — это модель с жестким гофрированным цилиндром $r = r_0 + b \sin(m\varphi + kz)$ (где $r_0 \gg b$), в которой не учитывается взаимодействие частиц друг с другом, рассматривается условие возбуждения поверхностных волн по механизму Ландау. Из-за протекающего в переходной области диамагнитного тока магнитное поле практически полностью вытеснено плазмой из внутренней области, поэтому движение во внутренней области цилиндра можно рассматривать как прямолинейное. При внеосевой атомарной инжекции невозмущенные траектории быстрых ионов в переходном слое выглядят приблизительно как окружности с малым возмущением по радиусу, что значительно упрощает интегрирование уравнения. Это позволяет прейти к более точной модели с тонким слоем ионов. Во второй модели с тонким кольцом ионов определяется структура переходной области и дисперсионное соотношение путем решения возмущенного уравнения Власова методом интегрирования по невозмущенным траекториям [2].

Произведена оценка для условия резонансного взаимодействия горячих ионов внутренней области и поверхностных волн. Получено дисперсионное соотношение в пределе тонкого слоя быстрых ионов. Определенно условие резонансного взаимодействия быстрых ионов с поверхностными волнами и доля энергии, предаваемая на механизмы резонансного взаимодействия Ландау.

1. Beklemishev A. D. Improved plasma confinement at high beta // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1771, no. 1. P. 030001.
2. Wong H. Vernon, Berk H. L., Lovelace R. V., Rostoker N. Stability of annular equilibrium of energetic large orbit ion beam // Phys. Fluids B: Plasma Phys. 1991. Vol. 3. P. 2973–2986. URL: https://doi.org/10.1063/1.859931

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

УДК 537.8

Влияние резистивной стенки токамака на магнитные измерения

Д. А. Клименко, В. Д. Пустовитов

Московский физико-технический институт, Долгопрудный
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В экспериментах по магнитному удержанию плазмы в токамаках и стеллараторах в разрядах неизбежно присутствуют переходные процессы с переменными во времени магнитными полями как от плазмы, так и от внешних источников. Наличие переменного магнитного поля вне плазмы приводит к возникновению вихревых токов в проводящих структурах, препятствующих проникновению магнитного поля вглубь проводника [1]. Магнитные поля от наведенных токов затрудняют интерпретацию сигналов с магнитных диагностик [2].

В токамаках основной проводящей структурой в непосредственной близости к плазме является вакуумная камера (стенка). Вихревые токи индуцируются в стенке при пробое, подъеме и спаде тока плазмы, изменениях токов во внешних управляющих магнитных катушках, а самые большие — при срывах разряда. Величина наведенного тока определяется скоростью изменения магнитного поля, а также коэффициентами взаимной индукции плазмы и вакуумной камеры и ее электрическими свойствами [3]. Ток может быть довольно большим и будет давать заметный вклад в сигналы, измеряемые индуктивными петлями, находящимися за стенкой камеры. Фактически они измеряют изменение потока, создаваемого суперпозицией полей источника, лайнера и внешних катушек $\hat{B} = \hat{B}^{pl} + \hat{B}^{w} + \hat{B}^{ext}$ [4].

Мы предлагаем аналитическую модель для расчета поля $\hat{B}^{w}$ в тороидальной геометрии при быстрых изменениях параметров плазмы. Такая постановка задачи может быть интересна для всех токамаков, в которых часть измерительных зондов находится за стенкой камеры. Примерами являются токамаки ADITYA-U, Т-15МД, Т-10, DIII-D и другие.

В текущей постановке задачи на первом этапе ток плазмы заменен на точечный проводник, расположенный в геометрическом центре камеры. В проводнике возбуждается ток-ступенька, который создает поле источника. Производится расчет магнитного поля, создаваемого наведенными токами в стенке. В результате получена оценка времени затухания вихревых токов в стенке, оценен вклад от поля стенки в измеряемый сигнал с магнитного зонда в различные моменты времени по сравнению с полем источника.

1. Magnetic Field Diffusion and Eddy Currents // Magn. Fields. John Wiley & Sons, Ltd, 2000. P. 153–234.

2. Strait E. J., Fredrickson E. D., Moret J.-M., Takechi M. Chapter 2: Magnetic Diagnostics // Fusion Sci. Technol. 2008. Vol. 53 (2). P. 304–334.

3. Kumar Rohit et al. Estimation of vacuum vessel time-constant in ADITYA-U tokamak // Fusion Eng. Des. 2022. Vol. 177.
4. Пустовитов В. Д. Расширение теории равновесия Шафранова на описание срывов тока при учете диссипации в резистивной стенке в токамаках // Физика плазмы. 2019. Т. 45, № 12. С. 1088.

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

УДК 54-723.5

Получение холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов

В. Д. Коновалова

Новосибирский государственный университет

Компактный ускорительный источник нейтронов в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера позволяет генерировать нейтроны широкого диапазона энергий. На данный момент на установке генерируются: нейтроны эпитеплового диапазона энергий, которые используются для исследований в области бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), тепловые нейтроны, применяемые для измерения активационного спектра, а также быстрые нейтроны для испытаний перспективных материалов на радиационную стойкость. Нейтроны с энергией в диапазоне 10^{-7}–10^{-3} эВ обладают ярко выраженными волновыми свойствами, что позволяет рассматривать их как нейтронные волны. Волновые свойства нейтронов с низкой энергией открывают новые возможности для исследований в области БНЗТ и нейтронной дифрактометрии. Данная работа посвящена получению холодных нейтронов на компактном ускорительном источнике нейтронов.

Для получения холодных нейтронов проведена серия экспериментов с тестированием нескольких моделей нейтронных замедлителей. Начальный пучок нейтронов со средней энергией 30 кэВ и интенсивностью $2 \cdot 10^{12}$ н/с получали на ускорительном источнике нейтронов в ходе пороговой реакции ^{7}Li(p,n)^{7}Be. Энергия пучка протонов, падающего на литиевую мишень, составляет 2,1 МэВ. В качестве замедлителя протестирована многоуровневая замедляющая система, состоящая из тяжелой и обыкновенной воды при комнатной температуре и температуре 73 К. После прохождения через систему нейтроны регистрировались нейтронным детектором на основе пластиковых полистирольных сцинтилляторов, обогащенных бором (IHEP, Протвино).

Разработана оптимальная система замедления и детектирования нейтронов по типу системы формирования пучка эпитепловых нейтронов для БНЗТ. Проведено моделирование поставленных экспериментов с использованием программного обеспечения Geant4. Экспериментально проверены замедляющие свойства воды и оргстекла при комнатной температуре в качестве предзамедлителя для термализации нейтронов, а также тяжелой воды при температуре 73 К в качестве холодного замедлителя до уровня энергий 10^{-3} эВ.

Продемонстрирована возможность генерации холодных нейтронов в компактном ускорительном источнике нейтронов в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера.

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

УДК 533.9

Мгновенная гамма-спектрометрия для БНЗТ

Т. Ю. Кормушаков

Новосибирский государственный университет

Больше чем за полвека технология бор-нейтронозахватной терапии рака значительно продвинулась и на сегодняшний день является одной из самых перспективных методов борьбы со злокачественными опухолями. Метод лечения основан на высокой вероятности захвата стабильным изотопом бора ^{10}B теплового нейтрона, вследствие чего проходит ядерная реакция $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ с большим энерговыделением на маленькой длине пробега частиц, приводящая к гибели раковой клетки. Эффективность терапии напрямую зависит от распределения бора в опухли. Для дозиметрии необходимо точное измерение общей концентрации ^{10}B, а также для его микроскопического пространственного распределения. Результаты желательно получать в момент облучения нейтронами, так чтобы была возможность корректировать время облучения и полную дозу, полученную пациентом.

Многие годы для визуализации бора в БНЗТ-реакциях используют экспресс-анализ гамма-излучения. Данный метод основан на регистрации гамма-квантов энергии 478 кэВ, излученных в результате реакции $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li^{*}$. Излучение данной энергии пропорционально числу произошедших реакций и, следовательно, концентрации бора в наблюдаемом объеме.

Цель данной работы — разработка методики дозиметрии в реакции БНЗТ посредством регистрации гамма-излучения при взаимодействии борной кислоты с потоком тепловых нейтронов. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) обосновать физические основы используемого метода измерения концентрации; 2) измерить гамма-излучение физическим методом; 3) определить концентрацию ^{10}B на основе измеренных спектров.

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

УДК 533.9.07

Плазмохимический синтез оксидных композиций для уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива

А. А. Кузнецова

Томский политехнический университет

Одно из приоритетных направлений развития атомной энергетики в России — использование высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов для получения водорода в процессе паровой конверсии метана.

Перспективным является применение дисперсионного ядерного топлива (ДЯТ) в виде топливных оксидных композиций (ТОК), включающих оксиды делящихся металлов (уран, торий), равномерно распределенных в оксидной матрице с высокой теплопроводностью и малым поперечным сечением захвата нейтронов [1].

Недостатками методов получения ТОК (раздельное получение и механическое смешение, «золь-гель») являются: многостадийность, длительность, неравномерное распределение фаз, использование большого количества химических реагентов, высокие энерго- и трудозатраты [1]. К преимуществам применения плазмы для синтеза ТОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), следует отнести: одностадийность, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, равномерное распределение и требуемый состав фаз, низкие энергозатраты [2].

В работе представлены результаты термодинамического моделирования процесса плазмохимического синтеза ТОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих органический компонент (ацетон), водные нитратные растворы делящихся (уран, торий) и матричных (магний, алюминий) металлов, а также экспериментальных исследований процесса на модельных растворах ВОНР, включающих неодим (вместо урана) и церий (вместо тория). Определены составы растворов ВОНР и режимы их переработки, обеспечивающие в воздушно-плазменном потоке получение наноструктурных оксидных композиций. Полученные результаты могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза ТОК ДЯТ для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов.

1. Алексеев С. В., Зайцев В. А., Толстоухов С. С. Дисперсионное ядерное топливо. М.: Техносфера, 2015. 248 с.

2. Novoselov I. Yu., Karengin A. G., Babaev R. G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 1938. P. 1–5.

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

УДК 533.9, 543.4

Измерение характеристик пучка атомов водорода низкой энергии и высокой мощности

П. О. Кузьмина

Новосибирский государственный университет

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера в рамках госзадания создается прототип источника нейтральных атомов водорода с энергией 15 кэВ, током в ионах до 150 А и длительностью до 30 мс. Актуальность данной работы связана с необходимостью обеспечить большую мощность инжекции при сравнительно низкой энергии пучка для нагрева плазмы в современных открытых ловушках и сферических токамаках. На сегодняшний день завершено сооружение стенда, который состоит из ионного источника с нейтрализатором частиц, вакуумной камеры, приемника нейтрального пучка. Кроме того, в состав стенда входит электропитание ионного источника, а именно высоковольтное питание ускоряющей сетки с напряжением до 15 кВ, питание четырех дуговых генераторов плазмы и питание запирающей сетки.

Инжектор нейтральных атомов является довольно сложным устройством, компоненты которого влияют на эффективность работы друг друга, в результате чего усложняется процесс запуска инжектора. В ходе запуска инжектора необходимо контролировать параметры питания и параметры пучка нейтральных атомов. Ток и энергия частиц пучка определяются по току и напряжению системы питания и не требуют специальных методик. Такие характеристики, как угловая расходимость и массовый состав пучка, требуют введения дополнительных диагностик.

В данной работе методом доплеровской спектроскопии экспериментально определено относительное содержание ионов с различной массой в пучке ионного источника, работающего на водороде. При помощи вторично эмиссионных датчиков определена угловая расходимость пучка. Полученный опыт в дальнейшем предполагается развить и использовать для оптимизации условий генерации плазмы.

Продемонстрирована возможность генерации водорода низкой энергии и высокой мощности в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера.

Научный руководитель — А. В. Сорокин

УДК 533.95

Роль электронов в создании диамагнитного тока в плазме с высоким β

В. А. Куршаков

Новосибирский государственный университет

Равновесные конфигурации плазмы, в которых давление удерживаемой плазмы достигает давления магнитного поля, активно изучаются уже более полувека. В процессе этих исследований предлагались различные модели, где основным переносчиком диамагнитного тока были как электроны, так и ионы, а предсказываемая ширина переходного слоя варьировалась от гибридного гирорадиуса $\sqrt{\rho_e \rho_i}$ до ларморовского ионного ρ_i.

В последнее время интерес к задаче удержания плазмы с высоким относительным давлением β подпитывается развитием альтернативных направлений в проблеме управляемого термоядерного синтеза. В работе [1] было показано, что в МГД-приближении существует равновесная конфигурация плазмы в виде диамагнитного пузыря с полностью вытесненным магнитным полем. В таком решении, где давление плазмы и магнитного поля испытывают сильные изменения, при параметрах будущего реактора ширина переходного слоя оказывается меньше ларморовского радиуса ионов. Поэтому возникает вопрос о достижимости такого равновесия в рамках более общей кинетической теории. Для бесстолкновительного случая такое рассмотрение было проведено в работе [2], согласно которому ширина переходного слоя составила от 6 до 8 ионных гирорадиусов ρ_i. При этом было сделано важное предположение о возможности пренебрежения электрическими полями и электронными токами в пределе низкой электронной температуры.

В данной работе с помощью численного моделирования методом частиц в ячейках показано, что полученное в работе [2] равновесие неустойчиво, и независимо от температуры электронов плазма приходит к другому равновесию. В нем давление ионов удерживается электрической силой из-за разделения зарядов, а диамагнитный ток, обеспечивающий баланс между давлением плазмы и магнитным полем, создается не ионами, а $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$-дрейфом электронов. Кроме того, рассмотрен процесс формирования диамагнитного пузыря путем объемной инжекции плазмы в изначально холодную плазму в однородном магнитном поле.

1. Beklemishev A. D. Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps // Phys. Plasmas. 2016. Vol. 23. 082506.
2. 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 533.922

Ускорение электронов в плазменной волне с драйвером ЦИЭС

И. К. Лотов

Новосибирский государственный университет

Плазменное кильватерное ускорение — это перспективный и быстро развивающийся метод ускорения заряженных частиц. Использование плазмы в ускорителях позволяет получить поля, на несколько порядков большие, чем в традиционных высокочастотных резонаторах, и ускорить заряженные частицы до больших энергий при сравнительно маленьких длинах плазменной секции.

На данный момент максимальный набор энергии электронов в плазме уступает рекорду традиционных ускорителей, а методы лазер-плазменного ускорения еще не дают даже энергии, достигнутой с раскачкой волны заряженными частицами. Но в ближайшем будущем с использованием более мощных лазерных импульсов, таких как в проекте ЦИЭС (Центр исследования экстремального света), лазер-плазменное ускорение сможет превзойти как пучковое кильватерное, так и обычное резонаторное.

Для нахождения максимальной энергии необходимо численно найти оптимальные параметры взаимодействия: плотность плазмы, длительность и радиус лазерного импульса, положение электронов в плазменной волне. Лазерный импульс, создавая плазменную волну, теряет энергию, и при этом его форма сильно меняется. Чтобы корректно описать это изменение, нужно производить расчеты с большей точностью, чем при моделировании волны или пучков. Один такой расчет требует более 1000 часов процессорного времени, что сильно усложняет параметрический поиск. Поэтому сначала производилась оценка набора энергии через ускоряющие поля в точке, движущейся со скоростью света. При некоторых параметрах в волне образуется каверна (область без плазменных электронов), в задней части которой из-за осесимметричности кода появляется невоспроизводимая в реальности особенность с большими полями. Кроме того, истощающийся лазерный импульс удлиняется и, наползая на ускоряемые электроны, ухудшает качество пучка. Для автоматизации поиска электроны около особенности и в области лазерного импульса не учитывались.

Оказалось, энергия ускоренных электронов ограничена не энергозапасом лазерного импульса, а его продольным расплыванием. Моделирование показало, что возможно ускорить электроны до 100 ГэВ. Для этого нужен лазерный импульс с энергией 400 Дж, длительностью 200 фс и радиусом 200 мкм и плазма с плотностью $3 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$.

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

УДК 537.8

Проект антенны для ИЦР-нагрева плазмы на Т-15МД

П. Р. Науменко[1,2], А. С. Черненко[2]

[1]Московский физико-технический институт, Долгопрудный
[2]НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Одним из средств нагрева плазмы во многих установках с магнитным удержанием плазмы является ионно-циклотронный резонансный нагрев (ИЦРН). Создание такой системы планируется на токамаке Т-15МД: мощность нагрева 6 МВт, длительность импульса 10 с [1]. Она будет использоваться не только как система дополнительного нагрева плазмы, но и для генерации тока.

Для эффективного нагрева плазмы высокочастотными (ВЧ) волнами в условиях Т-15МД необходимо решить несколько расчетных и инженерных задач. В них входят: выбор рабочей частоты, зависящей от магнитного поля и выбора различных ионных добавок в водородную плазму, определение оптимальной геометрии антенны и проектирование системы передачи мегаваттной мощности от генератора к плазме.

Совместно с бельгийской лабораторией [1] было проведено моделирование эффективности нагрева плазмы в зависимости от геометрии антенны и фазировки подачи ВЧ-мощности на элементы антенны. Результаты были взяты за основу для построения 3D-модели антенны для Т-15МД.

Для передачи ВЧ-мощности с передающей линии на пластины антенны необходимо развязать земли передающей линии и вакуумной камеры. Для решения этой задачи был спроектирован фидер с электровакуумной и механической развязками.

Одной из основных задач эффективного нагрева плазмы является согласование импеданса «антенна — плазма». Для решения данной задачи был написан код в модели холодной плазмы, который рассчитывает спектр излученной антенной мощности и позволяет определить значение импеданса в зависимости от параметров системы ИЦРН. Планируется расширение данного кода для моделирования эффективности нагрева водородной плазмы [2].

1. Melnikov A. V., Ongena J., Messiaen A. M. et al. Conceptual study of an ICRH traveling wave antenna (TWA) for T-15MD at 60 MHz // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2254, 070007. URL: https://doi.org/10.1063/5.0014265.
2. Vdovin V. L. Electromagnetic theory of an antenna for ICR heating of tokamak plasmas // Nucl. Fusion. 1983. Vol. 23. P. 1435.

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

УДК 533.9

Терагерцовый интерферометр Майкельсона для диагностики плазмы на установке ГОЛ-NB

Ю. В. Орлов

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

Интерферометрия является одной из ведущих диагностик термоядерной плазмы. На современных токамаках (замкнутая магнитная система удержания) широко используется интерферометрия терагерцового диапазона [1]. В данной работе сообщается о терагерцовом интерферометре, впервые примененном на открытой ловушке (открытая система) ГОЛ-NB [2], недавно построенной в ИЯФ СО РАН.

Источником зондирующего излучения здесь является терагерцовый лазер FIRL-100 (непрерывный, P = 150 мВт, λ = 118,8 мкм) с оптической накачкой CO_2-лазером. Используется схема интерферометра Майкельсона. Конструктивно элементы интерферометра (детектор, светоделительная пластина, зеркала) располагаются на диэлектрической станине. Станина применяется для относительной фиксации элементов интерферометра, а также для подавления вибропомех, возникающих от рассеянного импульсного магнитного поля (Δt ~ 90 мс, B ~ 5 Тл). Для регистрации интерференционного сигнала используется пироэлектрический детектор ($\tau \approx 1$ мс, $R \approx 10$ В/Вт). В окончательном варианте будет применен болометр замкнутого цикла ($\tau \approx 1$ нс, $R \approx 10$ кВ/Вт).

Приведена схема расположения интерферометра на установке, оптимизированная по поставленной задаче исследования эффективности удержания плазмы в гофрированной ловушке. Изложены результаты предварительных измерений, направленных на полноценное освоение терагерцовой интерферометрии на установке. В дальнейшем интерферометр планируется использовать на проектируемой в ИЯФ СО РАН установке ГДМЛ [3].

1. Shi P. W. et al. Development of solid state terahertz interferometer for the first plasma on HL-2M tokamak // Rev. Sci. Instrum. 2021. Vol. 92, № 8. P. 083509.
2. Postupaev V. V. et al. Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nucl. Fusion. 2022. Vol. 62, № 8. P. 086003.
3. Экспериментальная верификация эффективных методов удержания плазмы в существующих и перспективных линейных системах. URL: https://fusion.rosatom.ru/docs/2022.05.26_%203.pdf

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. Бурмасов

УДК 533.922

Оптимизация градиента плотности плазмы во второй секции эксперимента AWAKE

Н. В. Охотников

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

Ограничение на ускоряющий градиент в связи с электрическими пробоями в традиционных ускорителях приводит к тому, что для получения больших энергий нужно строить установки все большего размера и стоимости. В связи с этим в последнее время наблюдается повышенный интерес к плазменному кильватерному ускорению. При использовании данного подхода ускоряющий градиент может достигать нескольких ГэВ/м, что значительно выше градиента в традиционных высокочастотных структурах, который не превышает 100 МэВ/м. Это позволяет строить более компактные и дешевые установки для получения ускоренных частиц. Однако плазменные ускорители находятся на стадии разработки, и многие технические проблемы еще предстоит решить.

Для демонстрации кильватерного ускорения на длинных расстояниях в ЦЕРНе проводится эксперимент AWAKE. В данном эксперименте протонный пучок из кольца SPS возбуждает кильватерную волну в плазме, в которую инжектируется ускоряемый электронный пучок. При этом установка состоит из двух частей: секции самомодуляции, в которой происходит разделение длинного протонного пучка на много микросгустков, и секции ускорения, в которую попадают протонный пучок после самомодуляции и ускоряемый электронный пучок.

Обычно протонный пучок пытаются сохранить до конца секции ускорения для возможности ее масштабирования в будущем. В работе показано, что с помощью градиента плотности плазмы в ускоряющей секции можно специально разрушить протонный пучок для более эффективного использования его энергии и получения большей энергии электронного сгустка через 10 м плазмы, которые сейчас реализованы в эксперименте AWAKE.

В работе проведено моделирование эксперимента AWAKE с помощью инструмента LCODE для различных линейных градиентов плотности плазмы. В результате удалось показать, что при использовании отрицательного градиента плотности можно получить увеличение энергии электронного сгустка до 35 % по сравнению с базовым вариантом. Также изучены эффекты, происходящие с протонным сгустком при отрицательном градиенте плотности плазмы.

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

УДК 533.9

Управление потенциалом плазмы в осесимметричной многопробочной ловушке ГОЛ-NB

П. А. Полозова

Новосибирский государственный университет

ГОЛ-NB — открытая аксиально-симметричная многопробочная магнитная ловушка, состоящая из центральной пробочной ловушки длиной 2,3 м, двух секций с многопробочным полем длиной 3 м и концевых баков расширителей плазменного потока. Для нагрева мишенной плазмы используются два нейтральных инжектора суммарной мощностью до 1 МВт [1].

Плазма в аксиально-симметричных ловушках предрасположена к желобковой неустойчивости. Такой тип колебаний представляет наибольшую опасность для устойчивости, так как характеризуется большим инкрементом. Часть желобковых колебаний подавляется торцевой стабилизацией [2] и эффектом КЛР [3], но в плазме с низким β эффект КЛР не может стабилизировать все потенциальные возмущения. Перспективным способом стабилизации данной неустойчивости является метод, заключающийся в прикладывании к электродам, на которые опирается плазма, дифференциальных по радиусу потенциалов, что создает радиальное электрическое поле в плазме. В результате плазма дифференциально по радиусу вращается, препятствуя дальнейшей эволюции желобков и выбросу плазмы на стенку ловушки.

Для реализации метода вихревого удержания плазмы разработана, создана и введена в эксплуатацию на установке ГОЛ-NB система внутрикамерных электродов с соответствующими комплектами управляемого питания. Исследованы амплитуды и характерные частоты колебаний локальных потенциалов плазмы в зависимости от подаваемых на плазмоприемники и лимитеры напряжений. Использующийся диагностический комплекс включает в себя электростатические зонды.

В докладе представлено устройство системы управления потенциалами и результаты исследований поведения параметров плазмы в зависимости от сценария эксперимента.

1. Поступаев В. В., Юров Д. В. Моделирование референсного сценария работы многопробочной ловушки ГОЛ-NB // Физика плазмы. 2016. Т. 42, № 11. С. 966–977.
2. Ryutov D. D. et al. Magneto-hydrodynamically stable axisymmetric mirrors // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18, № 9. P. 092301.
3. Rosenbluth M. N., Krall N. A., Rostoker N. Finite Larmor radius stabilization of “weakly” unstable confined plasmas // General Dynamics Corp., San Diego, Calif., 1962. № GA-2371.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. А. Иванов

УДК 533.9.07

Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для толерантного REMIX-топлива

Д. С. Щербина

Томский политехнический университет

Приоритетным направлением развития атомной энергетики в России является создание реакторов на тепловых нейтронах с использованием оксидного уран-плутониевого топлива (REMIX-топлива), получаемого при переработке ОЯТ. Однако у него есть недостаток — низкая теплопроводность.

Перспективным является толерантное REMIX-топливо в виде топливных оксидных композиций (ТОК), включающих оксиды делящихся металлов (уран, плутоний), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и малое поперечное сечение захвата нейтронов [1].

Применяемые методы получения ТОК (раздельное получение и механическое смешение, «золь-гель») многостадийны, длительны, не обеспечивают равномерное распределение фаз, требуют дополнительного водородного восстановления, имеют высокие энергозатраты [1].

К преимуществам плазмохимического синтеза ТОК в воздушной плазме из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), следует отнести: одностадийность, высокую скорость, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, гомогенное распределение и требуемый состав фаз без дополнительного водородного восстановления, низкие энергозатраты [2].

В работе представлены результаты термодинамического моделирования процесса плазмохимического синтеза ТОК в воздушной плазме из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и магния (ВОНР), включающих органический компонент (ацетон). Определены составы растворов ВОНР, имеющих адиабатическую температуру горения не менее 1500 К, а также режимы их переработки, обеспечивающие энергоэффективный синтез в воздушной плазме ТОК «диоксид плутония — диоксид урана — оксид магния» различного состава с массовой долей матрицы от 5 до 50 %.

Результаты расчетов могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза ТОК для толерантного REMIX-топлива.

1. Алексеев С. В., Зайцев В. А., Толстоухов С. С. Дисперсионное ядерное топливо. М.: Техносфера, 2015. 248 с.

2. Novoselov I. Yu., Karengin A. G., Babaev R. G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 1938. P. 1–5.

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

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 538.9

Temperature corrections to resistance of HgTe semimetal quantum well

A. V. Snegirev

Novosibirsk State University
A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, Novosibirsk

HgTe quantum wells (QW) are quite novel and interesting materials. At the different sample's thickness, they can exhibit the properties of either topological insulators or two-dimensional semimetals [1, 2]. In this work, we theoretically explore transport properties of thick samples, when HgTe QW is in two-dimensional semimetal regime. In low temperature experiments, these samples show linear or quadratic growth of resistance with temperature at the different gate voltage. And there is no common theoretical description of this behavior.

In this work we derive consistent theory of resistance's temperature dependence in low temperature limit for two-dimensional semimetals. We apply temperature Green's function technique to study the effect of electron-hole scattering on the resistance's temperature dependence. The main assumption was quasielastic scattering due to dramatic mass difference between electrons and holes.

Within the framework of this approach, we obtain expressions that recreate linear and quadratic temperature dependence of HgTe QW resistivity in different regimes. The direct comparison of our theoretical findings with experimental results shows excellent agreement.

The results of this work open a way for better understanding of HgTe QW physics.

1. Konig M. et al. Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells // Sci. 2007. Vol. 318, iss. 5851. P. 766–770.
2. Kvon Z. D. et al. Two-dimensional semimetal in HgTe-based quantum wells // J. Low Temp. Phys. 2011. Vol. 37. P. 202–209.

Scientific supervisor — Dr. V. M. Kovalev

УДК 538.9+548.5

Кинетика сверхструктурных переходов на поверхности Si(111) при адсорбции Sn

Н. Ю. Абдюшев

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

При создании высококачественных низкоразмерных структур необходимо контролировать атомные процессы, протекающие на ростовой кристаллической подложке. Использование сурфактантных покрытий позволяет изменить кинетику роста: предосажденный слой Sn ускоряет процессы диффузии на поверхности Si [1] и препятствует проникновению Ge вглубь Si при гетероэпитаксии [2]. Однако адсорбция сурфактантных покрытий Sn также приводит к образованию примесных поверхностных структур, в связи с чем цель данной работы — выявление общих закономерностей формирования реконструкции Sn на поверхности Si(111).

Методом *in situ* дифракции быстрых электронов на отражение был изучен сверхструктурный переход (7×7) ⇒ ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Sn на поверхности Si(111), индуцированный адсорбцией Sn при T = 600–890 °C. Измерены температурные зависимости скоростей изменения интенсивности дифракционных рефлексов реконструкций (7×7), ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Sn при осаждении и десорбции Sn. Выявлено, что энергия активации сверхструктурного перехода составляет 0,64 ± 0,1 эВ. При T < 800 °C появление рефлексов структуры ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Sn с *одновременным* затуханием рефлексов (7×7) начинается после некоторой задержки с момента включения внешнего потока Sn. Замечено, что при T > 800 °C рефлексы структуры ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Sn появляются *после* исчезновения рефлексов (7×7). Тогда как при T < 800 °C скорости изменения интенсивности рефлексов этих сверхструктур возрастают с повышением температуры, при T > 800 °C они резко начинают убывать, что, как предполагается, связано с активацией десорбции Sn. По скорости нарастания дифракционных рефлексов ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Sn при структурном переходе «1×1»-Sn ⇒ ($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)-Sn в отсутствие внешнего потока Sn была исследована десорбция Sn с поверхности Si(111).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 19-72-30023) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры».

1. Dolbak A. E., Olshanetsky B. Z. Effect of adsorbed Sn on Ge diffusivity on Si(111) surface // Central Eur. J. Phys. 2008. Vol. 6. P. 634–637.
2. Lin X. W. et al. Ge/Si heterostructures grown by Sn-surfactant-mediated molecular beam epitaxy // J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectron. Nanom. Struct. 1995. Vol. 13, No. 4. P. 1805–1809.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук В. Г. Мансуров; А. С. Петров

УДК 538.9

Влияние длительности процесса микродугового оксидирования на формирование фазовой структуры кальций-фосфатных покрытий

Е. Б. Акимова[1,2], Е. А. Казанцева[2,3]

[1]Томский политехнический университет
[2]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
[3]Томский государственный университет

Работа посвящена изучению влияния величины приложенного анодного напряжения (200, 350 В) и длительности процесса (1; 2; 4 и 10 мин) микродугового оксидирования (МДО) на фазовую структуру биоактивных кальций-фосфатных (КФ) покрытий на поверхности титана. Методом рентгенофазового анализа установлено, что КФ-покрытия, сформированные при напряжении 200 В независимо от длительности МДО, находятся в рентгеноаморфном состоянии, о чем свидетельствовала широкая область диффузного рассеяния от аморфной КФ-фазы в диапазоне углов 2θ = 20°–37°. Наблюдаемые на рентгенограммах рефлексы от альфа-фазы Ti соответствовали материалу подложки. С увеличением времени МДО от 2 до 10 мин и, как следствие, толщины покрытия от 28,6 до 55,5 мкм интенсивность рефлексов от подложки уменьшилась, а интенсивность диффузного гало не изменилась, что указывает на однородность фазовой структуры КФ-покрытий по толщине.

Повышение напряжения до 350 В привело к структурно-фазовым превращениям в покрытиях от рентгеноаморфного состояния до аморфно-кристаллического. При этом увеличение длительности процесса МДО от 1 до 10 мин и, как следствие, толщины покрытий сопровождалось формированием неоднородной фазовой структуры по их толщине. Так, в течение 1 мин формировалось покрытие толщиной 26,0 мкм в рентгеноаморфном состоянии, подобно покрытиям, сформированным при низком напряжении 200 В. Увеличение длительности МДО от 2 до 4 мин привело к росту толщины покрытий от 55,5 до 89,0 мкм и формированию аморфно-кристаллической структуры в покрытиях. Об этом свидетельствовали интенсивные рефлексы на углах 2θ 26,3; 26,5 и 30,1° рентгенограмм, соответствующие триклинной КФ-фазе монетита ($CaHPO_4$), и слабоинтенсивная область диффузного рассеяния, соответствующая аморфной КФ-фазе. Увеличение времени нанесения от 4 до 10 мин привело к росту толщины покрытия до 135,2 мкм и увеличению объемной доли фазы $CaHPO_4$ от 51 до 80 об.%, а также к формированию новой тетрагональной фазы β-пирофосфата кальция (β-$Ca_2P_2O_7$) в аморфно-кристаллических покрытиях.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФПМ СО РАН (проект № FWRW-2021-0007).

Научный руководитель — канд. техн. наук Е. Г. Комарова

УДК 538.9

Ab initio моделирование оптических свойств гетероструктуры графен/MoS_2

А. В. Балахнин

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

Графен обладает отличной электропроводностью и механической прочностью, превосходной теплопроводностью и высоким светопропусканием в видимом и инфракрасном диапазонах. Графен широко используется в таких приложениях, как солнечные батареи, освещение и сенсорные экраны. Однако широкое применение графена ограничено из-за его нулевой ширины запрещенной зоны.

Одним из методов, используемых для расширения области применения графена, является формирование многослойной структуры или гетероструктуры. Объединение различных двумерных материалов вместе может сформировать двухслойный или даже многослойный искусственный материал, который поддерживается ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями. Одним из таких материалов является гетероструктура графен/MoS_2, которая открывает возможности для многих приложений. Чанг и соавт. [1, 2] успешно синтезировали композиты слоистого графена или графеновый нанолист/MoS_2 методом растворной фазы с L-цистеином, и полученные композиты продемонстрировали трехмерную архитектуру и отличные электрохимические характеристики, а также они могут выступать в качестве анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов.

Исследования оптических свойств таких гетероструктур до сих пор отсутствуют. Гетерогенная структура графена имеет блестящие перспективы для приложений, а электронная структура MoS_2 с прямой запрещенной зоной является важным свойством для многих оптических приложений; поэтому в этой работе мы исследуем оптические свойства гетероструктуры графен/MoS_2 на основе расчетов функционала плотности.

В работе рассчитаны реальная и мнимая части диэлектрической проницаемости, а также спектр комбинационного рассеяния гетероструктуры графен/MoS_2. Результаты работы могут быть полезны для интерпретации экспериментальных фактов по оптическим свойствам двумерных материалов.

1. Chang K., Chen W. In situ synthesis of MoS2/graphene nanosheet composites with extraordinarily high electrochemical performance for lithium ion batteries // Chem. Commun. 2011. Vol. 47. P. 4252–4254.
2. Chang K., Chen W. L-Cysteine-Assisted Synthesis of Layered MoS2/Graphene Composites with Excellent Electrochemical Performances for Lithium Ion Batteries // ACS Nano. 2011. Vol. 5. P. 4720.

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

УДК 538.9

Эффективность сбора заряда рентгеновскими сенсорами, изготовленными из теллурида кадмия

Ван Юйхань

Томский государственный университет

В работе представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик, амплитудного спектра и эффективности сбора заряда рентгеновскими сенсорами на основе теллурида кадмия (CdTe) и твердого раствора кадмий-цинк-теллур (CZT). Размеры сенсоров составляли 5 × 5 мм^2 при толщине 2,5 мм. Вольт-амперные характеристики сенсоров измерялись при комнатной температуре с использованием источника-измерителя Keithly 2410. Регистрация амплитудного спектра осуществлялась с помощью зарядочувствительного усилителя и усилителя-формирователя с временем формирования 250 нс при облучении квантами источников ^{241}Am и ^{133}Ba. Оценки величины произведения времени жизни на подвижность носителей заряда были выполнены с использованием экспериментальных зависимостей эффективности сбора заряда от напряжения на сенсоре.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.) в части измерения и анализа вольт-амперных характеристик; а также в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (проект № FSWM-2022-0018) в части исследования амплитудного спектра и эффективности сбора заряда сенсорами.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. О. П. Толбанов

УДК 537.3

Тензорезистивный эффект и электронный транспорт в полимерных композитах на основе хитозана и малослойного графена

Д. И. Гапич[1,2], А. С. Буинов[3]

[1]Новосибирский государственный технический университет
[2]Институт неорганической химии
им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск
[3]Байкальский институт природопользования, Улан-Удэ

Электропроводящие полимерные композиты представляют большой интерес в современной электронике и электронных устройствах, поскольку композиты могут использоваться в качестве тензодатчиков в условиях, недоступных для классических материалов. Например, для измерения развитых и повышенных деформаций, в частности для мониторинга движений человека.

Хитозан является биосовместимым полимером. Добавление электропроводящей фазы в диэлектрическую матрицу хитозана позволяет получать электропроводящие композиты. Для достижения однородности таких композитов при синтезе необходимо применять поверхностно-активные вещества (ПАВ) для получения стабильных коллоидных систем с частицами наполнителя, из которых формируются пленочные материалы.

В данной работе исследованы тензорезистивные и электронные транспортные свойства композитов на основе хитозана с использованием различных ПАВ, поливинилпирролидона и Pluronic F108, с малослойным графеном (МСГ) в качестве электропроводящей фазы. Концентрация МСГ в композитах составляла от 2 до 5 % (масс.).

В рамках работы определен один из ключевых параметров тензорезистивного эффекта — коэффициент тензочувствительности, представляющий собой отношение относительного изменения электросопротивления к деформации, вызвавшей это изменение. Малое изменение коэффициента тензочувствительности после 10^6 циклов нагрузки, а также работоспособность композитов при деформациях до 5 % делает их перспективными для изготовления биосовместимых тензорезисторов.

Для определения морфологии образцов и, соответственно, физической природы наблюдаемого тензорезистивного эффекта были проведены исследования температурных зависимостей электросопротивления в диапазоне от 4,2 до 300 К. Установлено, что при температурах менее 30 К наблюдается трехмерная прыжковая проводимость, что говорит о том, что электронный транспорт осуществляется между дефектными частицами МСГ, при этом не только вдоль отдельных частиц, но и поперек. Исходя из морфологии установлена природа тензорезистивного эффекта: изменение площади перекрытия между частицами приводит к изменению электросопротивления композитов.

Научный руководитель — канд. техн. наук В. А. Кузнецов

УДК 538.911

Влияние отжига при различных условиях на параметры Ti/InAlAs и Pt/InAlAs барьеров Шоттки

И. Ю. Гензе

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

Барьер Шоттки (БШ) металл/InAlAs — функциональный элемент, определяющий характеристики и стабильность работы СВЧ-транзисторов и фотодетекторов микроволнового диапазона. Особенно важным является формирование однородной границы раздела с воспроизводимыми параметрами (высота барьера φ_b, коэффициент идеальности n) [1].

БШ на основе InAlAs может быть выполнен с помощью различных металлов, однако наиболее изученным и широко применяемым является Ti, поскольку он обладает хорошими адгезионными свойствами. Типичное значение φ_b таких БШ составляет 0,65–0,7 эВ. При необходимости увеличения высоты барьера контакт может быть образован с помощью тонкого барьерного слоя из металла с большей работой выхода (Pt, Ir, Pd). В данном случае удается получить БШ со значением φ_b 0,8–0,85 эВ. Использование ионной очистки поверхности InAlAs также позволяет увеличить φ_b до значения 1,09 эВ [2]. Однако влияние отжига, широко применяемого для стабилизации химического состава и структуры границы раздела, на параметры БШ до конца не изучено.

В данной работе изучены вольт-амперные характеристики (ВАХ) БШ Ti/InAlAs и Pt/InAlAs. Проведена корреляция между барьерными параметрами, строением и химическим составом границы раздела в зависимости от условий отжига в атмосфере формовочного газа (5 % H_2, 95 % N_2).

Путем анализа ВАХ БШ после различного по времени и температуре отжига были определены условия для увеличения значения φ_b по сравнению с исходным. Наибольшее увеличение высоты барьера составляло 0,04 и 0,12 эВ в случае Ti/InAlAs и Pt/InAlAs соответственно.

1. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник / пер. с англ.; под ред. Г. В. Степанова. М., 1982. 208 с.: ил.
2. Fricke A. et al. 1.09-eV Schottky barrier height of nearly ideal Pt/Au contacts directly deposited on n- and p+- Al0.48In0.52As layers // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65, No. 6. P. 755–757.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. С. Аксенов

УДК 538.958

Влияние ионного облучения на люминесцентные свойства гексагонального нитрида бора

О. А. Гогина

Санкт-Петербургский государственный университет

Одно из примечательных свойств гексагонального нитрида бора — наличие дефектов, являющихся источниками одиночных фотонов, природа которых, как и процессы образования, остаются неизвестными. Такие источники в диапазоне спектра 200–700 нм характеризуются полосами люминесценции с энергиями ~ 2,0; 2,9 и 4,1 эВ [1].

В работе представлены результаты воздействия сфокусированных ионных пучков (ФИП) Ga+ и He+ на тонкий эксфолированный монокристалл hBN. Экспериментальные исследования проведены на оборудовании междисциплинарного ресурсного центра по направлению «Нанотехнологии» научного парка СПбГУ. Облучение ионами Ga^+ и He^+ реализовано на установках: ионно-лучевой системы Zeiss Auriga с E_{Ga} = 30 кэВ с дозами облучения в диапазоне $5{,}6\cdot10^{12}$–$1{,}1\cdot10^{15}$ 1/см^2 и сканирующего ионного гелиевого микроскопа Zeiss Orion и энергией E_{He} = 30 кэВ с дозами в диапазоне $5\cdot10^{13}$–$1\cdot10^{16}$ 1/см^2. Католюминесцентные исследования были проведены в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Zeiss Supra 40VP с системой регистрации Gatan Mono CL3+.

Установлено, что в то время, как облучение ионами Ga^+ приводило к необратимому падению люминесценции всех спектральных полос, облучение ионами He^+, первоначально приводящее также к уменьшению интенсивности люминесценции полосы 1,9 эВ, в результате последующего воздействия электронного пучка СЭМ сменялось на ее возрастание выше исходного уровня. Для объяснения обнаруженного явления высказано предположение, что непосредственное воздействие ионов гелия создает первичные собственные дефекты вакансионного и междоузельного типа, которые трансформируются в излучательные центры в результате миграции, стимулированной присутствием электронно-дырочных пар, генерируемых электронным лучом по механизмам, ранее предложенным при описании свойств радиационных дефектов в GaAs [2].

Исследование реализовано за счет средств гранта Российского научного фонда (№ 23-22-00067).

1. Korona T., Chojecki M. Exploring point defects in hexagonal boron-nitrogen monolayers // Int. J. Quantum Chem. 2019. Vol. 119, No. 14. P. e25925.
2. Pons D., Bourgoin J. C. Irradiation-induced defects in GaAs // J. Phys. C: Solid State Phys. 1985. Vol. 18, No. 20. P. 3839.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. О. Ф. Вывенко

УДК 537.311.322

Увеличение плотности массива квантовых точек GaAs/AlGaAs и их оптические свойства

Е. И. Дерибина

Санкт-Петербургский государственный университет

В отличие от самоорганизованных индиевых квантовых точек (КТ), в КТ, полученных методом капельной эпитаксии, отсутствуют напряжения, связанные с рассогласованием постоянных решеток точки и барьеров, что делает их привлекательным объектом для исследований.

С помощью заполнения наноотверстий, полученных методом капельной эпитаксии (NFDE), были выращены два образца с квантовыми точками GaAs/AlGaAs. Капли галлия были контролируемо осаждены на подложке арсенида галлия при температуре 510 °C. Далее в присутствии паров мышьяка они преобразовались в GaAs, что сопровождалось травлением подложки. Затем был выращен барьер 7,3 нм $Al_{0,47}Ga_{0,53}As$, отверстия были заполнены 3,4 нм GaAs и закрыты вторым барьером 84 нм $Al_{0,38}Ga_{0,62}As$. Так был получен массив нанообъектов с поверхностной плотностью 0,7 мкм$^{-2}$.

Для изменения плотности КТ необходимо изменение или температуры подложки во время осаждения галлия, или скорости осаждения галлия. Первый способ дает больший эффект, поэтому при росте нового образца температура подложки была снижена до 400 °C, и для сохранения размеров капель было увеличено время осаждения галлия. Таким образом удалось добиться увеличения плотности почти в 4 раза. Массив нанообъектов был распределен по поверхности с плотностью 3,2 мкм$^{-2}$. По данным атомно-силовой микроскопии распределение размеров нанообъектов одномодально, т. е. нет яркого деления на различные объекты роста.

С помощью спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) и отражения при температуре 4 К были получены оптические характеристики образцов. На спектрах μФЛ наблюдаются отдельные пики от КТ, образующие два ансамбля полос, связанных с различными областями локализации в нанообъектах (сами КТ и области в непосредственной близости вокруг них).

Работа была выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника». Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (RFBR № 19-52-12046).

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

УДК 538.911, 536.212

Программный комплекс CATABASIS для моделирования физических свойств наноразмерных углеродных пленок методом молекулярной динамики

П. В. Доброгост, И. А. Зур

Белорусский государственный университет, Минск

Наноразмерные покрытия алмазоподобного углерода (АПУ) применяются в качестве износостойких и просветляющих покрытий, что привело к большому вниманию со стороны исследователей к трибологическим и оптическим свойствам. В последнее время актуально использование АПУ в качестве резистивных покрытий электродов детекторов заряженных частиц для повышения стабильности их функционирования, что обуславливает актуальность исследования электрических и теплофизических характеристик АПУ.

Эффективным методом прогнозирования свойств наноструктур является метод молекулярной динамики, который применяется и в настоящем исследовании. Цель работы — создание программного комплекса для облачных вычислений и получение на его основе температурных зависимостей теплоемкости и теплопроводности пленок АПУ толщиной до 20 нанометров.

Для корректного описания макроскопических свойств исследуемого материала необходим анализ ансамбля, состоящего из ~ 10^7 атомов, что делает целесообразным применение облачных технологий, позволяющих не только обрабатывать и анализировать большое количество данных, но и использовать общие хранилища данных результатов экспериментов.

Для разработки облачных приложений широко применяются сложные архитектуры, состоящие из нескольких взаимодействующих между собой компонент. В данном программном комплексе была выбрана простейшая структура, состоящая из трех основных логических блоков: веб-интерфейса, серверной части и коммуникационного слоя между ними. Веб-интерфейс предоставляет пользовательский интерфейс для проведения экспериментов. Серверная часть — один или несколько вычислительных узлов, используемых для запуска компьютерных моделей, построенных на основе пакета LAMMPS с открытым исходным кодом. В качестве средства обмена данными между различными частями приложения используется облачная платформа Firebase, управляющая передачей большого количества вычислительных данных в режиме реального времени.

Работа была выполнена в СНИЛ Вычислительного эксперимента и игровых технологий БГУ.

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

УДК 537.9

Реакция сверхизоляторного состояния в пленках NbTiN на прямоугольные импульсы напряжения

Д. Е. Дураков

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

Изучение эволюции сверхпроводимости тонких пленок при увеличении беспорядка привели к обнаружению перехода «сверхпроводник — сверхизолятор», причем оба состояния обладают своими особенностями. При изучении сверхизоляторного состояния ранее нами было обнаружено, что при подаче периодических прямоугольных сигналов на образец разрушение данного состояния осуществляется не моментально, а через некоторое время задержки переднего фронта сигнала, неизученное на сегодняшний день. При этом это время слабо зависит от температуры, однако быстро уменьшается при увеличении амплитуды напряжения. Закономерности изменения временной зависимости тока от геометрических параметров образцов, сопротивления на квадрат и критического напряжения пока неясны и требуют дальнейших исследований.

В настоящей работе были взяты две пленки $Nb_{0,67}Ti_{0,33}N$ толщиной 7–8 нм и шириной 50 мкм, выращенные методом атомарно-слоевого осаждения при температуре 350 °C в виде холловского мостика. Все измерения проводились в криостате растворения $^3He/^4He$. На пленки с помощью генератора сигналов подавалось напряжение прямоугольной формы. Ток, протекающий через образец, проходил через токовый предусилитель, в результате чего конвертировался в напряжение и измерялся с помощью осциллографа по двухточечной схеме при температуре 20 мК.

В ходе проведенных исследований отклика сверхизоляторных систем на импульсное напряжение обнаружено, что образцы с высоким сопротивлением на квадрат имеют временную зависимость тока в виде нескольких скачкообразных увеличений тока и окончательного его насыщения в образце. Такая зависимость тока от времени появляется вследствие неоднородности образцов, в которых последовательно при увеличении напряжения появляются новые каналы проводимости. Каждый канал проводимости имеет свое значение критического напряжения. Зависимость времени задержки каждого канала от разницы между напряжением, поданным на образец, и критическим напряжением канала ведет себя степенным образом. Примечательно, что показатели степеней соответствующих каналов обоих образцов совпадают.

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

УДК 544.034+621.315.592

Формирование заряженных вакансий в анионной подрешетке AlAs

В. Е. Жилицкий

Новосибирский государственный университет

Высокотемпературный послеростовой отжиг гетероструктур широко применяется для конструирования твердотельных электронных приборов, поскольку позволяет модифицировать структуру запрещенной зоны, управлять силой осциллятора оптических переходов, контролировать сверхтонкую структуру экситонных состояний и уменьшать деформационные градиенты [1]. Для полупроводниковых гетероструктур A3-B5 перемешивание атомов при отжиге происходит по вакансионному механизму [2]. Таким образом, темп генерации вакансий и их коэффициент диффузии играют ключевую роль в перемешивании атомов в гетероструктурах при отжиге. Вакансии являются заряженными дефектами, а значит, темп их генерации может зависеть от концентрации носителей заряда в структуре. Влияние термически генерируемых равновесных носителей на генерацию и диффузию вакансий в общем виде описан для случая объемных кристаллов (толстых полупроводниковых слоев) [3]. Однако диффузия в перспективном полупроводниковом материале AlAs изучена слабо. И зачастую в моделях учитывается влияние только легирующих примесей на электронную подсистему кристалла, тогда как сами вакансии могут выступать как донорная или акцепторная примесь.

В данной работе выполнено моделирование влияния концентрации носителей заряда на динамику генерации и рекомбинации (по механизму Френкеля) нейтральных и заряженных вакансий в объемном AlAs. Моделирование выполнено для анионной подрешетки (вакансии мышьяка). Показано, что темп генерации заряженных вакансий увеличивается с ростом концентрации дырок и уменьшается с ростом концентрации электронов.

1. Li E. H. Semiconductor Quantum Wells Intermixing. Amsterdam: Gordon and Breach, 2000.
2. Marsh J. H. Quantum well intermixing // Semlcond. Sci. Technol. 1993. Vol. 8. P. 1136.
3. Diffusion Processes in Advanced Technological Materials / ed. by Devendra Gupta. N. Y.: Springer-Verlag, 2005.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. Т. С. Шамирзаев

УДК 539.211

Ван-дер-ваальсовый гетероэпитаксиальный рост $SnSe_2$ на поверхности Si(111)

К. Е. Захожев

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

Одним из перспективных направлений исследований в области физики конденсированного состояния является изучение слоистых двумерных материалов, таких как халькогениды металлов. Они обладают различными электронными и оптическими свойствами, тесно связанными со структурой слоев. $SnSe_2$ перспективен для применения в электронике нового поколения, в том числе в гибкой электронике, поскольку имеет высокую подвижность носителей заряда и высокое электронное сродство по сравнению с другими халькогенидами металлов. Несмотря на существование проблемы интеграции двумерных полупроводниковых материалов с кремниевой электроникой, в настоящий момент практически нет опубликованных материалов о механизмах гетероэпитаксиального роста слоистого $SnSe_2$ на кремниевых подложках. Данная работа посвящена ван-дер-ваальсовому гетероэпитаксиальнму росту $SnSe_2$ на поверхности Si(111).

Разработана методика роста слоистого $SnSe_2$ на поверхности Si(111), заключающаяся в следующем: (1) получение реконструкции 1 × 1 поверхности Si(111) при температуре ~ 450 °C; (2) пассивация поверхности Si(111) монослоем селена при температуре 70–100 °C; (3) осаждение атомов Sn и Se с отношением потоков ~ 1/10 при температуре ~ 200 °C. По данной методике реализован рост $SnSe_2$ на поверхности Si(111) в камере отражательного электронного микроскопа. В ходе эксперимента наблюдались картины дифракции быстрых электронов на отражение, соответствующих дифракции от 2D-слоев $SnSe_2$.

Методом *ex situ* атомно-силовой микроскопии получено топографическое изображение поверхности пленки $SnSe_2$. Рост проходил по двумерно-островковому механизму, а высота атомных ступеней составила ~ 0,6 нм, что соответствует высоте слоя $SnSe_2$. Показано присутствие 3D-островков $SnSe_2$, образовавшихся как в областях выхода на поверхность дислокаций с винтовой компонентой, так и в процессе зарождения и разрастания 2D-островков с гладкой террасой на вершине, с шероховатостью ~ 0,16 нм. Спектр комбинационного рассеяния света выявил набор колебательных мод, соответствующий 1T-$SnSe_2$.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 22-72-10124) с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры».

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

УДК 537.312.7

Мемристоры на основе двуслойных структур из пленок нестехиометрических германосиликатных стекол

Инь Липин

Новосибирский государственный университет

Пленки нестехиометрического стекла $GeSi_xO_y$ и многослойные структуры на их основе были получены методом высоковакуумного электронно-лучевого осаждения из паровой фазы. Порошки GeO_2, SiO, SiO_2 или Ge совместно испарялись и осаждались на холодную (100 °C) подложку *n* или p^+-Si(001) с удельным сопротивлением $\rho = 5{,}5 \pm 1$ или $\rho = 0{,}0016 \pm 0{,}0001$ Ом·см. Стехиометрический состав $GeSi_xO_y$ был определен из анализа данных рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Морфологию поверхности пленок изучали методом атомно-силовой микроскопии. Структурные свойства пленок $GeSi_xO_y$ и многослойных структур на их основе изучались методами колебательной спектроскопии, такими как комбинационное рассеяние света и инфракрасное поглощение. В качестве верхнего электрода был нанесен прозрачный контакт индий-олово-оксид (ITO) и изготовлены мемристорные структуры «металл — изолятор — полупроводник» (МДП) [1].

Вольт-амперные характеристики, а также резистивные циклы переключений были исследованы как в исходных, так и в отожженных (500 °C, 30 мин) мемристорных структурах. Обратимые резистивные переключения (мемристорный эффект) наблюдались для двухслойных $p^+Si(001)/GeSi_{0,9}O_{1,8}/GeSi_{0,9}O_{2,8}$/ITO и $p^+Si(001)/GeSi_{0,9}O_{1,8}$/SiO/ITO МДП-структур. Кроме этого, в многослойных структурах наблюдались промежуточные состояния сопротивления. Эти состояния могут быть перспективны для использования в многобитных мемристорах и для моделирования нейронных сетей. Отжиги привели к более стабильным резистивным переключениям. На МДП-структурах, выращенных на кремнии *n*-типа, практически не наблюдалось мемристорных переключений, однако они оказались весьма чувствительными к воздействию света [2].

1. Yushkov I. D., Yin Liping, Kamaev G. N. et al. Memristors Based on Many-Layer Non-Stoichiometric Germanosilicate Glass Films // Electronics. 2023. Vol. 12 (4). P. 873. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics12040873.

2. Володин В. А., Zhang F., Юшков И. Д. и др. Нестехиометрические германосиликатные пленки на кремнии для микроэлектроники: мемристоры и другие применения // Автометрия. 2022. Т. 58, № 6. С. 42–53. DOI: 10.15372/AUT20220606.

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

УДК 538.9

Спектроскопия комбинационного рассеяния света и фотолюминесценция нанопроволок GaAs

И. В. Калачев

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

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценция (ФЛ) являются методами, наиболее часто используемыми для оптического анализа полупроводниковых микро- и наноструктур.

Полупроводниковые нанопроволоки имеют потенциальное широкое применение в различных областях наносенсорики, фотовольтаики и наноэлектроники. В связи с этим существует потребность в детальном изучении их оптических свойств. Несмотря на наличие работ по изучению спектров КРС и ФЛ от массивов нанопроволок, спектры от единичных нанопроволок мало изучены.

Данная работа посвящена изучению ФЛ и КРС на оптических фононах нанопроволок GaAs с ориентациями (111) и (001), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структурные параметры нанопроволок GaAs, перенесенных на гладкую золотую подложку, определялись методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Обнаружена сильная анизотропия интенсивности сигналов КРС на оптических фононах GaAs и экситонной ФЛ в зависимости от выбора поляризации падающего света вдоль и поперек нанопроволок. В спектрах КР наблюдаются моды поперечных и продольных оптических фононов и их обертона вплоть до 4-го порядка, а наблюдение обертонов коррелирует с интенсивностью ФЛ. Построены спектральные карты распределения интенсивности сигналов КРС и ФЛ в микрометровом масштабе для серии нанопроволок с различными структурными параметрами. Рассматривается причина поляризационной зависимости ФЛ для нанопроволок GaAs разного диаметра (от 30 до 70 нм) и длиной несколько микрон. Обсуждаются механизмы резонансного КРС и поляризационно-зависимой ФЛ нанопроволок GaAs.

Научный руководитель — И. А. Милехин

УДК 538.9

Плазмон-усиленное КРС графеном

В. А. Калинин

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

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) зарекомендовала себя как точный инструмент для анализа широкого класса веществ. Мировые тенденции в области оптической спектроскопии связаны с переходом к исследованию малых количеств аналита, в связи с чем актуальным направлением в данной области является развитие подходов к усилению оптического отклика исследуемым веществом.

Одним из таких подходов является гигантское комбинационное рассеяния света (ГКРС), суть которого заключается в многократном усилении сигнала КРС (до 10^6) полем локализованных плазмонов, возбуждаемых на поверхности металлических структур. При этом пространственное разрешение метода ГКРС ограничено дифракционным пределом и не позволяет выполнять измерение оптических спектров единичных наноструктур. Преодолеть этот предел призван метод усиленного зондом комбинационного рассеяния света (TERS), который позволяет добиться колоссального увеличения оптического отклика (до 10^{13} раз). В методе ГКРС активно используется графен в качестве выравнивающего покрытия при создании плазмонных подложек. Однако, несмотря на широкое применение графена в этом качестве, его собственные колебательные свойства в подобных гибридных металл-полупроводниковых структурах остаются слабоизученными. Данная работа посвящена изучению ГКРС графеном, расположенным на подложке, представляющей собой периодический массив золотых нанодисков различного диаметра.

В работе достигнуто значительное усиление интенсивности сигнала ГКРС основными колебательными модами графена (КУ = 130). Установлен резонансный характер плазмонного усиления оптического отклика графеном при различных длинах волн возбуждающего излучения. При оптимальном диаметре золотых нанодисков, обеспечивающем наибольшее усиление сигнала ГКРС, выполнено исследование колебательных свойств графена в нанометровом масштабе методом TERS. Записаны карты распределения интенсивности основных колебательных мод графена с КУ ~ 100 и пространственным разрешением ~ 15 нм, визуализирующие кольца, соответствующие максимуму локальных ЭМ полей на краях золотых нанодисков.

Научный руководитель — Н. Н. Курусь

УДК 621.317

Солнечно-слепые гетероструктуры Ga_2O_3/GaAs: Cr, чувствительные к УФ-излучению

О. С. Киселева, Б. О. Кушнарев,
В. Л. Олейник, Ю. С. Петрова, А. В. Цымбалов

Томский государственный университет

Перспективным направлением использования оксидов является разработка детекторов коротковолнового излучения. Особый интерес представляют устройства, способные работать в автономном режиме.

В данной работе были исследованы электрические и фотоэлектрические характеристики структур Ga_2O_3/GaAs:Cr. Пленку оксида галлия толщиной 120–150 нм получали ВЧ магнетронным распылением мишени в газовой смеси Ar/O_2 на подложки высокоомного GaAs:Cr с удельным сопротивлением 10^9 Ом·см (HR GaAs). После нанесения Ga_2O_3 структуры не подвергались термической обработке. На тыловую сторону полупроводниковой подложки наносили контакты в виде сплошной металлической пленки (Au:Ge), а электрод к оксиду галлия создавали напылением Pt через маски диаметром 1 мм. Площадь контакта к Ga_2O_3 (затвор) составляла $1{,}04 \cdot 10^{-2}$ мм$^{-2}$.

В результате исследований темновых вольт-амперных характеристик сделан вывод о том, что в структурах Ga_2O_3/GaAs:Cr HR GaAs проявляет свойства полупроводника *p*-типа проводимости. При воздействии УФ-излучения с λ = 254 нм на образцы наблюдается рост токов. При последующей подаче напряжения на структуру во время непрерывного действия УФ-излучения фототоки (I_L) увеличиваются, а затем стабилизируются. Разница токов при освещении с λ = 254 нм и темнового составляет несколько порядков. Это позволяет использовать такие структуры в качестве детекторов УФ-излучения. Наличие отклика при U = 0 В говорит о возможности работы таких фотодиодов в автономном режиме.

При освещении образцов белым светом с большой интенсивностью рост токов практически отсутствует. Таким образом, исследованные структуры можно считать солнечно-слепыми.

В фотодетекторах на основе структур Ga_2O_3/GaAs:Cr отсутствуют остаточные токи. Времена отклика (τ_r) и восстановления (τ_d), для исследованных образцов не превышают 1 с.

Исходя из выше исложенного, можно сделать вывод, что образцы способны работать в автономном режиме, обладают высоким быстродействием и могут быть использованы в качестве детекторов УФ-излучения вследствие достаточной чувствительности к излучению с λ = 254 нм.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. В. М. Калыгина

УДК 538.915

Первопринципное моделирование электронной структуры вакансий кислорода в легированном оксиде гафния

В. М. Ковзик

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

Легирование пленок HfO_2 металлами III группы, например Al и La, является экспериментально подтвержденным способом улучшения электрофизических характеристик этих пленок. Оно приводит к уменьшению токов утечки через пленки HfO_2, а также к уменьшению напряжения формовки элементов резистивной памяти (RRAM) на основе HfO_2. Ключевую роль в транспорте заряда и в формовке ячейки RRAM на основе HfO_2 играют вакансии кислорода (V_O). Механизмы влияния легирующей примеси на свойства V_O в настоящее время не установлены. Цель настоящей работы — изучение атомной и электронной структуры вакансий кислорода в HfO_2, легированном Al и La.

Исследование проводится в рамках теории функционала плотности в программном пакете Quantum ESPRESSO в 3D периодической модели с гибридным функционалом B3LYP. Используется 96-атомная суперячейка моноклинной фазы HfO_2, для которой прямым перебором находится оптимальное положение пары атомов Al (La) в позиции замещения Hf, и одной V_O, обеспечивающей зарядовую компенсацию. Изучается электронная структура данной V_O, а также дополнительной вакансии кислорода (V'_O).

Установлено, что в оптимальной структуре HfO_2:Al пара атомов Al встраивается вблизи V_O, а в HfO_2:La только один La располагается вблизи V_O. В этих структурах V_O обладает теми же характеристиками, что и V_O с зарядом +2 в нелегированном HfO_2: на ней может локализоваться дополнительный электрон (2 электрона) с энергией локализации около 3 эВ; большая глубина ловушки практически выключает V_O из процесса транспорта заряда. Оптимальное положение V'_O в структурах HfO_2:Al и HfO_2:La — вблизи одного из атомов примеси. Энергия формирования V'_O меньше, чем в нелегированном HfO_2. V'_O в HfO_2:Al и HfO_2:La имеет примерно те же характеристики, что и нейтральная вакансия в HfO_2: V'_O формирует заполненный уровень посередине запрещенной зоны и может локализовать одну (две) дырки с большой энергией ионизации. Отличие от HfO_2 состоит в локализации электронов: электронам выгоднее локализоваться не на V'_O, а на V_O с большой энергией ионизации. Участие V'_O в транспорте заряда, как и V_O, затруднено.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ (№ 22-22-00634).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Т. В. Перевалов

УДК 539.23

Формирование InAs при отжиге подложки InP(001) в потоке мышьяка

Д. А. Колосовский[1], С. А. Пономарев[1,2], Д. В. Дмитриев[1]

[1]Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск
[2]Новосибирский государственный университет

Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) на основе InP(001) используют в изготовлении приборов высокоскоростной электроники, оптоэлектроники и радиофотоники. Рост ГЭС начинается на атомарно-чистой поверхности подложки, достижение которой осуществляется высокотемпературным отжигом в потоке мышьяка. Однако в процессе отжига происходит обменная реакция фосфора с мышьяком, что приводит к изменению элементного состава поверхности подложки с образованием твердого раствора InPAs и островков InAs. Решеточное рассогласование между InP и InAs приводит к возникновению напряжений и центров зарождения дефектов в ГЭС, что влечет изменения в начальных этапах зародышеобразования и последующих процессах эпитаксиального роста. Поэтому целью работы является исследование процесса формирования InAs островков на поверхности InP(001) в процессе высокотемпературного отжига в потоке мышьяка.

В работе использовались *epi-ready* подложки InP(001) фирмы AXT. Отжиг проводился в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии Riber Compact 21T. Температура отжига варьировалась от 480–540 °C, а поток мышьяка изменялся от 8×10^{-6} Торр до $2{,}5 \times 10^{-5}$ Торр. Отжиг завершался формированием структуры (4 × 2) на дифракционной картине. Морфологию поверхности образцов исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе Bruker Multimode 8.

В работе наблюдается экспоненциальный рост плотности InAs островков от $4{,}4 \times 10^{7}$ см$^{-2}$ до $1{,}8 \times 10^{8}$ см$^{-2}$ при повышении температуры отжига и потока мышьяка. Островки вытянуты в направлении [1 $\bar{1}$ 0] и имеют латеральный размер от 65 до 130 нм в этом направлении. Суммарная площадь поверхности, занимаемая InAs островками, не превышает 1,5 % от площади подложки. Причиной появления этих островков является десорбция фосфора и сегрегация индия. Температура отжига подложки выше температуры диссоциации поверхности InP, из-за чего на поверхности образуется избыточная концентрация адатомов индия, которые мигрируют по поверхности. В изломе моноатомной ступени наименьшая энергия связи, поэтому в него встраиваются адатомы индия и мышьяка, в потоке которого происходит процесс отжига. В результате образуется InAs зародыш, который разрастается.

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

УДК 539.233

Исследование структуры и дефектов графена при переносе на поверхности различного рельефа

С. В. Комлина

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

Графен — это моноатомный слой sp^2-гибридизованных атомов углерода. Интерес к исследованию графена обусловлен его исключительными электронными, химическими, тепловыми, механическими и оптическими свойствами, благодаря которым этот материал является очень перспективным для использования во многих отраслях. Для полного раскрытия потенциала применимости графена необходимо более детальное изучение всех его свойств и структуры при различных условиях получения.

Цель данной работы — изучение структуры графена и ее изменений при синтезе и переносе на подложки из различных материалов и разной шероховатости. Синтез графена производился методом химического парофазного осаждения метана на медной основе, после чего подложки растворяли в растворе персульфата аммония и переносили свободно плавающие на поверхности воды графеновые пленки на интересующие образцы. В качестве подложек, на которые осуществлялся перенос, использовались пластины кремния с естественным и искусственно созданным оксидным слоем, а также текстурированные поверхности на основе кремния и меди, обладающие супергидрофильными и супергидрофобными свойствами, полученные с помощью обработки образцов наносекундными лазерными импульсами.

Одним из основных методов исследования структуры графена, который позволяет получать данные о количестве слоев и дефектности углеродного слоя, является спектроскопия комбинационного рассеяния света (КР), главные преимущества которой — бесконтактность (на образец воздействует только свет) и большой объем получаемой информации. В спектре графена наблюдаются следующие характерные линии: D (1350 $см^{-1}$), G (1587 $см^{-1}$), $2D$ (1680 $см^{-1}$), по интенсивности, форме и положению которых оценивается его качество. В работе проведен анализ КР-спектров графена, перенесенного на различные подложки, показано, что с увеличением шероховатости подложки существенно растет D-линия, связанная с дефектами в графитовом слое, что свидетельствует о разрывах в графеновом слое при переносе на не атомарно-гладкие поверхности.

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

УДК 535.016

Исследование шероховатости пленок теллурида кадмия методами эллипсометрии и профилометрии

Л. С. Кузнецова

Новосибирский государственный технический университет

Основным фоточувствительным материалом современной ИК-фотоэлектронной техники является кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Главная проблема при выращивании пленок КРТ на подложке кремния — большое рассогласование постоянной кристаллической решетки между пленкой КРТ и подложкой, что приводит к образованию большого количества дефектов роста. Для решения этой проблемы выращивают последовательно буферные слои ZnTe и CdTe. Качество слоев КРТ зависит от кристаллического совершенства слоя теллурида кадмия, которое вызывает образование рельефа поверхности. Поэтому актуальна задача изучения поверхности кадмия-теллура и поиска методов его характеризации.

Цель работы состоит в исследовании шероховатости поверхности выращенных слоев теллурида кадмия различными методами. В работе были использованы *in situ* и *ex situ* эллипсометрия и профилометрия. Метод эллипсометрии основан на анализе изменений поляризации отраженной волны, которые характеризуются эллипсометрическими параметрами ψ и Δ. При этом параметр Δ высоко чувствителен к состоянию поверхности. Альтернативным способом исследования шероховатости является оптическая профилометрия, с помощью которой производится картирование высоты рельефа по площади образца. Данные профилометрии в дальнейшем подвергаются статистической обработке.

Для описания эллипсометрических данных шероховатость задавалась поверхностным слоем, оптические постоянные которого рассчитывались по модели Бруггемана. Расчеты показывают, что с увеличением размеров шероховатости параметр Δ уменьшается. Проведены измерения серии образцов с различной величиной шероховатости. По данным эллипсометрии наблюдаются большие изменения шероховатости по площади пластин.

Сопоставление данных эллипсометрии и профилометрии показывает, что рассчитанные значения высот отличаются в несколько раз. Однако наблюдается статистическая корреляция между среднеквадратическими высотами рельефа, полученными этими методами. Отличие численных значений высот связано с тем, что методы чувствительны к разным масштабам шероховатости.

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

УДК 539.27

Начальная стадия формирования квантовых точек Ge на подложке Si(100) при молекулярно-лучевой эпитаксии

О.И. Кукенов, А.С. Соколов

Томский государственный университет

В современном мире к качеству и параметрам полупроводниковых наноструктур ставятся все более жесткие требования. Несмотря на высокую стоимость реализации метода молекулярно-лучевой эпитаксии, по нему можно создавать чистые и тонкие полупроводниковые наноструктуры с минимальным количеством дефектов. Установление зависимостей морфологии поверхности от параметров роста позволит синтезировать наноструктуры высокого качества. Немаловажную роль играет контроль поверхности. Метод дифракции быстрых электронов является лучшим неразрушающим методом контроля поверхности в процессе роста.

При отражении потока высокоэнергетичных электронов от поверхности образца на флуоресцентном экране формируются дифракционные картины, по которым определяют морфологию выращиваемой наноструктуры [1, 2].

Встраивание германия в кремниевую матрицу приводит к реконструкции поверхности. Так, начальным этапом формирования квантовых точек является возникновение сверхструктуры 2xN на поверхности. Объединение димеров в цепочку приводит к возникновению рефлекса 1/N на дифракционной картине. Длина исследуемой сверхструктуры соответствует отношению расстояния между рефлексами 00 и 01 к расстоянию между рефлексами 01 и 1/N [3].

В работе установлена зависимость величины сверхструктуры при молекулярно-лучевой эпитаксии Ge на подложку Si в широком температурном диапазоне методом дифракции быстрых электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 21-72-10031).

1. David T., Aqua J.N., Liu K. et al. New strategies for producing defect free SiGe strained nanolayers // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P. 10.
2. Dirko V.V., Lozovoy K.A., Kokhanenko A.P., Voitsekhovskii A.V. Thickness-dependent elastic strain in Stranski – Krastanow growth // Russ. Phys. J. 2020. Vol. 22. P. 19318–19325.
3. Voigtlaender B. Fundamental processes in Si/Si and Ge/Si epitaxy studies by scanning tunnelling microscopy during growth // Surf. Sci. Rep. 2001. Vol. 43. P. 127–254.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А.П. Коханенко

УДК 547.1

Электронное спиновое эхо фотовозбужденных композитов органических полупроводников

А. В. Куликова

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Композит проводящего полимера PM6 и акцепторного вещества Y6 применяется в качестве активного слоя в органических фотоэлементах [1]. Чтобы изучать электронно-дырочные пары в состоянии с переносом заряда в данном композите, используется метод импульсного ЭПР при температуре 80 К. При наблюдении сигнала электронного спинового эха (ЭСЭ) вне фазы из полученных данных можно рассчитать распределение расстояния G(R) между электроном и дыркой в состоянии с переносом заряда [2]:

$$M_x = \exp\left(-\frac{2\tau}{T_2}\right)\int G(R)\int \sin\left[\omega_d(R,\theta)\tau\right]\sin(\theta)\,d\theta\,dR\,,$$

где M_x — интенсивность ЭСЭ вне фазы; τ — время между двумя СВЧ-импульсами, формирующими ЭСЭ; T_2 — время релаксации электронного спина; R — расстояние между электроном и дыркой; θ — полярный угол вектора внешнего магнитного поля в системе главных осей тензора дипольного взаимодействия спинов электрона и дырки. Дипольная частота ω_d рассчитывается следующим образом:

$$\omega_d = 2\pi\frac{\gamma^2}{\hbar R^3}\,,$$

где γ — гиромагнитное отношение свободного электрона, $\hbar$ — постоянная Планка. Из спада сигнала ЭСЭ с увеличением задержки после вспышки лазера определено время жизни состояния с переносом заряда в изучаемом композите — 5 мкс. Путем модулирования зависимости данного сигнала от τ определено среднее значение расстояния между электроном и дыркой в состоянии переноса заряда — 5 нм.

1. Yin Y., Zhan L., Liu M. et al. Boosting photovoltaic performance of ternary organic solar cells by integrating a multi-functional guest acceptor // Nano Energy. 2021. Vol. 90. P. 106538.
2. Popov A. A., Uvarov M. N., Kulik L. V. Mode of action of the third component in ternary organic photovoltaic blend PBDB-T/ITIC: PC70BM revealed by EPR spectroscopy // Synth. Metals. 2021. Vol. 277. P. 116783.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Л. В. Кулик

УДК 538.9

Эпитаксиальный рост топологического изолятора $Bi_ySb_{2-y}Te_{3-x}Se_x$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии

Е. Д. Кырова

Новосибирский государственный технический университет

В настоящее время проявляется большой интерес к топологическим изоляторам (ТИ), которые находят применение в спинтронике, квантовых компьютерах, фотоприемниках ИК- и ТГц-спектров.

ТИ — это материалы, имеющие линейный закон дисперсии на поверхности, при этом в объеме материал является изолятором. К таким материалам относятся соединения Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3. Однако исследования поверхностных состояний бинарных соединений ТИ затруднено из-за высокой объемной проводимости. Для решения этой проблемы либо уменьшают толщину материала, либо изменяют состав. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет контролировать стехиометрию и толщину пленки в процессе роста для получения высокого качества структур. Ранее в [1] было показано, что при росте из элементных источников отношение потоков V и VI групп варьируется в диапазоне от 5 до 40. Однако если рост происходит с использованием бинарного источника, то достаточно, чтобы поток из дополнительного источника VI группы был близок к потоку основного источника [2]. Следует отметить, что к настоящему времени не много работ посвящены росту $Bi_ySb_{2-y}Te_{3-x}Se_x$ (BSTS) методом МЛЭ, что, возможно, связано со сложностью процесса роста четырехкомпонентного соединения.

Структуры на основе BSTS представляют собой чередующийся набор из пяти монослоев, для которых при выращивании на кремнии необходима пассивация поверхности для избегания образования ковалентных связей. Рост пленки проводился на подложках Si(111)7×7. Для улучшения морфологии поверхности в начале роста открывался источник теллура на несколько секунд. Далее производился рост буферного слоя Bi_2Te_3 толщиной не более 4 нм. Качество слоев контролировалось дифракцией быстрых электронов. На сформированном буферном слое производился рост BSTS.

Полученные пленки исследовались на состав, электрофизические и оптические свойства в зависимости от параметров роста: температуры источника и подложки, скорости роста.

1. Mussler G. Molecular-Beam Epitaxy of 3D Topological Insulator Thin Films and Devices on Si Substrates // PSS (B) Basic Res. 2021. Vol. 258 (1).
2. Springholz G. Et al. Structural disorder of natural BimSen superlattices grown by molecular beam epitaxy // Phys. Rev. Mater. 2018. Vol. 2 (5).

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

УДК 548

Разработка рентгендифракционного эталона для малых углов

Д. В. Лаврехин

Новосибирский государственный университет

Проведение рентгендифракционных экспериментов, нацеленных на получение высокоточных данных для поликристаллических фаз, неразрывно связано с использованием эталонных образцов с хорошо известными параметрами. Стандартные эталонные материалы (*standard reference material*, SRM), такие как поликристаллический Si (SRM-640), LaB_6 (SRM-660) и Al_2O_3 (SRM-1976), позволяют проводить уточнения в области углов > 25° 2θ (для Cu*K*α-излучения). Наиболее распространенный эталон для области малых углов (< 25° 2θ) — синтетическая слюда фторфлогопит (SRM 675, первый рефлекс на 8,853°). Проблема поиска универсального малоуглового эталона при этом остается открытой, поскольку SRM 675 является малодоступным для приобретения. Другие известные малоугловые эталоны также обладают определенными недостатками, такими как ядовитость (меркаптиды свинца), нестабильность вещества и большая ширина пиков (бегенат серебра).

В данной работе мы провели исследование двух соединений, потенциально подходящих на роль малоуглового эталона: селенид галлия (GaSe) и комплексное соединение меди(II) с 4-фенацетилиден-2,2,5,5-тетраметил-3-ими-дазолин-1-оксилом (CuL_2) [1]. В обоих случаях кристаллы имеют ярко выраженную форму — пластинки и иголки соответственно. Это позволяет готовить ориентированные образцы. На дифрактограмме GaSe (параметры элементарной ячейки: a = 3,7430 Å, c = 15,9190 Å, пр.гр. P-6m2) есть два дифракционных пика в малоугловой области, (0 0 2) с угловым положением ~ 11,1° 2θ и (0 0 4) с ~22,3° 2θ и серия достаточно интенсивных рефлексов 001 в области > 80° 2θ, что позволяет достаточно точно определить параметр c с помощью эталона. Кристаллы GaSe являются высокочистыми и легко доступными. В ходе исследования выявился существенный недостаток GaSe — перетирание монокристаллов приводит к уширению наблюдаемых рефлексов.

Этого недостатка лишено соединение CuL_2. Оно растворимо в спирте, при высыхании которого образуются мелкие кристаллы, ориентированные по поверхности кюветы. В работе [1] было проведено уточнение параметра тетрагональной ячейки a = 44,299(3) Å. Показано, что при хранении на воздухе в течение 10 лет ПЭЯ CuL_2 в пределах погрешности не изменились, т. е. эталон стабильный.

1. Ванина П. Ю., Громилов С. А. Повышение точности определения параметров элементарной ячейки по дифракционным отражениям в малоугловой области // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. 2012. Т. 7, № 2. С. 98–102.

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

УДК 539.23

Рост квантовых точек GaN при изменении стехиометрических условий на поверхности слоя GaN

Я. Е. Майдэбура

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

Электронные и оптические свойства полупроводниковых квантовых точек (КТ) вызывают большой интерес исследователей за счет яркого проявления квантово-размерных эффектов, что важно при создании одноэлектронных транзисторов, однофотонных излучателей и светоизлучающих диодов. Типичным способом формирования КТ при росте в молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является рост по механизму Странского — Крастанова (С-К). В системе GaN/AlN наблюдается модифицированный механизм С-К, в котором для формирования 3D-островков из 2D-слоя GaN (2D-3D-переход) необходимым условием является остановка роста и модификация поверхности слоя GaN, и в случае МЛЭ с аммиаком в качестве источника азота модификация заключается в отключении потока аммиака. Однако механизмы 2D-3D-перехода до сих пор остаются не ясными.

Образцы выращивались на установке МЛЭ с аммиаком в качестве источника азота CBE-32 Riber. Изменение состояния морфологии поверхности слоя GaN во время эксперимента было исследовано *in situ* методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). В результате были получены кинетики интенсивности 3D-рефлекса при отключении аммиака для различных температур, а также кинетика 3D-рефлекса при последовательном изменении температуры подложки в низком потоке аммиака.

Для объяснения механизмов, которые приводят к формированию КТ (2D-3D-переходу), а также особенностей 2D-3D-перехода была разработана кинетическая модель в форме системы дифференциальных уравнений. Модель решается численно в MATLAB методом конечных разностей. Рассчитанное с помощью модели изменение элементного состава на поверхности GaN с учетом положения адсорбированных частиц было связано с изменением поверхностной энергии слоя GaN после отключения аммиака. В результате сравнения экспериментальных кривых интенсивности 3D-рефлекса и рассчитанных кривых поверхностной энергии удалось объяснить механизмы 2D-3D-перехода и его особенности, такие как: немонотонное поведение интенсивности 3D-рефлекса GaN, когда первоначальное увеличение сменяется уменьшением; уменьшение максимального значения интенсивности 3D GaN рефлекса при выключении потока аммиака с ростом температуры; уменьшение времени задержки 2D-3D-перехода с ростом температуры.

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

УДК 535.015

Отражение от экситонов в широкой квантовой яме гетероструктур InGaAs/GaAs

М. А. Максимов, Р. С. Назаров

Санкт-Петербургский государственный университет

В настоящее время работы по исследованию отражения в широких квантовых ямах представляют значительный научный интерес для обнаружения квантовых биений — явления, важного для понимания квантовой запутанности и лазерной генерации без инверсии заселенностей, а также для создания ультрабыстрых оптических приборов [1].

В данной работе исследуется отражение в геометрии угла Брюстера от экситонов в широкой 95 нм квантовой яме $In_{0,02}GaAs_{0,98}$/GaAs при оптической накачке непрерывным лазерным излучением в диапазоне длин волн от 820 до 830 нм. Возможность перестраивать лазер в широком диапазоне длин волн позволяет изучать характерные особенности спектра, связанные с квантованием энергии поступательного движения экситонов в яме и возникающими при этом энергетическими переходами.

Полученные экспериментальные данные позволяют говорить об отражении от экситонов в широкой квантовой яме. Наблюдаемые на спектре резонансы от близко расположенных энергетических уровней свидетельствуют о возможности изучения в данной гетероструктуре квантовых биений посредством, например, фотонного эха [2].

Работа выполнена на оборудовании Ресурсного центра СПбГУ «Нанофотоника» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Мегагрант № 075-15-2022-1112).

1. Raiber S., Faria Junior P. E., Falter D. et al. Ultrafast pseudospin quantum beats in multilayer WSe2 and MoSe2 // Nat. Commun. 2022. Vol. 13. 4997. URL: https://doi.org/10.1038/s41467-022-32534-3.

2. Smirl A. L., Stevens M. J. et al. Heavy-hole and light-hole oscillations in the coherent emission from quantum wells: evidence for exciton-exciton correlations // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. 8267. URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.60.8267

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

УДК 538.9

Спиновая структура и магнитные свойства двумерного вигнеровского кластера в модели Изинга и Гейзенберга

М. М. Махмудиан

Новосибирский государственный университет

Известно, что заряженные частицы, помещенные в потенциальную яму, за счет отталкивания образуют квазипериодическую структуру — вигнеровский кристалл (ВК) [1]. Трехмерный ВК является теоретической моделью твердого тела. Двумерный ВК, в котором можно пространственно разнести положительные и отрицательные заряды, был реализован, в частности, для электронов на поверхности жидкого He [2].

Цель данной работы — изучение спиновой структуры и магнитных свойств неподвижных двумерных конечных вигнеровских кластеров в моделях Изинга (МИ) и Гейзенберга (МГ).

Электроны помещены при нулевой температуре во внешний потенциал $V = k(x^2 + \beta^2 y^2)/2$, который ограничивает их движение в плоскости (x, y). Электронные координаты получаются из задачи о минимизации гамильтониана $H_0 = \sum_i k\left(x_i^2 + b^2 y_i^2\right) + \sum_{i>j} e^2 / \left|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j\right|$ [3, 4]. Во внешнем магнитном поле $\boldsymbol{B}$ спиновая энергия системы определяется формулой $E = \sum J_{ij}\boldsymbol{\sigma}_i\boldsymbol{\sigma}_j - 2\mu_B \boldsymbol{B}\sum\boldsymbol{\sigma}_i$, где в МИ спиновые числа $\sigma_i = \pm 1$, а в МГ спины — операторы. Используется антиферромагнитное обменное взаимодействие между спинами $J_{ij} = J_0 \exp\left(-\alpha\left|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j\right|\right)$ в основном состоянии. Статистическая сумма системы $Z = \sum_{\{\sigma_i = \pm 1\}} \exp\left(-E / k_B T\right)$ определяет наведенный магнитный момент $M = k_B T \partial \ln\left(Z\right) / \partial B$ и спиновую магнитную восприимчивость $\chi = \partial M / \partial B$.

С помощью компьютерного моделирования найдены спиновая структура, корреляционная функция и магнитная восприимчивость кластера. Показано, что спиновая восприимчивость испытывает осцилляции относительно магнитного поля за счет магнитоиндуцированных перестроек спиновой подсистемы [5].

1. Wigner E. P. On the Interaction of Electrons in Metals // Phys. Rev. 1934. Vol. 46. 1002.
2. Grimes C. C., Adams G. Evidence for a Liquid-to-Crystal Phase Transition in a Classical, Two-Dimensional Sheet of Electrons // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 42. 795.
3. Mahmoodian M., Entin M. V. Theory of electron states in two-dimensional Wigner clusters // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. Vol. 2227. 012012.
4. Махмудиан М. М., Махмудиан Мех. М., Энтин М. В. Теория вращающегося двумерного вигнеровского кластера // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115, № 10. С. 642–649.
5. Mahmoodian M. M., Mahmoodian M. M., Entin M. V. Spin structure and spin magnetic susceptibility of two-dimensional Wigner clusters // arXiv:2206.15026v2. 2022.

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

УДК 538.9

Особенности электронной структуры поверхности (111) PbSnTe вблизи точки инверсии зон

А. С. Микаева

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

Соединение свинец-олово-теллур $Pb_{1-x}Sn_xTe$ — узкозонный полупроводник, ширина запрещенной зоны которого зависит от содержания олова x. Сильное спин-орбитальное взаимодействие в данном материале приводит к инверсии порядка зон при определенной концентрации олова x, зависящей от температуры. В результате инверсии зон появляется состояние топологического кристаллического изолятора с возникновением поверхностных состояний, невырожденных по спину. Носители заряда на данных поверхностных состояниях имеют линейный закон дисперсии в виде конуса Дирака и поляризованы по спину. Исследование электронной структуры $Pb_{1-x}Sn_xTe$ представляет интерес, так как точка инверсии зон зависит от большого количества факторов, таких как, например, наличие механических напряжений в эпитаксиальных пленках или реконструкции поверхности, что требует изучения электронной структуры поверхности $Pb_{1-x}Sn_xTe$ для каждого отдельного случая. Целью данной работы является изучение электронной структуры поверхности эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe/BaF_2$ с составами вблизи точки инверсии зон в зависимости от температуры.

Для исследования электронной структуры поверхности пленки $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (111) были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках BaF_2. С помощью химической обработки, описанной в работе [1], была получена атомарно-чистая и структурно упорядоченная поверхность (111) $Pb_{1-x}Sn_xTe/BaF_2$. Во всем исследованном диапазоне составов (x ~ 0,27–0,5) и температур (80–300 K) на картинах дисперсии валентных зон в Г- и М-точках зоны Бриллюэна наблюдались спин-поляризованные поверхностные состояния с линейным законом дисперсии с геликоидальной спиновой структурой, характерной для топологического кристаллического изолятора. Существование поверхностных состояний за теоретически предсказанными пределами существования фазы топологического кристаллического изолятора может отражать неоднородность состава на поверхности пленок либо наличие механических напряжений в них.

1. Tarasov A. S., Ishchenko D. V., Akhundov I. O. et al. Surface chemical treatment effect on (111) PbSnTe < In > Topological crystalline insulator films // Appl. Surf. Sci. 2021. Vol. 569.

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

УДК 538.911

Синтез двумерных слоев кремния, интеркалированных кальцием, на подложках CaF_2/Si(111)

В. И. Муратов

Новосибирский государственный университет

На текущий момент является актуальным поиск способов создания двумерных графеноподобных материалов, совместимых с кремниевой технологией. В качестве наиболее перспективных рассматриваются двумерные материалы на основе кремния и германия. Для дальнейшего применения в приборах желательно выращивать слои таких материалов на диэлектрических подложках.

В данной работе найдены ростовые условия, при которых происходит формирование участков двумерных слоев Si на тонких пленках CaF_2. Синтез многослойных структур проводился методом молекулярной лучевой эпитаксии на подложках Si(111). Исследования методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) подтвердили формирование участков двумерных слоев Si. Исследованы зависимости спектров КРС и ЭПР от количества осажденного кремния и условий формирования пленки CaF_2, на которую осаждался кремний. Изучено формирование слоев кремния на пленках CaF_2 различной толщины, в зависимости от температуры роста пленки CaF_2 и ее отжига до и после роста слоев кремния. Получено, что в зависимости от количества осажденного кремния спектры КРС существенно меняются. Для структур, выращенных при осаждении 1 и 2 бислоев кремния, наблюдается всего один пик при 418 $см^{-1}$ (из трех, характерных для $CaSi_2$), который обусловлен колебаниями Si атомов в плоскости двумерного слоя Si, интеркалированного кальцием. Для структур, выращенных при осаждении 3 бислоев кремния, у сигнала при 418 $см^{-1}$ появляется плечо, которое свидетельствует о переходе к трехмерному $CaSi_2$. При осаждении 8 бислоев кремния наблюдается полный спектр из трех пиков (348; 384; 418 $см^{-1}$), характерных для трехмерного $CaSi_2$.

Для образцов, выращенных при осаждении 2 бислоев кремния и более, при подсветке белым светом был получен ЭПР-сигнал с g = 1,9992. Сигнал имеет асимметричную форму линии, близкую к форме линии Дайсона. Этот сигнал можно отнести к фотоиндуцированным электронам проводимости в протяженных двумерных островках Si.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для разработки подходов к получению двумерных материалов на основе кремния.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Ф. Зиновьева

УДК 537.5

Анализ энергетических характеристик процесса безвакуумного электродугового синтеза борида молибдена

Ю. А. Некля

Томский политехнический университет

Бориды молибдена являются перспективными материалами для новых жаропрочных и износостойких покрытий [1]. Для их получения необходимы высокие температуры порядка 1400–1800 °C [2]. Безвакуумный электродуговой метод, реализуемый в атмосферной плазме дугового разряда постоянного тока, считается перспективным методом синтеза боридов молибдена [3]. Преимущества такого подхода: упрощение конструкции, уменьшение габаритов установки, повышение энергоэффективности процесса синтеза [4].

В работе проведены экспериментальные исследования по получению борида молибдена в атмосферной электродуговой плазме. На основе зарегистрированных осциллограмм тока и напряжения были рассчитаны основные энергетические характеристики процесса синтеза. Определено, что в момент инициирования дугового разряда напряжение дуги падает с 60 до ~ 30 В, сила тока разрядного контура возрастает до ~ 200 А. Затем после стабилизации разрядного промежутка их значения составляют ~ 35 В и ~ 150 А соответственно. Рассчитано, что количество подведенной к системе энергии равнялось ~ 140 кДж за ~ 45 с. Средняя мощность дуги составила ~ 3,1 кВт.

Таким образом, в работе был выполнен анализ энергетических характеристик процесса безвакуумного электродугового синтеза борида молибдена.

1. Shein I. R., Shein K. I., Ivanovskii A. L. First-principles study on the structural, cohesive and electronic properties of rhombohedral Mo_2B_5 as compared with hexagonal MoB_2 // Phys. B: Condens. Matter. Elsevier, 2007. Vol. 387, № 1–2. P. 184–189.
2. Klesnar H., Aselage T. L., Morosin B. et al. The diboride compounds of molybdenum: MoB2-x and Mo2Bs-y // J. Alloys Compd. Elsevier, 1996. Vol. 241, № 1–2. P. 180–186.
3. Pak A. Ya., Rybkovskiy D. V., Vassilyeva Yu. Z. et al. Efficient Synthesis of WB5-x–WB Powders with Selectivity for WB5-x // Inorg. Chem. 2022. Vol. 61, № 18. P. 6773–6784.
4. Vassilyeva Yu. Z., Pak A. Ya., Kononenko P. N. et al. Vacuumless Arc Discharge Synthesis of Molybdenum Carbide-Based Powders at Various Discharge Currents // Inorg. Mater. Springer, 2022. Vol. 58. P. 265–270.

Научный руководитель — канд. техн. наук Ю. З. Васильева

УДК 538.9

Гетероструктуры с квантовыми ямами на подложках GaAs ориентации (110)

Я. А. Никулина

Новосибирский государственный университет

Значительное различие энергетического строения низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур и объемных полупроводников дает возможность для применения низкоразмерных гетероструктур — квантовых ям (КЯ) и квантовых точек (КТ) для создания объектов с свойствами, не характерными для объемных материалов. Формирование КЯ и КТ на подложках ориентаций (111) и (110), вместо повсеместно используемых подложек ориентации (001), дает дополнительные возможности по управлению энергетическим спектром КЯ и КТ и симметрией их электронных состояний [1]. Это вызвано изменением распределения напряжений внутри КЯ и КТ, а следовательно, и изменением энергетического спектра при изменении ориентации подложки. Однако условия эпитаксиального роста на поверхностях с этими ориентациями кардинально отличаются от таковых для поверхности с ориентацией (001).

В данной работе приведены результаты оптимизации условий эпитаксиального роста гетероструктур на основе GaAs на подложках ориентации (110), при которых получаются КЯ с низкой концентрацией дефектов — центров безызлучательной рекомбинации. Выращивались гетероструктуры с КЯ GaAs толщиной 6 нм в матрице $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$. Анализ качества структур проводился методом низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) (при температуре жидкого азота).

Интенсивность ФЛ, полученной при измерении КЯ, сформированных на подложке с ориентацией (110) при тех же ростовых условиях, получилась в 7 раз меньше интенсивности ФЛ для КЯ, сформированных на подложке ориентации (001). Однако при сохранении скорости роста 1 МС/с и повышении давления мышьяка интенсивность ФЛ КЯ, формирующихся на подложках ориентации (110), увеличивалась и выходила на насыщение при давлениях, превышающих 2×10^{-5} Па.

Таким образом, КЯ, сформированные на подложках с ориентацией (110), обладают меньшей концентрацией дефектов — центров безызлучательной рекомбинации, чем КЯ, сформированные на подложках ориентации (001).

1. Абрамкин Д. С., Шамирзаев Т. С. Полупроводниковые гетероструктуры первого рода с непрямой запрещенной зоной на подложках с ориентацией (110) // ФТП. 2019. Т. 53. С. 710.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Т. С. Шамирзаев

УДК 53.097

Исследования явления резистивного переключения и памяти в светодиодах на основе InGaN/GaN после импульсного воздействия

В. А. Рибенек

Ульяновский государственный университет

Рядом исследователей уже были предложены конфигурации устройств, объединяющие в себе RRAM (*Resistive random-access memory* — резистивная память с произвольным доступом) на базе «металл — изолятор — металл» и светоизлучающий диод (СД) [1], а также светоизлучающие запоминающие устройства на базе диода с множественными квантовыми ямами (КЯ) [2, 3]. В данной работе нами рассмотрена возможность создания полностью полупроводниковой биполярной резистивной памяти на основе СД InGaN/GaN с одной КЯ методом импульсного воздействия.

В данной работе нами исследовались СД синего свечения (λ_{max} = 468 нм при комнатной температуре) на основе твердого раствора InGaN. СД подвергались импульсному воздействию с помощью источника сигналов специальной формы АКИП-3418/2. За счет короткого и мощного импульса происходит локальное изменение структуры гетероперехода, благодаря чему становятся возможны явления памяти и резистивного переключения. В качестве возможного механизма, ответственного за данные явления, было рассмотрено формирование проводящих нитей в области пространственного заряда, образование которых связано с перемещением подвижных дефектов. В частности, обнаруженная по зависимости $d\beta/dU = f(U)$ вакансия азота при сообщении энергии может перейти в состояние 3+, которое является подвижным дефектом. Явления резистивного переключения и памяти подтверждаются наличием явления гистерезиса на вольт-амперных и вольт-фарадных характеристиках исследуемого прибора.

1. Chang C. W., Tan W. C., Lu1 M. L. et al. Electrically and Optically Readable Light Emitting Memories // Sci. Rep. 2014. Vol. 4 (1). P. 1–6.
2. Zheng K., Zhao J. L. An Optically Readable InGaN/GaN RRAM // IEEE Trans. Electron Devices. 2016. Vol. 63 (6). P. 2328–2333.
3. Fu K., Huang X., Yang T. H., Chen H. Threshold switching and memory behaviors of epitaxially regrown GaN-on-GaN vertical p-n diodes with high temperature stability // IEEE Electron Device Lett. 2019. Vol. 40 (3). P. 375–378.

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

УДК 536.421 + 536.911

О кристаллизации в четырехкомпонентной наносистеме Au-Cu-Pd-Pt

К. Г. Савина, С. А. Вересов, А. Д. Веселов, С. В. Серов

Тверской государственный университет

К настоящему времени моделированию многокомпонентных наночастиц (НЧ) уделяется не так много внимания. Нами метод Монте-Карло (МК) в реализации схемы Метрополиса [1] был применен для изучения закономерностей структурообразования в четырехкомпонентной НЧ стехиометрического состава $Au_3CuPd_{12}Pt_4$.

Моделирование процесса кристаллизации производилось в температурном диапазоне от 1300 до 300 K, количество МК шагов — 10^8, шаг по температуре — 0,5 K. Обнаружен один из стехиометрических составов исследуемых НЧ, для которого зафиксирован процесс зарождения кристаллической фазы в НЧ $Au_{134}Cu_{44}Pd_{532}Pt_{177}$. Процесс кристаллизации начинается в ядре НЧ с атомов Pt и Cu. Это связано с тем, что Pt обладает самой низкой потенциальной энергией среди всех металлов в составе НЧ и самой высокой температурой плавления. Однако участие Cu в начале образования кристаллической фазы может объясняться тем, что за счет связи с Pt атомы Cu понижают свою потенциальную энергию (поскольку она самая высокая в этой четырехкомпонентной НЧ), тем самым стабилизируя НЧ в целом [2].

Финальная структура НЧ представляет собой ГЦК фазу с включениями ГПУ фазы у поверхности. Системный подход к исследованию четырехкомпонентных наночастиц предполагает проведение большого количества времязатратных компьютерных экспериментов с учетом использования различных размеров, составов исследуемых наносплавов, а также температурных интервалов. Очевидно, что данную работу надо рассматривать как поисковое исследование, поскольку многообразие возможных начальных конфигураций, в том числе сложных структур ядро-оболочка, а также размерные эффекты могут оказывать влияние на процессы структурообразования, в частности на проявления сегрегации определенного сорта атомов.

1. Metropolis N., Ula S. The Monte Carlo Method // J. Am. Stat. Assoc. 1949. Vol. 44, iss. 247. P. 335–341.

2. Вересов С. А., Савина К. Г. и др. К вопросу изучения процессов структурообразования в четырехкомпонентных наночастицах // Физ.-хим. аспекты изуч. кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. Вып. 14. С. 371–382.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Н. Ю. Сдобняков

УДК 538.9

Баллистический магнетотранспорт в многоканальных квантовых точечных контактах траншейного типа

Д. И. Сарыпов

Новосибирский государственный университет
Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

Несмотря на долгую историю изучения квантовых точечных контактов (КТК), ряд явлений, выходящих за рамки традиционного целочисленного квантования кондактанса, остается не до конца изученным. К ним относится и эффект многоканальности, заключающийся в образовании внутри КТК нескольких проводящих каналов, квантующиеся кондактансы которых дают независимый вклад в общий кондактанс. Этот эффект можно обнаружить, модифицируя ограничивающий потенциал КТК путем приложения асимметричного напряжения между боковыми затворами [1, 2]. Эффект многоканальности наблюдается в КТК траншейного типа (создаваемых вытравливанием литографических траншей, отделяющих проводящее микросужение от двух боковых затворов), позволяющих прикладывать большие разности затворных напряжений.

Многоканальность экспериментально изучалась методом магнитной фокусировки, позволяющим зарегистрировать присутствующие в КТК каналы за счет разделения их вкладов в измеряемый сигнал по шкале магнитных полей. Для этого использовались два отделенных друг от друга на расстояние 4 мкм параллельных КТК, один из которых является инжектором электронов, а другой — детектором. В данной работе было исследовано влияние разности затворных напряжений на спектр магнитной фокусировки.

На зависимости напряжения на детекторе от поперечного магнитного поля наблюдается пик, соответствующий попаданию инжектированных электронов в детектор. Приложение разности напряжений между затворами инжектора приводит к резкому смещению фокусировочного пика, что может быть объяснено переключением между пространственно разделенными проводящими каналами в КТК-инжекторе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-12-00343).

1. Sarypov D. I. et al. Multiwell Potential in a Trench-Type Quantum Point Contact // JETP Lett. 2022. Vol. 116, № 6. P. 360–366.
2. Pokhabov D. A. et al. Crossing and anticrossing of 1D subbands in a quantum point contact with in-plane side gates // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118, № 1. P. 012104.

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

УДК 539.27

Зависимость сверхструктурных переходов от температуры подложки при эпитаксиальном росте Ge на Si(111)

А. С. Соколов, О. И. Кукенов

Томский государственный университет

Формирование полупроводниковых наногетероструктур является важной частью развития современной электроники. Элементы, основанные на полупроводниковых наногетероструктурах, обладают лучшими характеристиками, чем их микроэлектронные предшественники. Кремний и германий составляют элементную базу многих современных электронных устройств, поэтому структурам на их основе уделяется большое внимание. С совершенствованием электронных устройств возрастает потребность в создании идеальных наногетероструктур, таких как квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет в условиях сверхвысокого вакуума получать тонкие бездефектные эпитаксиальные слои с резким изменением состава на границе.

Отслеживание роста происходит с применением метода дифракции быстрых отраженных электронов (ДБОЭ). С его помощью можно получить информацию об атомной структуре поверхности в процессе эпитаксиального роста [1]. На поверхность подложки под скользящим углом посылается поток электронов. Поскольку длина волны электронов соизмерима с параметрами кристаллической решетки, при отражении от эпитаксиальной структуры на люминесцентном экране образуются картины дифракции. По виду картины можно оценить структуру и качество наблюдаемого кристаллического слоя.

Качество и свойства полученных наногетероструктур зависят от условий их создания. Так, например, температура подложки влияет на кинетические процессы, происходящие при эпитаксии. В ходе работы была проведена серия экспериментов по эпитаксии Ge на Si(111) на установке МЛЭ «Катунь-100». Отслеживание процесса синтеза осуществлялось с помощью метода ДБОЭ.

В результате анализа дифракционных картин получена температурная зависимость времени сверхструктурного перехода 7 × 7 в 5 × 5 при синтезе Ge на Si (111) в диапазоне 400–650 °C.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 21-72-10031).

1. Lozovoy K. A., Korotaev A. G. Kokhanenko A. P. et al. Kinetics of epitaxial formation of nanostructures by Frank–van der Merwe Volmer–Weber and Stranski–Krastanow growth modes // Surf. Coat. Technol. 2020. Vol. 384. P. 125289 (1–5).

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

УДК 538.9

Электронная структура тонких пленок Bi на поверхности InAs(111)A(2 × 2)

Н. Ю. Соловова

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

Интересной особенностью n-InAs является образование на некоторых его поверхностях двумерного электронного газа с сильным эффектом Рашбы, приводящим к снятию вырождения по спину. Величиной расщепления Рашбы можно управлять путем изменения изгиба зон внешним электрическим полем, поэтому InAs может быть использован в качестве канала спиновых транзисторов. Усиление спин-орбитального взаимодействия за счет внесения тяжелых атомов висмута на поверхность может привести к увеличению параметра Рашбы и позволить снизить значения управляющего спиновым током электрического поля. Отдельный интерес представляет изучение графеноподобных пленок висмута, поскольку в них проявляются топологические свойства и наблюдается большая, по сравнению с двумерными структурами других элементов V и IV группы, величина ширины запрещенной зоны.

В данной работе были изучены условия осаждения тонких (2–6 Å) пленок висмута на поверхность InAs(111)A(2 × 2) и их влияние на кристаллическую и электронную структуру пленок. Висмут осаждался из ячейки Кнудсена в сверхвысоком вакууме на подложки InAs, предварительно подготовленные с помощью химического травления в HCl-изопропаноле. Полученная поверхность изучалась методами РФЭС, ДМЭ, ФЭСУР.

В ходе работы было выявлено, что на кристаллическую и электронную структуру пленок влияет температура подложки во время адсорбции висмута и способ подготовки чистой поверхности InAs. Оказалось, что ионная бомбардировка значительно увеличивает количество дефектов на поверхности, что приводит к изменению свойств пленок. Наиболее интересной структурой обладают пленки висмута, выращенные при высокой температуре подложки, подготовленной без ионного травления: формируются домены с прямоугольной элементарной ячейкой и реконструкцией ($2\sqrt{3} \times 3$). При анализе рентгеновских фотоэлектронных спектров химических сдвигов, соответствующих связям Bi-In, Bi-As, выявлено не было, что говорит о формировании квазисвободной двумерной решетки. Электронная структура, измеренная с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, обладает полупроводниковым характером с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 0{,}2$ эВ. При этом в дисперсии зон наблюдается сложная картина, включающая как состояния InAs, так и состояния образовавшейся пленки Bi.

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

УДК 538.9

Датчик на основе графена для измерения динамики движения воды

Д. В. Сорокин

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

Повышенный интерес к изучению графена вызван высокой его чувствительностью к внешним воздействиям, что может быть применено для исследования свойств газовых и жидких сред. В частности, благодаря двумерной структуре графен может быть использован для решения задачи измерения гидродинамических параметров потока жидкости с минимальным влиянием на измеряемый поток и малым временем отклика.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию изменения сопротивления свойств графена при различной скорости движения дистиллированной воды вдоль поверхности графена. Для установления характера зависимости изменения сопротивления графенового образца создан экспериментальный стенд с использованием канала с квадратным сечением со стороной 3 мм. Графеновый чип наносился на одну из стенок канала. Скорость потока варьировалась в диапазоне 0–1,5 м/с. Эксперименты проводились на образцах, технология создания которых подробно описана в работе [1]. В результате движения воды в канале зарегистрирован эффект резкого уменьшения сопротивления при запуске потока и дальнейший выход на первоначальное сопротивление при выключении потока. Определены характерные времена отклика сенсора на возмущения скорости жидкости. Построена зависимость между амплитудой отклика и скоростью дистиллированной воды. Теоретический анализ взаимодействия графеновой пластины с движущимся потоком молекул воды проведен методом молекулярной динамики. Результаты молекулярно-динамического моделирования показали, что наличие потока вдоль графеновой плоскости приводит к перераспределению молекул в приповерхностном слое, что влечет за собой изменение наведенного электрического поля в плоскости графена, меняя его проводимость и ширину запрещенной зоны.

1. Kostogrud I. A., Boyko E. V., Smovzh D. V. The main sources of graphene damage at transfer from copper to PET/EVA polymer // Mater. Chem. Phys. 2018. Vol. 219. P. 67–73.

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

УДК 539.2

Моделирование начальной стадии гетероэпитаксии германия на структурированных подложках кремния

У Цзяи

Новосибирский государственный университет

Пространственно-упорядоченные массивы квантовых точек (КТ) представляют интерес для создания микроэлектронных приборов и устройств нового поколения. Основным методом для получения таких массивов является гетероэпитаксиальный рост на подложках, поверхность которых содержит систему регулярно расположенных ямок [1, 2]. В данной работе методом молекулярной динамики (МД) изучается процесс поверхностных перестроек на стенках ямок в подложке Si. Показано, что микроскопический механизм гетероэпитаксии германия в ямках включает образование H-образных атомных конфигураций, которые воспроизводятся с осаждением каждого нового атомного слоя германия.

1. Bayer M., Hawrylak P., Hinzer K et al. Coupling and Entangling of Quantum States in Quantum Dot Molecules // Sci. 2001. Vol. 291. P. 451. URL: https://www.science.org/doi/10.1126/science.291.5503.451.
2. Rudin S.A., Zinovyev V.A., Smagina Zh. V. et al. Tuning the configuration of quantum dot molecules grown on stacked multilayers of heteroepitaxial islands // J. Appl. Phys. 2022. Vol. 131. P. 035302. URL: https://doi.org/10.1063/5.0075991.

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

УДК 537.3, 537.6

Магнитные свойства и электронный транспорт в слоистых кобальтатах $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$

Д. И. Фролов

Новосибирский государственный технический университет

В данной работе исследовался электронный транспорт в слоистом кобальтате $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ при различных содержаниях кислорода x. Оригинальные методики отжига и закалки образцов в вакуумной и кислородной среде позволяли добиться значения x с точностью до тысячной атомной массы. Электросопротивление измеряли 4-контактным методом. Измерены температурные зависимости электросопротивления набора образцов $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ с различным содержанием кислорода (x = 0 ÷ 0,93) в интервале температур 68–350 K. При значениях x от 0 до 0,51 величина удельного электросопротивления почти не изменялась, при дальнейшем росте кислорода проводимость соединения увеличивалась.

Наблюдался активационный рост удельного электросопротивления с понижением температуры для каждого образца. Данное поведение характерно системам с прыжковой проводимостью с переменной длиной прыжка, которая описывается формулой $\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{n+1}}$. Для определения механизма электронного транспорта проводились расчеты значений энергии активации от температуры $\Delta E = \frac{d \ln \ln \rho}{d(1/T)} = \frac{\ln \ln \rho_0}{n+1}\left(\frac{T_M}{T}\right)^{\frac{1}{n+1}-1}$. Далее проводилась нелинейная аппроксимация полученной зависимости по формуле aT^b, где $b = 1 - \frac{1}{n+1}$, а n — размерность системы. Установлено, что $b \approx 1/2$ (n = 1) для всего набора образцов $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$. Такое поведение зависимости может описываться либо в рамках модели прыжковой проводимости по закону Эфроса — Шкловского, либо одномерной прыжковой проводимостью по закону Мотта. Данные расчеты подтверждались спрямлением графиков в координатах $\rho\left(T^{-1/2}\right)$.

Зависимости магнитного момента от температуры были измерены от 2 до 350 K в полях 1 и 10 кЭ для двух образцов с x = 0 и x = 0,883 с помощью СКВИД-магнитометра MPMS. Из температурных зависимостей магнитной восприимчивости установлено, что образцы являются антиферромагнетиками. При температуре ниже 50 K наблюдается эффект спинового стекла. На основании этого можно предположить, что магнитные моменты трех ионов кобальта в треугольной ячейке не могут выстроиться антиферромагнитно. Предположительно, с этим же явлением связан и электронный транспорт: носителям тока для движения по локализованным состояниям необходимо скачкообразно преодолеть некий барьер, который вызван энергией обменного взаимодействия трех магнитных моментов ионов кобальта.

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

УДК 538.9

Исследование пленок нитрида алюминия на различных подложках

Г. Хамуд

Лаборатория функциональной диагностики низкоразмерных структур для наноэлектроники АТИЦФОФ НГУ, Новосибирск.

В середине 1980-х гг. нитрид алюминия (AlN) был представлен как уникальное полупроводниковое соединение в микроэлектронике, оптоэлектронике, биосенсорах и других приложениях, это связано с его исключительными свойствами, которые привлекли внимание пользователей: большие пьезоэлектрические коэффициенты (~ 5 пм/В), высокая теплопроводность (285 Вт/(м·К)), высокая механическая прочность, коррозионная стойкость, высокая скорость распространения акустических волн ($10{,}97 \cdot 10^5$ см/с), высокое напряжение пробоя $1{,}2–1{,}8 \cdot 10^5$ В/мм. Известно, что выращивание монокристаллического нитрида алюминия сопряжено с большими ограничениями и трудностями [1], поэтому получение высококачественных пленок нитрида алюминия на различных подложках вызывает большой интерес [2].

В данной работе мы стремимся найти оптимальные параметры роста тонких пленок нитрида алюминия для эффективного использования в микрорезонаторах. Исследована серия образцов нитрида алюминия, выращенных методом магнетронного распыления. Мы извлекли структурные свойства с использованием спектрометра комбинационного рассеяния света «T64000» (*Horiba Jobin Yvon*) с помощью лазера (Ar): λ = 514,5 нм и УФ-лазера (He-Cd) λ = 325 нм; оптические константы, применяя спектральный эллипсометр «АСЭБ-5» (ИФП, РФ); электрические свойства, используя Тестировщик полупроводниковых пластин Зонд-А5; проанализированы рентгеновские спектры, измеренные на дифрактометре ARL X'tra (*ThermoFischer Scientific*).

Работа выполнена при поддержке проекта МНВО РФ (№ FSUS-2020-0029).

1. Singh N. B., Berghmans A., Zhang H. et al. Physical vapor transport growth of large AlN crystals // J. Cryst. Growth. 2003. Vol. 250. P. 107–112.
2. Cimalla V., Pezoldt J., Ambacher O. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: Materials properties, technology and applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. 6386.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. В. Гейдт

УДК 535.34

Морфология и спектры отражения слоев из частиц теллура

Чжоу Цзяинь

Новосибирский государственный университет

Эффективность оптоэлектронных преобразователей зависит от антиотражающих свойств их поверхностей. Покрытия из диэлектрических пленок сильно уменьшают отражение падающего электромагнитного излучения (ЭМИ), но фактически не изменяют направление его распространения в подложке. Метаповерхности в виде массива диэлектрических частиц могут уменьшить как отражение ЭМИ, так и его прохождение сквозь подложку. В результате значительная часть падающего ЭМИ будет распространятся вдоль поверхностных слоев подложки. Это может привести к повышению в ней интенсивности межзонных переходов. Действие такой метаповерхности основано на деструктивной интерференции падающего ЭМИ с излучением магнитных и электрических резонансов, возбуждаемых в частицах.

В качестве простого и масштабируемого процесса получения покрытий из диэлектрических частиц может служить их самоорганизация при повышенных температурах на несмачиваемой подложке [1]. Есть два наиболее важных требования к материалу частиц: низкая температура плавления и высокий показатель преломления. Чем больше показатель преломления, тем меньшего размера частицы требуются для возбуждения в них резонансов в заданной области длин волн. Среди однокомпонентных материалов такому условию в наибольшей степени удовлетворяет теллур. Нами получено, что массив из частиц теллура может быть сформирован в результате осаждения теллура на поверхность кремния, покрытую наночастицами TeO_2 при температуре около 200 °C. Покрытие из таких частиц теллура приблизительно в 15 раз меньше отражает падающее ЭМИ, чем покрытие в виде сплошной пленки теллура.

Нами проводятся исследования по получению покрытия из массива частиц теллура при отжиге сплошного слоя теллура на подложке кремния за счет явления несмачиваемости. Получены компактные частицы теллура размером 30–80 нм. Магнитные и электрические резонансы в частицах теллура такого размера возбуждаются в ультрафиолетовой области спектра. Перед нами стоит задача найти технологические условия для увеличения размера компактных частиц до 100–200 нм для получения антиотражающих свойств от видимого до ближнего инфракрасного диапазона.

1. Shklyaev A. A. Coatings consisting of Ge particles on nonwettable Si oxide surfaces and their resonance reflection spectra // Thin Solid Films. 2023. Vol. 768. Art. no 139720.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. А. Шкляев

УДК 538.91

Кристаллизация германия и многослойных структур Ge/Si с применением ультракоротких импульсов инфракрасных лазеров

Чэн Юйчжу

Новосибирский государственный университет

Импульсный лазерный отжиг (ИЛО) используется для кристаллизации аморфных пленок на нетугоплавких подложках. Пленки поликристаллического германия перспективны в качестве материала для гибкой электроники [1]. В случае узкозонных полупроводниковых слоев (например, Ge), включенных в a-Si, ИЛО позволяет селективно кристаллизовать области, поглощающие ИК-излучение. Такие структуры можно использовать в p-i-n фото- и светодиодах или солнечных элементах.

Исследованы два типа образцов. Первый — пленки a-Ge:H (15 или 200 нм); второй — многослойные структуры a-Si:H/a-Ge:H, состоящие из 4 кремниевых (40 нм) и 3 германиевых (15 нм) чередующихся слоев. Образцы получены методом плазмохимического осаждения на подложках кремния или стекла. ИЛО проводили пикосекундным лазером (λ = 1030 нм, 1,4 пс) и фемтосекундным лазером (λ = 1500 нм, 70 фс) в широком диапазоне плотности энергии импульса (лазерного флюенса) от 40 до 200 мДж/см^2 в условиях однократного и многократного облучения.

Для пленки a-Ge найдены режимы от частичной до полной кристаллизации Ge без абляции. Для многослойной структуры обнаружено несколько неабляционных режимов лазерной кристаллизации от частичной кристаллизации германия без перемешивания слоев Ge/Si до полного перемешивания слоев с образованием твердых сплавов Ge_xSi_{1-x}.

1. Record-high hole mobility germanium on flexible plastic with controlled interfacial reaction / I. Toshifumi, I. Takamitsu, S. Noriyuki et al // ACS Appl. Electron. Mater. 2022. Vol. 4. P. 269–275.

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

УДК 621.315.592

Эволюция потенциального рельефа поверхности в процессе гетероэпитаксии германия на структурированных подложках кремния

Чэнь Юйцзин

Новосибирский государственный университет

Электрофизические свойства пространственно-упорядоченных массивов квантовых точек (КТ) могут получить применение в перспективных микроэлектронных приборах и устройствах. Наиболее обещающим методом для создания таких массивов является гетероэпитаксиальный рост на структурированных подложках (поверхность которых содержит систему регулярно расположенных ямок). В данной работе методом молекулярной динамики рассчитывается потенциальный рельеф в ямках в ходе гетероэпитаксии Ge на структурированных подложках Si. Определены положения минимумов, седловых точек, энергия активации поверхностной диффузии, характерные маршруты миграции атомов Ge по стенкам ямок. Проанализировано изменение этих характеристик при осаждении германия и формировании новых атомных слоев в ямках.

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

ТЕПЛОФИЗИКА

Председатель секции — д-р физ.-мат. наук *Р. И. Мулляджанов*

Экспертный совет секции
канд. физ.-мат. наук *С. В. Старинский*
канд. физ.-мат. наук *Е. А. Баранов*

THERMOPHYSICS

Section head — Dr Phys.-Math. Sci. *R. I. Mullyadzhanov*

Section scientific committee
Cand. Phys.-Math. Sci. *S. V. Starinsky*
Cand. Phys.-Math. Sci. *E. A. Baranov*

УДК 533.6

Численное моделирование волн на обдуваемой газом горизонтальной пленке жидкости

Ю. С. Апостол

Новосибирский государственный университет

Совместные газожидкостные потоки встречаются во многих отраслях. Предметом данного исследования являются стратифицированные режимы течений, охватывающие обширную часть режимной карты [1]. Стратифицированные режимы течения могут включать в себя как течения с гладкой поверхностью пленки жидкости, так и с волнистой, а при дальнейшем увеличении скорости газового потока наблюдается явление уноса капель [2]. Обычно волны на границе раздела фаз в данном режиме подразделяются на волны возмущения и волны быстрой и медленной ряби, иногда также включают большие волны [2].

В данной работе исследуется структура волн на межфазной поверхности. На волновые структуры влияет множество параметров, например, скорость жидкости, скорость газового потока, геометрия канала. Целью данной работы является получение характеристик волн при высоких расходах жидкости и газа, а также определение механизмов их образования.

Моделирование волновых структур производилось путем численного решения уравнений Навье – Стокса с использованием платформы с открытым исходным кодом OpenFOAM. Расчеты проведены методом крупных вихрей (*Large Eddy Simulation*), аппроксимация межфазной границы выполнена методом VoF (*Volume of Fluid*).

В результате моделирования получены пространственно-временные диаграммы, описывающие амплитуды поверхности для различных значений скорости газового потока, что дает понимание об эволюции волн. Показано, что при турбулизации газового потока происходит рост амплитуды волн. Также обнаружено, что генерация волн быстрой ряби происходит в результате воздействия турбулентных пульсаций газового потока на пленку жидкости.

1. Mandhane J. M., Gregory G. A., Aziz K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes // Int. J. Multiphase Flow. 1974. Vol. 1, No. 4. P. 537–553.

2. Azzopardi B. J. Drops in annular two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow. 1997. Vol. 23, No. 7. P. 1–53.

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

УДК 532.64

Молекулярное моделирование смачиваемости поверхностей

К. В. Артишевский

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

По характеру взаимодействия поверхностей с жидкостями их можно разделить на две группы: гидрофильные и гидрофобные [1]. Гидрофильные поверхности обладают хорошей смачиваемостью, а гидрофобные — противоположным свойством. Подобные материалы широко применяются в повседневной жизни людей, строительстве, производстве, поэтому изучение и модификация их свойств являются актуальной задачей.

Степень смачивания характеризуется углом смачивания. Этот угол образован касательными плоскостями к межфазной поверхности, ограничивающей смачивающую жидкость, а вершина угла лежит на линии раздела трех фаз. Угол смачивания измеряется методом лежащей капли. Если угол составляет более 90°, т. е. является тупым, то говорят, что жидкость не смачивает поверхность, если угол смачивания составляет менее 90°, то, наоборот, жидкость смачивает поверхность.

В работе проводится изучение смачиваемости различных поверхностей с помощью метода классической молекулярной динамики [2]. В этом методе временная эволюция системы взаимодействующих частиц определяется путем интегрирования их уравнений движения.

С помощью пакета LAMMPS, позволяющего проводить моделирование методом молекулярной динамики, созданы различные поверхности с гидрофобными и гидрофильными свойствами, а также капли воды. В работе получены значения углов смачивания, для разных поверхностей, в том числе обладающих различной поверхностной структурой. Также проведено изучение изменения краевого угла по мере испарения водной капли.

1. Новая (феноменологическая) теория капиллярности // Потенциал современной науки. 2015. № 5. С. 21–23.
2. Рапапорт Д. К. Искусство молекулярной динамики. Ижевск: ИКИ, 2012. 632 с.

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

УДК 532.5

Моделирование активного управления потоком для подавления прецессирующего вихревого ядра в модельной камере сгорания

Д. С. Афанаскин, А. Д. Кундашкин

Новосибирский государственный университет

Двигатели внутреннего сгорания представляют собой сложные системы, стабильность и эффективность которых зависит от многих параметров, таких как стабильность гидродинамического потока, место и скорость подачи топлива, скорость и продукты химических реакций, колебания давления. Одним из способов повышения качества смешения топлива и окислителя при диффузионном горении является закрутка потока. Кроме того, этот метод позволяет повысить эффективность сжигания топлива. Однако недостатком данного подхода является возникновение когерентных энергонесущих структур в турбулентном потоке. Прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) — один из примеров данной неустойчивости, оказывающей наибольшее влияние на стабильность потока и эффективность догорания топлива. Одним из методов подавления когерентных структур в потоке является активное управление с помощью дополнительной инжекции топлива в зонах наибольшей чувствительности, найти которые можно, к примеру, с помощью линейного анализа устойчивости и восприимчивости. Этот метод подавления был исследован в данной работе.

С помощью метода крупных вихрей было проведено изотермическое моделирование гидродинамического потока в модельной камере сгорания с фронтовым устройством Turbomeca при числе Рейнольдса $Re = 15 \times 10^3$. Вычислительная сетка состояла из $1{,}34 \times 10^6$ ячеек. Для решения уравнений Навье — Стокса использовался вычислительный алгоритм pimpleFOAM в открытом программном пакете OpenFOAM.

В работе был проведен анализ влияния дополнительной инжекции воздуха на ПВЯ и устойчивость потока при различных расходах газа и различных местоположениях дополнительной инжекции амплитудой от 1 до 15 % от среднего расхода газа на входе в завихритель. Первоначальное местоположение дополнительной инжекции было выбрано в месте наибольших вторых моментов (пульсаций) давления. Для анализа использовались мгновенные поля скорости и давления, средние поля и их вторые моменты. Для всех режимов записывались сигналы давления на трех различных расстояниях от входа в камеру сгорания. На каждой высоте точки записи давления выбирались лежащими на одной окружности для осреднения по азимутальной координате. После осреднения сигнал давления обезразмеривался на плотность и квадрат средней скорости потока на входе в расчетную область. По этому сигналу были получены спектры, на которых явно наблюдается низкочастотное колебание — ПВЯ в расчете без дополнительной инжекции и подавление когерентной структуры в рас-

четах с дополнительной инжекцией. Показано, что наиболее сильное подавление наблюдается при амплитуде дополнительной инжекции порядка 5 % от среднего расхода газа на входе в расчетную область. Также показано, что наиболее эффективным местоположением для дополнительной инжекции является место «закрепления» ПВЯ на теле обтекания, идентифицированное по пульсациям давления.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

УДК 539.233

Изменение гидрофильности и гидрофобности материалов при нанесении графена

И. А. Бетке

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

В научной среде нет единого мнения о том, как графен (моноатомный слой sp^2-гибридизованных атомов углерода) изменяет смачиваемость гидрофильных и гидрофобных материалов. Так как использование графена перспективно во многих областях, разрешение данного вопроса может привести к важным открытиям в микроканальной физике или поможет решить одну из важных задач современной гидродинамики — создание поверхности с регулируемым значением контактного угла.

Цели работы — устранить противоречия, расширив представления о свойствах графена и его влиянии на различные поверхности, и исследовать возможность консервации свойств материала, деградирующих на атмосфере, графеновым покрытием.

В работе исследовано влияние графенового покрытия на смачиваемость гладких и текстурированных поверхностей с супергидрофильными и супергидрофобными свойствами. Образцы графена были синтезированы методом атмосферного ХОГФ на медной подложке. В качестве атомарно гладких образцов использовались пластины монокристаллического кремния, покрытые оксидной пленкой различной толщины. Текстурированные супергидрофильные и супергидрофобные поверхности на основе кремния и меди были получены методом лазерной абляции.

Показано, что на всех образцах графен уменьшал как гидрофильные, так и гидрофобные свойства, устремляя значение контактного угла к собственному углу смачивания графита. При этом в сравнении с атомарно-гладкими поверхностями на текстурированных образцах влияние графена усиливалось. Особое внимание уделялось деградирующим образцам, которые вследствие осаждения из воздуха функциональных C-C и C-H групп за время эксперимента изменяли свойства от супергидрофильных до супергидрофобных. Покрытие таких образцов графеном приводило к стабилизации нейтрального значения контактного угла около 90°. Показано, что поверхности медных подложек с графеновым покрытием, подвергшиеся длительной экспозиции на воздухе, после удаления графена все равно возвращались в гидрофильное состояние.

В результате работы подтверждена гипотеза о существенном влиянии характера прилегания графена к поверхности на модификацию ее свойств, исследованы явления стабилизации и консервации свойств подложки при нанесении графеновой пленки.

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

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

Пересжатая детонация как инициатор цилиндрически расходящихся волн

А. А. Борискин

Новосибирский государственный университет
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Инициирование детонации в горючей смеси достигается за счет передачи некоторой критической энергии от внешнего инициатора. Таким инициатором может выступать взрывающаяся проволочка, электрическая или лазерная искра, заряд взрывчатого вещества, поток высокотемпературной плазмы и т. д. В силу неустойчивости и интенсивного нарастания амплитуды возмущений уже на ранней стадии импульсного срабатывания внешнего инициатора в его ближней зоне формируется нестационарная волна, скорость которой превышает скорость стационарно распространяющейся детонационной волны (ДВ). Такая волна получила название пересжатой ДВ. При удалении волны от инициатора пересжатая волна ослабевает и либо затухает при энергии инициатора меньшей критической величины ($E < E^*$), либо трансформируется в самоподдерживающийся режим распространения за счет включившегося энерговыделения горючей смеси ($E \geqslant E^*$).

Одним из широко используемых методов инициирования смеси является дифракция стационарной ДВ при переходе из узкого канала в широкий (инициирование цилиндрической ДВ) или из трубки в объем (инициирование сферической ДВ). В данной работе вместо стационарной ДВ исследуется дифракционное инициирование горючей смеси с помощью пересжатой ДВ. Цилиндрическая симметрия расходящихся волн обеспечивается в экспериментальной установке в виде узкого зазора между параллельными плоскими пластинами. Установка представляет собой два плоских, состыкованных друг с другом канала: узкий и широкий. Пересжатие инициирующей волны достигается за счет сужения ширины узкого канала (по линейному закону). Фотосъемка процесса дифракции осуществлялась фотоаппаратом в режиме «открытого объектива» совместно со светофильтром СЗС-18. Использовались смеси C_2H_2-O_2-Ar. Исследования выполнены в двух вариантах: а) одиночная пересжатая ДВ; б) две пересжатые ДВ, разнесенные друг относительно друга на некоторое расстояние. В докладе представлены результаты исследований.

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

УДК 536.331

Оптимизация тепловых потоков оптических фильтров и 1-го кристалла монохроматора в станции 1-5 ЦКП «СКИФ»

А. А. Бурдилов

Новосибирский государственный технический университет

Станция 1-5 ЦКП «СКИФ» [1], предназначенная для научных экспериментов в области медицины, материаловедения, геофизики, археологии и палеонтологии, будет использовать монохроматическое рентгеновское излучение в жестком диапазоне от 25 до 150 кэВ.

Для реализации исследовательских методик формирование пучка сверхпроводящего вигглера производится рядом оптических элементов: щелями, фильтрами и фокусирующими монохроматорами. Основной проблемой при проектировании установок такого рода является большое тепловое воздействие «белого» синхротронного излучения (СИ) на оптические элементы, что приводит к их разъюстировке.

Для снятия тепла на станции предполагается использование ряда алмазных и карбид-кремниевых фильтров. Данное решение позволяет постепенно снимать тепловую мощность пучка перед монохроматором. СИ, пройдя через ряд фильтров, все еще характеризуется высокой тепловой мощностью, воздействующей на 1-й кристалл монохроматора, вызывая тепловое расширение, что является фактором разъюстировки прибора.

В рамках данной работы был выполнен расчет теплового поглощения в программе SPECTRA [2] фильтрами и 1-м кристаллом монохроматора. Также были построены температурные карты с использованием ПО Ansys указанных оптических элементов, что позволяет оценить их рабочие температуры и деформации, а также количество сублимируемого вещества [3, 4]. Полученные результаты будут использованы при проектировании системы охлаждения станции 1-5 в КТИ НП СО РАН.

1. Купер К. Э., Легкодымов А. А., Дучков А. А. и др. Концептуальный проект станции 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» // Технологическая инфраструктура «СКИФ». 2022. Т. 1. С. 168–226.

2. Tanaka T., Kitamura H. SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code // J. Synchrotron Radiat. 2001. Vol. 8. P. 1221–1228.

3. Goray L. Absorption and scattering by structured interfaces in X-rays // J. Synchrotron Radiat. 2020. Vol. 28. P. 196–206.

4. Sutter J. P. Obtaining local reciprocal lattice vectors from finite-element analysis // J. Synchrotron Radiat. 2008. Vol. 15. P. 584–592.

Научный руководитель — канд. техн. наук П. С. Завьялов

УДК 544.03

Исследование динамики взаимодействия падающей капли с текстурированной лазером поверхностью

М. М. Васильев

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

Контролируемое изменение свойств смачиваемости различных поверхностей активно исследуется по всему миру ввиду большого потенциала для прикладного применения: интенсификация теплообмена, улучшение антикоррозийных и самоочищающихся свойств [1] и т. д. Известно, что свойства смачивания поверхности задаются химическим составом материала, а также микро- и наноструктурой. Одним из подходов, способных тонко контролировать оба этих параметра, является импульсная лазерная абляция (ИЛА). К преимуществам ИЛА относятся вариативность выбора обрабатываемого материала и гибкость в подборе параметров обработки [2].

В данной работе проведено комплексное исследование динамики взаимодействия падающих капель воды с медными поверхностями, модифицированными наносекундным лазером. В ходе работы выполнено текстурирование меди для исследования динамики смачивания каплями воды поверхности, а также с целью интенсификации теплообмена. Результаты показали, что поверхности, сочетающие гидрофильные и супергидрофильные области, позволяют контролировать места активации кипения. Также проведен численный анализ падающих капель на основе метода решеточных уравнений Больцмана. Численная модель была верифицирована с помощью экспериментальных данных, полученных в рамках данной работы. В итоге получена верифицированная численная модель, позволяющая обобщить имеющиеся экспериментальные результаты на широкий диапазон режимов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10119).

1. Ganesh V. A. et al. A review on self-cleaning coatings // J. Mater. Chem. 2011. Vol. 21, No. 41. P. 16304–16322.
2. Starinskiy S. V., Shukhov Y. G., Bulgakov A. V. Laser-induced damage thresholds of gold, silver and their alloys in air and water // Appl. Surf. Sci. 2017. Vol. 396. P. 1765–1774.

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

УДК 621.9

Исследование массообмена при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа

С.О. Вострецов

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

В настоящее время применение микроканалов в различных отраслях промышленности и науки является весьма перспективным. Они могут применяться как теплообменники, химические реакторы, микромиксеры и микроэкстракторы. Микроканалы обеспечивают высокое отношение площади межфазной границы к объему, что позволяет достичь высоких интенсивностей различных процессов. В данной работе исследовался процесс экстракции при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа при снарядном режиме течения.

Изучаемыми величинами являются эффективность экстракции, показывающая отношение текущей концентрации к максимально возможной, и общий объемный коэффициент массообмена, показывающий интенсивность массообмена:

$$\%E = \frac{C_2^{in} - C_2^{out}}{C_2^{in} - C_2^{*}},$$

$$k_L a = \frac{\ln\left(\dfrac{C_2^{in} - C_2^{*}}{C_2^{out} - C_2^{*}}\right)}{\tau\left[\dfrac{1}{K\varepsilon_1} + \dfrac{1}{1-\varepsilon_1}\right]}.$$

В эксперименте в качестве дисперсной фазы использовался 70%-й водоглицериновый раствор, а в качестве несущей — трибутилфосфат (ТБФ). Между фазами происходил массообмен флуоресцентного красителя Родамин 6Ж, который добавлялся в дисперсную фазу. Концентрация красителя определялась в перемычках несущей фазы с помощью экспериментального метода исследования micro-LIF.

Первой частью эксперимента являлось определение коэффициента распределения — отношения равновесных концентраций в фазах. Для этого подготавливались образцы из пар жидкостей равных объемов с заданной концентрацией флуоресцентного красителя в водной фазе. Эти образцы перемешивались, отстаивались и разделялись. С помощью построенной калибровочной кривой для раствора глицерина определялась концентрация в образцах, таким образом были определены коэффициенты распределения и построена калибровочная кривая для ТБФ.

Второй частью эксперимента было измерение концентраций примеси в перемычках несущих фаз при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей. Для этого были сделаны серии снимков в различных точках микроканала вниз по течению.

На основе полученных результатов для потока водного раствора глицерина и ТБФ был сделан вывод, что при фиксированном отношении расходов фаз увеличение общего расхода приводит к увеличению эффективности экстракции и коэффициента массообмена в один и тот же момент времени. Кроме того, наибольшие значения этих величин соответствовали отношению фаз, близкому к 1.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Ягодницына

УДК 621.4

Экспериментальное исследование распыла двухкомпонентной жидкости в форсунке центробежного типа

П. А. Данилов

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

Сжигание органического топлива в обозримом будущем останется основным способом получения энергии. Для этой цели широко используются двигатели внутреннего сгорания, в том числе газовые турбины, что связано с их высокой эффективностью. Однако экологические требования к двигателям постоянно ужесточаются, что стимулирует внедрение новых технологий для повышения эффективности распыла топлива.

Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является стимуляция вторичного распада капли с использованием эмульсий, например топлива и воды, что актуально для дизельных двигателей с прямым впрыском. При перегреве воды внутри капли топлива происходит так называемый микровзрыв, который приводит к мгновенному распаду капли топлива на более мелкие. Микровзрывной распад капель позволяет существенно повысить их суммарную поверхность и однородное распределение на удалении от форсунки, что способствует повышению эффективности сгорания топливной эмульсии.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния состава двухкомпонентной жидкости на процесс распыла в форсунке центробежного типа. Для этого использовалась форсунка с двумя отдельными симметричными тангенциально расположенными подводами. Подача жидкости регулировалась манометрами и осуществлялась при режимах давления 3, 4 и 5 атмосфер. Для наблюдения эффекта были получены данные о размерах и скорости частиц в сечении конуса распыла при помощи локально-времяпролетного метода на базе прибора SpraySpy (AOM-Systems) при подаче воды в оба канала. Форсунка была установлена на неподвижной конструкции, получение данных в сечении распыла производилось путем перемещения перетяжки лазерного излучения при помощи механизированного устройства позиционирования.

Полученная в результате исследования информация может использоваться в будущем для формирования новых теоретических подходов к описанию распыла двухкомпонентной жидкости и создания методик, улучшающих характеристики распыла, такие как эффективная поверхность капель и однородность их распределения при удалении от форсунки.

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

УДК 533.599, 533.17, 539.198, 544.277.6, 544.435.2

Исследование процесса взаимодействия атомов аргона с фоновыми частицами в сверхзвуковом кластированном потоке

Е. Д. Деринг

Новосибирский государственный университет

Исследование истечения газовых потоков, расширяющихся в сильно разреженное пространство или вакуум, является важной научно-технической задачей. Одной из активно используемых методик проведения измерений в данной области является молекулярно-пучковая масс-спектрометрия (МПМС). Если в эксперименте для формирования сверхзвукового потока используется газ комнатной температуры, то при его расширении в струе может происходить процесс конденсации, приводящий к образованию ван-дер-ваальсовых кластеров. В то время как процесс рассеяния мономеров на остаточном фоновом газе при формировании молекулярного пучка из газового потока является достаточно изученным, рассеяние ван-дер-ваальсовых кластеров в подобных условиях представляет собой сложную задачу, требующую детального рассмотрения. В ходе данной работы метод МПМС был использован для исследования процесса взаимодействия кластированного сверхзвукового потока с фоновыми мономерными частицами. Работа выполнена на вакуумном газодинамическом стенде «ЛЭМПУС-2» отдела прикладной физики ФФ НГУ.

Частицы молекулярного пучка, сформированного из сверхзвукового потока аргона, рассеивались на статичных фоновых частицах в послескиммерной секции молекулярно-пучковой системы. При помощи квадрупольного масс-спектрометра Hiden Epic 1000 регистрировались зависимости амплитуды сигналов, соответствующие мономерным, димерным и тримерным частицам аргона (40, 80 и 120 а. е. м. соответственно), от давления в послескиммерной секции, варьируемого в диапазоне 10^{-4}–10^{-2} Па. С использованием данных зависимостей были рассчитаны значения сечения рассеяния мономеров и малых кластеров аргона. Измерения проводились в условиях различной степени конденсации частиц, средний размер кластеров в потоке варьировался от 1 (отсутствие конденсации) до 1400 ат./кл.

В результате установлена нетривиальная зависимость сечения рассеяния мономерных частиц аргона от среднего размера кластеров $\langle S \rangle$, являющаяся константой при $\langle S \rangle < 200$. В докладе обсуждаются также особенности исследования кластированного потока с использованием молекулярно-пучковой масс-спектрометрии.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 22-11-00080).

Научный руководитель — мл. науч. сотр. К. А. Дубровин

УДК 532.5

Исследование форсунки дизельного риформера численным методом

М. О. Жерибор

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

В данной работе была предложена и исследована модель сопла для риформера дизельного топлива [1], использующегося для получения водорода.

Перспективным вариантом механизма для получения электроэнергии являются энергоустановки на основе топливных элементов. Главными проблемами распространения таких установок являются их высокая стоимость и малая доступность топлива для них. Таким образом, существует потребность в преобразователях энергии, работающих на дизельном топливе, использование которого широко распространено. Для протекания каталитической реакции в камере реактора важно обеспечить равномерное распределение капель топлива по внутреннему объему, что создает потребность в оптимизации сопла форсунки для распыла жидкого топлива.

Была предложена модель форсунки с двумя подводящими каналами для жидкого топлива и водяного пара, с созданием закрутки разного знака в двух областях внутри форсунки. Ниже по потоку области противовращения смыкаются на разделительной кромке, создавая область с большой амплитудой поперечного сдвига. Сдвиг течения приводит к интенсивной генерации турбулентности, которая увеличивает эффективную диффузию, перемешивая компоненты смеси. Также сдвиг скорости воздействует на капли/пленку жидкой фазы, приводя к их деформации и более быстрому распаду и испарению капель.

Численное моделирование производилось в открытом расчетном пакете OpenFOAM [2] методом RANS с использованием модели k-ω-SST в сжимаемой постановке. В результате расчетов были получены распределения продольных и окружных скоростей, амплитуды сдвига и массовой доли пара дизельного топлива. По распределению массовой доли пара можно заметить, что вблизи выхода из форсунки достигается равновесная концентрация паровой фазы топлива, что говорит об эффективности предложенной модели форсунки.

1. Rogozhnikov V. N. et al. Design, scale-up, and operation of a Rh/Ce0. 75Zr0.25O2-δ-η-Al2O3/FeCrAl Alloy Wire Mesh Honeycomb Catalytic Module in Diesel Autothermal Reforming // Chem. Eng. J. 2019. Vol. 374. P. 511–519.
2. OpenFOAM. URL: https://www.openfoam.com.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. Ю. Хребтов

УДК 532

Исследование динамики роста одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации

А. И. Зорькина

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

Кипение — эффективный способ теплоотвода, широко использующийся во многих областях промышленности. Для более глубокого понимания физики кипения, включающей в себя взаимосвязь нескольких эффектов, в настоящей работе рассматривается рост одиночного пузыря на поверхности нагрева. Эксперимент проведен в условиях пониженной гравитации на МКС, что увеличивает пространственные и временные масштабы задачи, позволяя детальнее изучить процессы, происходящие при кипении. В существующих корреляциях для тепловой стадии роста пузыря диаметр пропорционален квадратному корню от времени. Д. А. Лабунцов и В. В. Ягов вывели зависимость, учитывающую испарение микрослоя, образовавшегося между основанием пузыря и поверхностью нагрева, работающую в широком диапазоне изменения числа Якоба.

Экспериментальная ячейка заполнена рабочей жидкостью FC-72. Паровой пузырь инициализируется лазерным импульсом на поверхности нагревателя, в качестве которого служит слой хрома толщиной 800 нм, нанесенный на прозрачный в ИК-диапазоне кристалл фторида бария. Установка снабжена высокоскоростными инфракрасной, регистрирующей температуру нагревателя, и черно-белой, записывающей форму растущего пузыря, камерами. В ходе эксперимента варьируются следующие параметры: давление жидкости, температура недогрева, тепловой поток от нагревателя, время ожидания — время между активацией нагревателя и включением лазера.

Исследована динамика роста одиночного парового пузыря. Выявлена зависимость скорости роста пузыря от параметров эксперимента: диаметр увеличивается с уменьшением давления, увеличением времени ожидания и уменьшением недогрева. Степень t увеличивается с уменьшением времени ожидания и изменяется в диапазоне от 0,49 до 0,8. Проведен численный расчет для определения температурного поля нагревателя в зависимости от времени. Полученные численные значения использовались для сравнения экспериментальных данных с корреляцией Д. А. Лабунцова и В. В. Ягова.

Научные руководители —
д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН О. А. Кабов, канд. физ.-мат. наук Ф. В. Роньшин

УДК 536.425

Численное моделирование лазерной аморфизации поверхности металлического сплава

Д. С. Иваненко

Новосибирский государственный университет

В настоящее время в области материаловедения и аддитивных технологий большой интерес вызывают уникальные по своим свойствам аморфные металлы, или металлические стекла. Металлическое стекло обладает аморфной структурой или состоит частично из аморфной и кристаллической фаз. Эта особенность обуславливает наличие у аморфных металлов ряда полезных механических свойств: превосходная твердость, хорошая коррозионная стойкость, высокий предел упругой деформации [1].

В настоящее время металлические стекла находят применение в радиоэлектронной промышленности, производстве защитных и коррозиестойких покрытий различных конструкций. Применение данного материала ограничено его дороговизной и неудобством методов промышленного изготовления. Актуальным направлением является разработка и оптимизация лазерных методов получения металлического стекла.

В данной работе предлагается такой способ лазерной обработки аморфизующихся сплавов, который заключается в быстром нагреве поверхности с помощью лазерного излучения и последующем быстром охлаждении, при котором атомы вещества не успевают сформировать кристаллическую решетку.

Разработана математическая модель лазерной аморфизации поверхности металлов в двумерной плоской и трехмерной постановках, которая позволяет оценить размеры и структуру аморфно-кристаллического слоя и рассчитать эффекты локализации кристаллических вкраплений, которые влияют на свойства материала. Расчет доли аморфной фазы проводился с использованием модели кристаллизации А. Н. Колмогорова [2]. Рассчитаны временные характеристики зависимости аморфизации поверхности подложки от теплопереноса в ванне расплава при различных режимах сканирования луча.

Проведены тестовые расчеты, показывающие корректность работы программы. Результаты расчетов согласуются с литературными данными.

1. Williams E., Lavery N. Laser processing of bulk metallic glass: A review // J. Mater. Process. Technol. 2017. Vol. 247. P. 73–91.

2. Колмогоров А. Н. К статистической теории кристаллизации металлов // Изв. РАН. Сер. математическая. 1937. Т. 1, № 3. С. 355–359.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. О. Б. Ковалев

УДК 532.5

Численное моделирование активного управления потоком в модельной камере сгорания

А. Д. Кундашкин, Д. С. Афанаскин

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

В современном мире становится все больше возобновляемых источников энергии. Однако основным недостатком «зеленой» энергетики (солнечные батареи, ветряные генераторы) является нестабильность, с которой они позволяют получать электроэнергию. Этот факт предъявляет дополнительные требования к другим источникам энергии, которые должны гибко реагировать на изменение режима работы и внешние факторы. В связи с этим полный отказ от источников энергии, в основе которых лежит горение различных видов топлива, в данный момент не представляется возможным. Важнейшей характеристикой, влияющей на эффективность и гибкость работы камер сгорания, является гидродинамическая стабильность потока [1]. Одним из методов стабилизации потока является его закрутка, что влечет за собой возникновение когерентных структур, таких как прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ) [2]. Подавление ПВЯ можно осуществлять с помощью изменения геометрии камеры (пассивное управление) или дополнительной инжекции (активное управление). Метод активного управления потоком был исследован в данной работе.

Проведено численное моделирование изотермического потока в модельной камере сгорания с помощью метода крупных вихрей при числе Рейнольдса Re = 15000. Расчетная область состояла из 13 млн ячеек. Для решения уравнений Навье — Стокса использовался решатель pimpleFoam из открытого программного пакета OpenFOAM.

Проведен анализ нескольких режимов течения с дополнительной инжекцией от 1 до 15 % от среднего расхода газа в фронтовом устройстве камеры сгорания. Для анализа использовались мгновенные поля скорости и давления, средние поля и вторые моменты (пульсации). В качестве первого места дополнительной инжекции была выбрана точка «крепления» ПВЯ к телу обтекания, найденная по максимальным пульсациям давления в потоке. Также для всех режимов записывались сигналы давления на трех различных расстояниях от входа в камеру сгорания. Для каждой высоты были выбраны точки, лежащие на одной окружности для осреднения по азимутальной координате. На основе обезразмеренных сигналов давления были получены спектры с наблюдаемой низкочастотной когерентной структурой. Для режимов с инжекцией показано, что наилучшее подавление оказывает дополнительная инжекция порядка 5 % от среднего расхода газа во фронтовом устройстве [3]. Также из результатов видно, что наиболее эффективным местоположением инжекции является зона наибольших пульсаций давления. В дальнейшей работе планируется провести линейный анализ устой-

чивости и восприимчивости для подтверждения данной гипотезы, а также дальнейшее варьирование амплитуды и местоположения для нахождения наиболее эффективного режима.

1. Lieuwen T. et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors // J. Eng. Gas Turbines Power. 2001. Vol. 123, No. 1. P. 182–189.
2. Egusquiza M. et al. Advanced condition monitoring of Pelton turbines // Measurement. 2018. Vol. 119. P. 46–55.
3. Kundashkin A. D. et al. Active flow control in a model combustion chamber using additional gas injection method // Thermophysics Aeromechanics. 2022. Vol. 29, No. 5. P. 785–790.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Р. И. Мулляджанов

УДК 536.4

Изменение формы конусного пламени под действием поперечного электрического поля

К. Д. Лавронов

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

В настоящее время остаются актуальными вопросы, связанные с повышением стабилизации пламени и эффективности сжигания топлива и снижением выбросов вредных веществ. Одним из решений может стать помещение пламени во внешнее электрическое поле, так как во фронте пламени присутствует значительное количество носителей заряда, как положительных, так и отрицательных, за счет реакций хемионизации. Помещение пламени в электрическое поле расширяет пределы стабилизации пламени, что позволяет добиться улучшения устойчивости фронта пламени, улучшения смешения топлива и окислителя, повышения эффективности горения.

Цели работы — экспериментальное исследование влияния внешнего электрического поля на пламя горелки типа Бунзена, размещенное между плоскими электродами, изучение его устойчивости и деформации в зависимости от напряжения. В качестве топлива использовались метан, этан, пропан, а в качестве окислителя — воздух. Подача топлива регулировалась расходомерами при $Re = 1000$ и коэффициенте избытка топлива $\varphi = 0{,}92$. Пламя располагалось между плоскими электродами, подключенными к постоянному источнику напряжения, с разницей потенциалов $U = 2{,}5$ кВ и минимальным расстоянием между электродами 60 мм. Напряженность поля менялась путем изменения расстояния между электродами. Для наблюдения эффекта были сделаны фотографии пламени, с ростом напряженности увеличивалось отклонение вершины пламени от оси, фронт пламени деформировался. Для визуализации поля течения использовалась методика PIV.

Полученная в исследовании экспериментальная информация может быть использована в будущем для теоретического описания влияния электрического поля на горение пламени, создания методик управления, улучшающих эффективность горения, расширяющих пределы стабилизации.

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

УДК 532.1

Исследование процесса реламинаризации исходно развитого турбулентного течения с использованием пассивного метода управления потоком

А. А. Лукьянов

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

Большинство существующих методов снижения сопротивления трения основаны на частичной ламинаризации той или иной области турбулентного пограничного слоя. Недавно в работе [1] при помощи специального устройства, представляющего собой систему сот, удалось полностью ламинаризовать исходно развитое турбулентное течение и тем самым уменьшить путевые потери за этим устройством. Однако применение такого устройства приводит к существенному местному гидравлическому сопротивлению, а эффективность такого метода требует дальнейших исследований. В данной работе предпринята попытка модернизации рассмотренного в [1] устройства с целью снижения оказываемого местного сопротивления.

Рассматривается развитое турбулентное течение воды в прямом оптически прозрачном цилиндрическом канале диаметром 0,016 м и длиной 5 м при числах Рейнольдса $2300 < \mathrm{Re} < 5000$, где $\mathrm{Re} = U_b D/\nu$, U_b — среднерасходная скорость, D — диаметр канала, ν — коэффициент кинематической вязкости. Рассматривалось два типа устройств, представляющих систему сот с различной конфигурацией. Эти устройства устанавливались на расстоянии 70 D от входного сечения канала, где течение было полностью развитым. Измерения были выполнены на расстояниях 6 D и 120 D за этими устройствами с использованием высокоскоростного многопроходного метода *Particle Image Velocimetry* с высоким пространственно-временным разрешением.

Результаты предварительных измерений профиля скорости и турбулентных пульсаций поперек канала показали, что течение на входе в измерительный участок было полностью развитым. Анализ мгновенных полей скорости показал эффективность применения рассматриваемого пассивного метода управления. Были получены параболические профили скорости на расстоянии 120 D вниз по потоку от рассматриваемых устройств вплоть до $\mathrm{Re} = 3800$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-29-01274).

1. Kühnen J., Scarselli D., Hof B. Relaminarization of pipe flow by means of 3d-printed shaped honeycombs // J. Fluids Eng. 2019. Vol. 141, No. 11.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Д. И. Зарипов

УДК 532.529

Численное исследование тепло-гидравлических характеристик неподвижного снаряда Тейлора

Ан. А. Лукьянов

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

Снарядное течение является одним из наиболее часто встречающихся режимов течения в двухфазном потоке. Данное течение широко встречается в большинстве технологических и промышленных устройств. Особенностью снарядного течения является наличие пузырей газа, занимающих практически все поперечное сечение трубы. Данные пузыри обычно называют снарядами Тейлора.

В экспериментальных работах всплытие одиночного газового снаряда Тейлора в вертикальной трубе с жидкостью происходит с постоянной скоростью, которая не зависит от длины снаряда [1]: $U = 0{,}35\sqrt{(gD)}$. В опускном потоке жидкости, скорость которого равна скорости всплытия снаряда, происходит режим зависания. Впервые возникновение устойчивой квазистационарной газовой каверны в опускном течении было замечено в работе [2].

В соответствии с экспериментом [3] проведено моделирование снаряда длиной 60 мм для различной скорости опускного потока жидкости: от 0,15 до 0,30 м/с. Моделирование проводилось с использованием метода VOF. Уравнения Навье — Стокса дополнялись уравнениями модели турбулентности k-ω SST. Расчетная сетка была выполнена в форме круглого канала длинной 150 мм и диаметром 20 мм со сгущением около стенки. Общее количество ячеек составляло около 5 млн.

В работе был проведен расчет межфазной поверхности квазистационарного снаряда Тейлора при различных скоростях опускного потока. Проведено сравнение расчетной формы снаряда с экспериментом. Рассчитано трение на стенке вдоль всего снаряда, а также профилей пузырей. Показана хорошая согласованность с экспериментальными данными. Рассчитан профиль модуля скорости |U|, построенный по радиусу канала в разных сечениях для скорости опускного потока от 0,15 до 0,30 м/с.

1. Collins R., de Moraes F. F., Davidson J. F., Harrison D. The motion of a large gas bubble rising through liquid flowing in a tube // J. Fluid Mech. 1978. Vol. 89, Pt. 3. P. 497–514.
2. Bacon R. P., Scott D. M., Thorpe R. B. Large bubbles attached to spargers in downwards two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow. 1996. Vol. 22, No. S1.
3. Кашинский О. Н., Курдюмов А. С., Лобанов П. Д. Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опускным потоком жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 93–98.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук М. В. Алексеев

УДК 544.015.2

Кинетика кристаллизации пленок нестехиометрического оксида кремния, индуцированной золотом

Н. А. Лунев

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

Получение высококачественных тонких пленок поликристаллического кремния (poly-Si) на подложках из стекла привлекательно с точки зрения изготовления сенсоров, тонкопленочных транзисторов, дисплеев и солнечных элементов. Металл-индуцированная кристаллизация (МИК) слоев аморфного кремнийсодержащего материала, например аморфного кремния и его нестехиометрического оксида (a-SiO_x, $0 < x < 2$), является перспективным подходом для получения тонких пленок poly-Si [1, 2]. Управление кинетикой зародышеобразования и роста кристаллов в процессе МИК является важной задачей, так как это обеспечивает получение пленок poly-Si с заданными структурными характеристиками.

В данной работе впервые была изучена кинетика золото-индуцированной кристаллизации тонких пленок a-SiO_x в зависимости от температуры отжига.

Слоистые образцы были изготовлены в компоновке «подложка/Au/a-$SiO_{0,2}$». Тонкие пленки золота толщиной 30 нм были нанесены на кварцевые подложки методом термовакуумного напыления. Затем тонкие пленки a-$SiO_{0,2}$ толщиной 150 нм были осаждены на них методом магнетронного распыления. Отжиг проводился в высоковакуумной камере, снабженной оптической системой *in situ* наблюдения в высоком (5×10^{-4} Па) вакууме при температурах 220, 230, 240 и 250 °C в течение 9–70 ч.

Полученные *in situ* оптические снимки поверхности образцов позволили построить и проанализировать временные зависимости степени покрытия и плотности зародышеобразования, а также скорости нуклеации кристаллической фазы Si. В рамках теории Колмогорова — Джонсона — Мела — Аврами [3] были определены энергии активации процессов зародышеобразования и роста кристаллитов (2,51 ± 0,80 эВ; 0,31 ± ± 0,10 эВ) [2]. Также была определена энергия активации процесса золото-индуцированной кристаллизации a-$SiO_{0,2}$ в целом, составившая 1,62 ± 0,15 эВ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-79-10079), https://rscf.ru/project/22-79-10079/.

1. Toko K., Suemasu T. Metal-induced layer exchange of group IV materials // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53, No. 37.
2. Zamchiy A. O., Vorobyov Y. V., Lunev N. A. et al. Kinetics of gold-induced layer exchange crystallization of amorphous silicon suboxide films: Experimental and theoretical study // J. Alloys Compd. 2023. Vol. 939.
3. Kolmorogov A. N. On the Statistical Theory of Crystallization of Metals // Izvest. Akad. Nauk SSSR. Ser. Math. 1937. No. 3. P. 355–359.

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

УДК 532.5

Управление течением в модельной гидротурбине Френсиса с помощью радиально-щелевой инжекции

И. И. Лутченко[1,2], Е. В. Палкин[2]

[1]Новосибирский государственный университет
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Гидроэнергетика играет ключевую роль в переходе к возобновляемым источникам энергии. Однако в конструкции гидротурбин при работе в режимах частичной загрузки могут возникать вихревые структуры, такие как прецессирующий вихревой жгут. Это явление приводит к негативным последствиям, которые уменьшают диапазон устойчивой работы гидротурбины. Для расширения этого диапазона необходимо корректно описывать и анализировать такого рода неустойчивости.

В работе представлено исследование по управлению нестационарным турбулентным потоком в отсасывающей трубе модельной гидротурбины Френсиса-99 с помощью радиально кольцевой инжекции. Численные расчеты нестационарного однофазного несжимаемого потока выполнены с использованием вихреразрешающего метода LES, реализованного в открытом программном пакете OpenFOAM [1]. В докладе представлен выбор наиболее оптимального места инжекции для подавления прецессирующего вихревого жгута, распределения поля скорости вниз по течению после тела обтекания, анализ полученных результатов.

1. Сайт OpenFOAM. URL: http://www.openfoam.com (дата обращения: 15.06.2022).

Научный руководитель — Е. В. Палкин

УДК 697.9

Исследование теплообмена в потоке в регенеративном теплообменнике

С. И. Мезенцев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Воздух может содержать загрязняющие вещества, такие как пыль, дым и химические вещества, которые наносят вред дыхательной системе и могут вызвать астму и аллергию. Вдыхание свежего, чистого воздуха может предотвратить влияние негативных факторов и повысить качество жизни. Решением проблемы загрязненного воздуха является установка регенератора. Регенераторы оснащены теплообменником, с помощью которого происходит передача тепла от выходящего застоявшегося воздуха к поступающему свежему воздуху.

В данной работе рассматривается регенеративный теплообменник. Его конструкция заключается в том, что трубки, наполненные водой, расположены параллельно потоку воздуха. Одним из потенциальных преимуществ такой конструкции является то, что трубки могут быть достаточно длинными без значительного увеличения размеров теплообменника. Это поможет увеличить площадь поверхности теплоотдачи и привести к повышению эффективности теплообмена. Кроме того, параллельное расположение трубок может обеспечить более равномерное распределение температуры по всему теплообменнику.

Был сделан цифровой двойник теплообменного модуля и произведено моделирование теплообмена в программном продукте ANSYS. Данное ПО использует моделирование вычислительной гидродинамики (CFD) для симуляции процесса теплообмена в регенеративном теплообменнике. Это обеспечивает точное прогнозирование распределения температуры и давления по всему теплообменнику. Результаты расчетов сопоставлялись с экспериментальными данными.

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

УДК 539.232

Использование гидрофобных мембран для сепарации воды и различных нефтепродуктов

А. В. Мельник

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

Сепарация воды и различных нефтепродуктов является актуальной задачей экологии, экономики, нефтедобычи и других областей. Во-первых, самым распространенным способом добычи нефти является закачка воды в нефтяной пласт с последующей стадией обезвоживания, которая является неотъемлемой частью нефтепереработки. Во-вторых, разливы нефти и сброс промышленных нефтесодержащих сточных вод представляют угрозу для окружающей среды и здоровья человека. В-третьих, удаление воды из нефтепродуктов имеет решающее значение для транспортной области, поскольку даже небольшое количество воды в топливе может угрожать работоспособности и целостности агрегатов транспортных средств. Однако существующие традиционные методы сепарации имеют недостатки: большие энергозатраты, образование вторичных загрязнителей, низкая эффективность разделения и др. Поэтому сейчас активно ведутся исследования, изучающие сепарацию воды и нефтепродуктов с помощью мембран.

В представленной работе сепарационные мембраны изготавливались с помощью метода Hot Wire CVD: путем нанесения гидрофобного фторполимерного покрытия на поверхности металлических сеток. Преимуществом данного метода является возможность получать фторполимерные покрытия с различными краевыми углами смачивания.

Проведенные эксперименты показали, что гидрофобные мембраны, полученные с помощью метода HW CVD, могут быть использованы для успешной сепарации эмульсий из воды и различных нефтепродуктов: бензина, керосина, дизеля, товарной нефти. Кроме того, были проведены ресурсные испытания по исследованию устойчивости полученных покрытий после нескольких циклов сепарации. Было показано, что мембрану можно использовать несколько раз, после чего ее можно промыть от тяжелых углеводородов либо заменить на новую.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Сафонов

УДК 539.2

Определение стехиометрического коэффициента тонких пленок α-SiO_x

В. А. Непомнящих

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

Тонкие пленки аморфного нестехиометрического оксида кремния (субоксид кремния, α-SiO_x, $0 < x < 2$) широко используются в микроэлектронике, оптоэлектронике и солнечных элементах. Изменение стехиометрии позволяет регулировать показатель преломления в широком диапазоне, что может быть использовано для изготовления широкополосных просветляющих покрытий, широкополосных отражающих зеркал и фильтров интерференционного типа.

Метод FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) является неразрушающим и быстрым методом, позволяющим определить концентрации кислорода в α-SiO_x, поэтому определение коэффициента пропорциональности (A_0) между содержанием кислорода и интегральной абсорбцией полосы поглощения Si-O-Si является актуальной задачей.

Тонкие пленки α-SiO_x были синтезированы с помощью системы магнетронного распыления с использованием мишени c-Si (99,99 %) и газовой смеси Ar + O_2 на подложках из кварца и монокристаллического кремния. Мощность магнетрона составляла 120 Вт, а давление в камере — 0,5 Па. Концентрация кислорода в пленках варьировалась путем изменения количества кислорода в камере синтеза. Стехиометрический коэффициент пленок α-SiO_x определялся из инфракрасных спектров пропускания, полученных с помощью Фурье-спектрометра Scimitar FTS 2000 в диапазоне длин волн 400–4000 $см^{-1}$. Толщины пленок α-SiO_x были получены из поперечного сечения образца с помощью РЭМ (JEOL SM-6700 F). Для определения концентрации кислорода в пленках использовался метод EDS.

Для пленок α-SiO_x с разным стехиометрическим коэффициентом был определен коэффициент пропорциональности (A_0) между содержанием кислорода и интегральной абсорбцией полосы поглощения Si-O-Si, находящийся в диапазоне $1{,}4 \cdot 10^{-19} \div 2{,}5 \cdot 10^{-19}$ $см^{-2}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-79-10079), https://rscf.ru/project/22-79-10079.

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

УДК 345.343

Исследование устойчивости наножидкостей на основе углеродных наночастиц и наночастиц SiO_2 методом спектрального анализа

А. А. Осипов

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

Наножидкости представляют собой двухфазную среду, состоящую из жидкости и равномерно распределенных в ней твердых наночастиц [1]. Включение твердых частиц в жидкость значительно изменяет ее теплофизические свойства, что позволяет использовать наножидкости в различных теплоэнергетических установках и солнечных энергетических системах. При этом одной из первостепенных задач является получение устойчивых наножидкостей. Целью данной работы было исследование устойчивости наножидкостей методом анализа спектров поглощения. Наножидкости были изготовлены на основе воды с добавлением углеродных наночастиц (ИТ СО РАН, средний размер частиц 7 нм) и наночастиц SiO_2 (Таркосил Т20, средний размер частиц 100 нм). В часть образцов было добавлено поверхностно-активное вещество додецилсульфат натрия.

Внутренние процессы коагуляции и седиментации изменяют поглощательную способность наножидкости. При регистрации спектров прошедшего через образец света определялось изменение поглощения вещества от времени, что непременно связано с его стабильностью. Спектры были получены при помощи спектрографа ДФС-458С. Экспериментальное наблюдение проводилось 2 мес. Наножидкость на основе воды и углеродных наночастиц с добавлением додецилфульфата натрия сохраняла устойчивость в течение всего времени наблюдения. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что добавление ПАВ в наножидкости на основе углеродных наночастиц приводит к их стабилизации, однако для наножидкости с оксидными частицами наблюдался обратный эффект.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-79-00139), https://rscf.ru/project/22-79-00139/.

1. Chol S. U. S., Estman J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // ASME-Publications-Fed. 1995. Vol. 231. P. 99–106.

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

УДК 539.232

Осаждение гидрофобных фторполимерных покрытий на обработанную плазмой поверхность нержавеющей стали

А. В. Петрова

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

Нержавеющая сталь широко используется в конструкциях различных теплообменных устройств благодаря своим свойствам. Во многих таких устройствах поверхности из стали взаимодействуют с водой. Известно, что использование поверхностей с различными свойствами смачивания, например гидрофобными, позволяет существенно интенсифицировать теплообмен при фазовом переходе, организовать самоочищение или антиобледенение и т. д. По этой причине придание поверхности из нержавеющей стали гидрофобных свойств является важной задачей.

Свойства смачивания материала определяются двумя параметрами: структурой поверхности (микро- и наношероховатость) и свободной поверхностной энергией, т. е. химическими связями в приповерхностных слоях. Шероховатость поверхности можно изменить, обрабатывая ее плазмой тлеющего разряда. Обработка может изменять не только строение, но и химический состав в приповерхностных слоях благодаря различному воздействию плазмы тлеющего разряда на зерна различных металлов и их соединений в составе нержавеющей стали. Дополнительно свободную энергию поверхности можно уменьшить осаждением тонких покрытий, например, фторполимерных, обладающих наименьшими значениями поверхностной энергии.

В представленной работе рассмотрена возможность комбинации представленных выше подходов для формирования устойчивых гидрофобных покрытий. В качестве предварительной обработки поверхности материала использован тлеющий разряд с целью получения поверхностей с развитым строением. Усиление гидрофобности обработанной поверхности было осуществлено путем осаждения на нее фторполимерного покрытия методом *Hot Wire Chemical Vapor Deposition*. Полученные покрытия и их свойства смачивания испытаны на устойчивость путем обработки в ультразвуковом очистителе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 18-79-10119-П).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. И. Сафонов

УДК 544.032.65

Лазерная золото-индуцированная кристаллизация тонких пленок нестехиометрического оксида и аморфного кремния

Ф. А. Самохвалов[1,2], М. М. Васильев[1,2], Н. И. Смирнов[1,2], Я. Д. Титовец[3]

[1]Новосибирский государственный университет
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
[3]Беларуский государственный университет, Минск, Беларусь

Тонкопленочные поликристаллические полупроводниковые структуры — это основные материалы для современных технологий в таких областях, как микроэлектроника, наноэлектроника, оптоэлектроника, фотовольтаика. Одним из основных способов получения пленок поликристаллического кремния является термический отжиг пленок аморфного кремния, длительный процесс (~ 10 ч), требующий высоких температур (более 600 °C) и глубокого вакуума (так как кислород легко вступает в реакцию с нагретым кремнием). Для понижения температуры используется метод металл-индуцированной кристаллизации (МИК) [1]. Металл (алюминий, никель, золото и пр.), выступая катализатором кристаллизации, позволяет снизить ее на сотни градусов. МИК — длительный процесс (~ 10 ч). Альтернативным подходом является лазерно-индуцированная кристаллизация (ЛИК) [2]. К основным преимуществам ЛИК можно отнести высокую скорость процесса, возможность исключить глубокий вакуум. Однако локальность поглощения лазерного излучения приводит к неравномерной кристаллизации пленки. В данной работе впервые предлагается объединить преимущества методов ЛИК и МИК с использованием золота. Это позволит использовать подложки из дешевых легкоплавких материалов (пластик, стекло и т. д.) и ускорит процесс кристаллизации. В работе были установлены режимы лазерной обработки с использованием излучения наносекундной длительности, с длиной волны ИК-диапазона, обеспечивающие формирование кристаллической структуры. Обсуждается влияние кислорода на процесс кристаллизации пленок нестехиометрического оксида и аморфного кремния.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ (№ 20-58-04021).

1. Toko K., Suemasu T. Metal-induced layer exchange of group IV materials // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53, No. 37. P. 373002.
2. Bronnikov K. et al. Large-scale and localized laser crystallization of optically thick amorphous silicon films by near-IR femtosecond pulses // Materials. 2020. Vol. 13, No. 22. P. 5296.

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

УДК 536

Динамика испарения капель при испарении с бифильной поверхности в постоянном электрическом поле

Н. И. Смирнов

Новосибирский государственный университет

Испарение капель с различных структурированных поверхностей является актуальной задачей, которая широко исследуется и имеет множество технических приложений [1]. Также не остаются без внимания исследования в области влияния электрического поля на геометрию капли и скорость ее испарения [2]. Особый интерес представляют бифильные поверхности — сложно структурированные поверхности, имеющие резкий пространственный переход между участками с контрастными свойствами смачиваемости [3]. Подобные поверхности имеют большой потенциал в различных производственных приложениях, так как могут быть использованы для контролированного движения жидкостей, управляемого осаждения и интенсификации теплообмена. В настоящей работе проводилось исследование динамики испарения сидячих капель различных жидкостей с бифильной поверхности [4] в постоянном электрическом поле. Полученные данные позволят расширить представления о кинетике испарения капель при воздействии электрического поля.

1. Almohammadi H., Amirfazli A. Sessile drop evaporation under an electric field // Colloids Surf., A: Physicochem. Eng. Aspects. 2018. Vol. 555. P. 580–585.
2. Wang B. B., Wang X. D., Duan Y. Y., Chen M. Molecular dynamics simulation on evaporation of water and aqueous droplets in the presence of electric field // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. Vol. 73. P. 533–541.
3. Qi W., Weisensee P. B. Dynamic wetting and heat transfer during droplet impact on biphobic wettability-patterned surfaces // Phys. Fluids. 2020. Vol. 32.
4. Starinskaya E. et al. Evaporation dynamics of sessile and suspended almost-spherical droplets from a biphilic surface // Water. 2023. Vol. 15. P. 273.

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

УДК 533.21

Влияние ударных волн на фронт горения растительных горючих материалов

А. А. Старосельцева

Томский государственный университет

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия ударных волн на процессы горения. В качестве топлива использовались растительные горючие материалы. Ударная волна формировалась при помощи ударной трубы с различными насадками, где в качестве источника энергии применялись строительно-монтажные патроны марок Д1, Д2 и Д3. Для измерения давления на входе и перед насадкой была проведена тарировка датчиков давления типа ЛХ-415. Получены характеристики давления внутри ударной трубы для разных источников энергии и насадок. Воздействие ударной волны на фронт горения регистрировалось с применением методов инфракрасной термографии в средневолновом спектральном диапазоне с использованием узкополосных оптических фильтров. Выбор оптических фильтров производился с учетом спектров излучения пламени и рекомендаций [1].

Из полученных экспериментальных данных следует, что в результате воздействия ударной волны на газообразные продукты пиролиза РГМ наблюдается их детонация, которая приводит к последующему прекращению пламенного горения. При этом детонация продуктов пиролиза достигается при использовании всех трех типов зарядов, что говорит о том, что даже заряда с наименьшей энергией достаточно для достижения указанного эффекта.

1. Лобода Е. Л., Рейно В. В., Агафонцев М. В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. Е. Л. Лобода

УДК 536.7

Сжигание пропан-бутановой смеси в распылительном горелочном устройстве

М. А. Тарулин, Р. А. Гурьянов, И. М. Муравьев

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

Цель исследования — изучить влияние перегретого водяного пара на сжигание газообразного углеводородного топлива.

Для исследования тепловых и экологических характеристик сжигания газообразного топлива в присутствии перегретого водяного пара использовался экспериментальный огневой стенд ИТ СО РАН, который включает в себя автоматизированные системы подачи топлива, перегрева и подачи водяного пара, проточный калориметр, газоанализатор. Для получения перегретого пара использовался лабораторный электрический парогенератор. Расход воды для генерации пара задается плунжерным дозировочным насосом и контролируется с помощью электронных весов, на которые устанавливается бак с водой. На выходе из проточного калориметра регистрируется газовый состав продуктов сгорания, охлажденных до комнатной температуры.

Для проведения исследований использовался лабораторный образец атмосферного горелочного устройства мощностью до 20 кВт. Основными элементами горелочного устройства являются: основание, корпус (общая высота 140 мм, внешний диаметр 60 мм), выходное сопло (диаметр отверстия 25 мм), вмонтированная в центр основания паровая форсунка (диаметр отверстия 0,6 мм, угол раскрытия струи 17°), топливоподающая трубка. В нижней части корпуса горелочного устройства выполнены отверстия для естественного притока атмосферного воздуха из окружающей среды.

В качестве газообразного топлива использовалась пропан-бутановая смесь. Топливо подается через трубку с внутренним диаметром 4 мм вблизи основания струи распылителя — перегретого водяного пара или нагретого воздуха. Присутствие паров воды в зоне горения позволяет несколько снизить температуру, что приводит к уменьшению концентрации оксидов азота в продуктах сгорания, образующихся по термическому механизму. Также паровая газификация продуктов неполного сгорания и термического разложения топлива позволяет повысить степень выгорания углерода. Так, при подаче пара для газообразного топлива содержание CO и NO_x в продуктах сгорания снижается в 1,6 и 1,8 раза.

Научный руководитель — канд. техн. наук Е. П. Копьев

УДК 535.21

Синтез тонких пленок оксида германия методом наносекундной импульсной лазерной абляции германия в фоновом кислороде

Т. И. Харченко, Н. И. Смирнов

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

Синтез тонких пленок оксида германия является перспективным направлением для исследований. В частности, оксид германия с различной стехиометрией активно используется для таких приложений, как оптоэлектронные приборы, устройства энергонезависимой памяти и т. д. [1]. Свойства тонких пленок оксида германия во многом определяются их составом, поэтому важно контролировать процесс их синтеза, что ограничивает выбор методик осаждения. Одним из перспективных методов синтеза подобных материалов является импульсная лазерная абляция (ИЛА) [2]. К ключевым достоинствам ИЛА относят вариативность по отношению к выбору материалов мишени и подложки, высокую чистоту, а также возможность тонкого контроля процесса осаждения.

В данной работе облучение германия осуществлялось основной гармоникой твердотельного Nd:YAG лазера с длительностью импульса на полуширине 8 нс и Гауссовым профилем излучения. Пленки оксида германия были синтезированы путем ИЛА германия в атмосфере фонового кислорода. Для анализа образцов использовались FTIR, EDX и SEM анализы.

В ходе работы исследована наносекундная лазерная абляция германия в фоновом кислороде в широком диапазоне давлений. Получена зависимость толщины и степени окисления пленок оксида германия от давления фонового кислорода. Отработана методика контролируемого лазерного синтеза оксида германия с заданной стехиометрией. Проанализированы оптические свойства полученных пленок.

Работа выполнена благодаря гранту РНФ (№ 22-79-10079).

1. Марин Д. В. Оптические свойства нанокристаллов германия в пленках оксида германия: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 «Физика полупроводников». Новосибирск, 2013.
2. Bäuerle D. Laser Processing and Chemistry. Berlin; Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2011. 851 p.

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

УДК 536.25

Влияние набегающего потока нагретой жидкости на поле температуры в тонкой стенке

Е. А. Юровских[1,2], А. В. Михайлов[2]

[1]Новосибирский государственный университет
[2]Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

Большинство технических систем работает в нестационарных режимах нагрева и охлаждения стенок. Типичным примером являются тонкостенные конструкции летательных аппаратов (ЛА), которые должны обладать высокой прочностью и одновременно минимально возможным весом. ЛА и другая техника испытывают механические нагрузки при наличии термических напряжений. Для их оценок целесообразно провести физические экспериментальные исследования влияния конвективного теплообмена на поля температуры, градиентов температуры и термических напряжений в обтекаемых топливом стенках. Тонкостенные конструкции ЛА подвержены неравномерному прогреву из-за воздействия на них различных факторов: полетов на разных высотах, аэродинамического нагрева. Следствием является конвективный теплообмен в топливных баках. Для расчета прочности конструкций требуются знания о теплообмене между торцевыми вертикальными стенками, градиентах температуры, термических напряжениях, возникающих на стенках баков.

В данной работе исследовано развитие нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в прямоугольном баке, заполненном имитатором топлива — этиловым спиртом. Для возбуждения течения жидкости по одной из вертикальных стенок пропускался электрический ток. На разогреваемой стенке возникает восходящий поток жидкости, затем развивается течение на свободной поверхности слоя спирта. Течение в баке имеет тепловую гравитационно-капиллярную природу. Исследования проводились с использованием современного тепловизора FLIR x6530sc. С его помощью сняты поля температуры на свободной поверхности имитатора топлива и влияние набегающего потока горячей жидкости на поля температуры в противоположной тонкой металлической стенке бака. Для исследования гидродинамики течений проводилась видеосъемка течения жидкости с использованием добавки частиц-трассеров. В результате обработки тепловизионных фильмов были получены распределения температуры на свободной поверхности и на тонкой стенке в зависимости от времени и построены поля изотерм. Обработка видеосъемки позволила получить развития пограничных слоев на вертикальных стенках в прямоугольной полости, а также построить профили скорости в различные моменты времени.

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

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*, канд. физ.-мат. наук *В. М. Некрасов*, канд. физ.-мат. наук *Е. С. Ястребова*, канд. физ.-мат. наук *В. В. Яньшоле*, канд. физ.-мат. наук *Д. И. Строкотов*, канд. физ.-мат. наук *А. Г. Марьясов*, канд. физ.-мат. наук *Ю. И. Глазачев*, канд. физ.-мат. наук *А. Е. Москаленский*

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 *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. хим. наук *Е. А. Лосев*, канд. хим. наук *И. А. Туманов*, канд. геол.-минерал. наук *С. В. Ращенко*, *И. В. Яковлев, В. В. Никулин*

Экспертный совет подсекции «Химическая и биологическая физика»:
канд. физ.-мат. наук *В. П. Сырямина*, канд. физ.-мат. наук *Г. А. Летягин*, канд. физ.-мат. наук *А. М. Дмитрие*в, канд. физ.-мат. наук *А. Э. Художитков*, канд. физ.-мат. наук *В. М. Голышев*, канд. физ.-мат. наук *И. В. Жуков*, канд. хим. наук *Е. Д. Кадцын*

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*, Cand. Phys.-Math. Sci. *Yu. I. Glazachev*, Cand. Phys.-Math. Sci. *V. M. Nekrasov*, Cand. Phys.-Math. Sci. *E. S. Yastrebova*, Cand. Phys.-Math. Sci. *V. V. Yanshole*, Cand. Phys.-Math. Sci. *D. I. Strokotov*, Cand. Phys.-Math. Sci. *A. G. Maryasov*, Cand. Phys.-Math. Sci. *A. E. Moskalenskii*

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. *A. N. Shmakov*, Dr. Chem. Sci. *B. A. Zakharov*, Dr. Chem. Sci. *V. A. Sadykov*, Cand. Phys.-Math. Sci. *D. A. Yatsenko*, Cand. Phys.-Math. Sci. *S. N. Trukhan*, Cand. Chem. Sci. *O. A. Bulavchenko*, Cand. Chem. Sci. *S. G. Arkhipov*, Cand. Chem. Sci. *E. A. Losev*, Cand. Chem. Sci. *I. A. Tumanov*, Cand. Geol.-Mineral. Sci. *S. V. Rashchenko*, *I. V. Iakovlev*, *V. V. Nikulin*

Section scientific committee "Chemical and Biological Physics":
Cand. Phys.-Math. Sci. *V. P. Syriamina*, Cand. Phys.-Math. Sci. *G. A. Letyagin*, 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. Chem. Sci. *E. D. Kadtsyn*

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

УДК 577.359

Морфофункциональные особенности вестибулярного лабиринта крысы

М. Д. Акинина, В. А. Зайцев

Томский государственный университет

Вестибулярная система человека является важной сенсорной системой, отвечающей за обработку и передачу в головной мозг информации о положении тела и его перемещении в пространстве. Заполненные эндолимфой протоки полукружных каналов позволяют обнаруживать угловое ускорение за счет инерции жидкости по отношению к сенсорному эпителию, а динамика отолитовых органов основана на инерции отолитовой структуры, покрывающей сенсорный эпителий.

Знания о вестибулярной сенсорной системе и ее функциональном назначении значительно улучшились благодаря экспериментальным исследованиям с использованием различных видов позвоночных. В частности, знания, полученные после экспериментальных поражений полукружных каналов, отолитов и (или) их нервов с использованием различных животных моделей, оказались решающими для понимания видоспецифичных адаптаций эндоорганов и различий в их функциях в зависимости от образа жизни, экофизиологической ниши и двигательной динамики [1]. Например, наземные амниоты обычно испытывают стимуляцию с более высокими амплитудами по сравнению с видами земноводных. Также экспериментальными данными подтверждено, что, в то время как начало развития функции отолитов не зависит от размера животного, функциональность полукружных каналов критически зависит от их размеров.

В данной работе проведены анатомические исследования вестибулярного лабиринта крысы на основе микро-КТ-снимков высокого разрешения, а также проведено сравнение полученных данных с литературными данными человека. Показано, что морфология вестибулярного органа крысы не имеет существенных отличий, которые могли бы изменить физиологию вестибулярных функций. Замечены морфологические особенности в динамике смещения эндолимфы в разных полукружных каналах, которые будут проявляться в скорости реакции вестибулярной сенсорной системы на повороты головы относительно осей вращения, перпендикулярных плоскостям полукружных каналов и, соответственно, влиять на передаточную функцию вестибулярного органа и качество вестибулярных рефлексов.

Результаты работы подтверждают, что исследования на животных моделях эффективны для разработки новых методов лечения, лекарств и имплантатов для пациентов с вестибулярной дисфункцией.

1. Straka H., Zwergal A., Cullen K. E. Vestibular animal models: contributions to understanding physiology and disease // J. Neurology. Vol. 263. Suppl. 1. P. S10–S23. DOI: 10.1007/s00415-015-7909-y.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин

УДК 577

Изучение влияния экзогенного оксида азота на нейрональную активность с помощью фотоактивных доноров NO

Н.П. Байнаев-Мангилев

Новосибирский государственный университет

Оксид азота — важная сигнальная молекула, продуцируемая эндогенно, которая участвует во многих биохимических процессах, проходящих в организме. Этот мессенджер играет существенную роль в регуляции сосудистого и мышечного тонуса, апоптозе, ангиогенезе, активации тромбоцитов и других физиологических процессах. Также NO является одним из ключевых нейромедиаторов и участвует в нескольких типах синаптической пластичности. Недостаток или нарушение продукции NO может привести к развитию патологий нервной системы. Поэтому создание препаратов, способствующих восполнению NO в организме, является одним из подходов к лечению таких заболеваний. Применение фотоактивных препаратов, способных высвобождать NO локально, — один из перспективных методов терапии некоторых нейродегенеративных заболеваний. Важным шагом на пути к созданию таких препаратов является исследование влияния экзогенного NO на нейроны.

В данной работе мы исследовали влияние экзогенного NO на синаптическую пластичность пирамидных нейронов в поле CA1 гиппокампа мыши. Донором оксида азота выступает разработанное в нашей лаборатории фотоактивное соединение на основе красителя BODIPY (N-нитрозо-производное BODIPY), используемое в качестве поглощающей свет антенны (поглощает свет в области 520 нм). В качестве источника света используется светодиод с длиной волны излучения 520 нм, установленный над регистрационной камерой.

В ходе работы с помощью флуоресцентной метки DAR-2 был исследован процесс распада фотодонора в водном растворе под действием света, в результате чего было зарегистрировано образование NO, построена кинетическая модель распада и оценен выход NO. Эксперименты по изучению воздействия экзогенного NO на нейроны проводились на срезах гиппокампа двухмесячных самцов мышей линии ICR, толщиной 300 мкм. Стимуляция пирамидных нейронов поля CA1 и регистрация вызванных потенциалов действия производились с помощью стеклянных внеклеточных микроэлекродов, заполненных солевым раствором. Также были проведены серии экспериментов с добавлением донора NO к срезам и облучением их светом с использованием разных концентраций донора и разных протоколов стимуляции для выявления зависимости влияния концентрации NO на нейроны.

Научные руководители —
канд. хим. наук Т.Ю. Карогодина, С.О. Вечкапова, д-р биол. наук А.С. Ратушняк

УДК 620.3

Влияние ультрафиолетового излучения на формирование наночастиц на основе альбумина

А. И. Богомолова

Новосибирский государственный университет

Наночастица — отдельный твердофазный объект размерами от 1 до 100 нм (в одном-двух измерениях), имеющий отчетливую границу с окружающей средой. Наночастицы (НЧ) находят применение в разных отраслях науки и производства. Особый интерес представляет разработка лекарственных препаратов на основе НЧ. Многие препараты, обладая высокой специфической эффективностью, неспособны проникать в клетки и ткани организма, а также плохо растворимы и нестабильны в биологических средах и имеют побочные эффекты. Наноносители таких препаратов, в частности, ограничивают их непосредственный контакт с кровью, снижая токсичность. Наноносители могут нести «нацеливающие» молекулы, способные обеспечить попадание препарата в определенные клетки и ограничить его проникновение в «нормальные».

Альбумин сыворотки крови человека нетоксичен, биосовместим и биоразлагаем, что определяет его пригодность для получения наноносителей.

Цель работы — изучить формирование НЧ альбумина под влиянием ультрафиолетового излучения (УФО) и влияние заряда модельного «лекарственного» препарата на физико-химические свойства финальной наноструктуры. Структуру нанообъектов и их физические размеры изучали на просвечивающем электронном микроскопе Jem 1400 (Джеол, Япония) после негативного контрастирования 0,5%-м раствором уранила ацетата. Препараты также исследовали методом динамического рассеяния света.

Молекулы альбумина в исходной суспензии наблюдаются в виде «точек» размером 2–4 нм. Описаны формирование и структура НЧ альбумина и «побочных» продуктов сборки НЧ при воздействии УФО, определена оптимальная для получения обособленных НЧ продолжительность облучения, установлены оптимальные параметры разводящей жидкости. Выбраны условия, обеспечивающие получение максимально однородной суспензии сферических НЧ альбумина (диаметр около 100 нм). Исследовано влияние включения в состав НЧ альбумина модельных «лекарственных» препаратов с положительным и отрицательным зарядом на физико-химические свойства финальных нанообъектов, определены оптимальные параметры их получения.

Научный руководитель — д-р биол. наук, проф. Е. И. Рябчикова

УДК 004.3

Измерение абсолютного значения интенсивности падающего света разработанного спектрометра ближней инфракрасной спектроскопии

Д. А. Буянов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва
Медицинские компьютерные системы, Москва

В данной работе была поставлена задача определить интенсивность падающего света у разработанного спектрометра ближней инфракрасной спектроскопии NIRS4 (ООО «Медицинские компьютерные системы», Россия), входящего в состав аппаратно-программного комплекса для определения анаэробного порога [1].

Для измерения абсолютных значений интенсивности падающего света I_0^{770}, I_0^{850} был проведен эксперимент (при Current = 100 % и Gain = 10 %): излучение светодиодов собиралось при помощи оптоволокна M35L02 (Thorlabs Inc., США, d = 1000 μm, 0,39 NA) и подавалось на фотоприемник. Излучение с длинами волн 770 и 850 нм проходило через ослабляющий фильтр FEL0900 (Thorlabs Inc., США) с оптической плотностью D = 7. Фильтр был подобран таким образом, чтобы после ослабления излучение попадало в диапазон чувствительности фотоприемника.

Результаты измерения абсолютных значений интенсивности падающего света составили 221673 ± 190 усл. ед. для I_0^{770} и 455104 ± 165 усл. ед. для I_0^{850}. При расчете учтено ослабление излучения при прохождении через оптоволокно. Ранее было экспериментально установлено, что для используемого в данном эксперименте оптоволокна выходная мощность уменьшается на 13,8 %. Также путем регистрации интенсивности при разных значениях параметра Gain было установлено, что зависимость регистрируемой интенсивности от параметра является линейной.

1. Buyanov D. A., Shalaev P. V., Zabodaev S. V., Gerasimenko A. Yu. An Algorithm for Measuring Absolute and Relative Hemoglobin Concentrations Using Near Infrared Spectroscopy // Biomed. Eng. 2022. Vol. 56, № 3. P. 176–179.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. В. Селищев

УДК 53.087

Влияние астигматизма на результаты тестирования вестибуло-окулярного рефлекса

В. А. Зайцев, А. С. Шаленов

Томский государственный университет

Астигматизм — это часто встречающаяся аномалия рефракции, на долю которой приходится около 40 % от всех нарушений рефракции человеческого глаза [1]. Астигматизм может возникнуть либо из-за асимметрии оптических поверхностей глаза, либо из-за того, что наблюдаемое изображение находится за пределами центральной ямки сетчатки глаза [2].

Поскольку астигматизм зачастую сопровождается нистагмом [3], его наличие может искажать результаты тестов вестибуло-окулярного рефлекса (ВОР), проводимых для оценки функций полукружных каналов и отолитовых органов [4].

В работе был проведен тест импульса головы [4] с использованием системы видеоокулографии на двух добровольцах в возрасте 21 года и 27 лет с отсутствием вестибулярной дисфункции. Первый доброволец не имел астигматизма, у второго присутствовал астигматизм правого глаза величиной в 0,75 диоптрии.

Для статистической обработки результатов теста импульса головы была составлена программа на языке программирования R [5]. Построен доверительный интервал гейнов ВОР, полученных при тестировании каждого добровольца. Сравнение результатов теста проводилось с помощью т-теста Байеса.

Показано, что при стимуляции справа налево гейны у добровольца с астигматизмом занижены и статистически значимо отличаются от результатов здорового добровольца. Таким образом, можно предположить, что наличие астигматизма приводит к искажению результатов тестирования вестибулярной функции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 23-25-00259, https://rscf.ru/project/23-25-00259/).

1. Hashemi H., Fotouhi A., Yekta A. et al. Global and regional estimates of prevalence of refractive errors: Systematic review and meta-analysis // J. Curr. Ophthalmology. 2018. Vol. 30, is. 1. P. 3–22.
2. Borish I. M. Clinical Refraction. N. Y.: Elsevier, 2006.
3. Scott R. A., Collins M. J., Carney L. G. A review of astigmatism and its possible genesis // Clin. Exp. Optometry. 2006. Vol. 90, is. 1. P. 5–19.
4. Halmagyi G. M., Chen L., MacDougall H. G. et al. The Video Head Impulse Test // Front. Neurology. 2017. Vol. 8. P. 1–23.
5. The R project for statistical computing. URL: https://www.r-project.org/.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин

УДК 577.323.24

Контроль геометрии и молекулярности РНК-комплексов с использованием коротких олигонуклеотидов

М. А. Канарская

Новосибирский государственный университет
Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск

Ранее в ИХБФМ СО РАН были детально исследованы самоограниченные комплексы, сформированные парой олигодезоксирибонуклеотидов, которые имеют два попарно-комплементарных участка, между которыми в каждой последовательности введен гибкий линкер. Опенер — короткая последовательность НК, комплементарная одному из фрагментов одной из цепей самоограниченного комплекса. В результате взаимодействия такого комплекса и опенера циклический комплекс может разворачиваться, образуя линейную незамкнутую форму. Стоппер — короткая последовательность НК, комплементарная опенеру. При добавлении стоппера к раскрытому опенером комплексу последний должен вновь замкнуться.

Цель данной работы — исследование возможности контроля формы и размера комплексов РНК за счет взаимодействия с РНК-опенером и РНК-стоппером.

Объектом исследования являются РНК-олигонуклеотиды, состоящие из 10 звеньев, соединенных нуклеотидным линкером различной длины. В качестве опенера и стоппера были взяты последовательности с дополнительными участками из 5 и 10 нуклеотидов. Методом термической денатурации с оптической регистрацией сигнала исследована термостабильность комплексов. Для анализа и подтверждения структуры использован метод гель-электрофореза в нативных условиях.

Исследование взаимодействия комплекса с опенером и стоппером, длина нависания которых 5 нуклеотидов, показало, что открытые опенером самоограниченные комплексы не сворачиваются обратно при взаимодействии со стоппером, что противоречит выдвинутому предположению. Вероятно, выбранные опенер и стоппер не удовлетворяют предложенной термодинамической модели. По этой причине были выбраны новые удлиненные последовательности. По данным термической денатурации, комплексы с удлиненными стоппером и опенером более термостабильны. Электрофоретический анализ показал, что при добавлении опенера комплекс раскрывается в линейную форму, а при добавлении стоппера возвращается в исходное состояние. Таким образом, было показано, что добавление определенных последовательностей НК к самоогарниченным комплексам позволяет направленно изменять их молекулярность и геометрию.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ (№ 20-04-00719) и в рамках государственного задания ИХБФМ СО РАН (№ 121112900217-3).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Ломзов

УДК 576.32/.36

Сравнительный анализ алгоритмов нечеткого вывода в оценке гемостатического потенциала

А. В. Косенко, А. О. Цибулина

Томский государственный университет

При оценке гемостатического потенциала (ГП) решающая роль принадлежит «глобальным» тестам, которые дают целостное представление о системе гемостаза и позволяют осуществлять комплексный мониторинг биохимических процессов свертывания крови *ex tempore*. Среди них особую значимость приобретает тест НПТЭГ (низкочастотная пьезотромбоэластография), где используется только нативная кровь и который позволяет получать информацию обо всех фазах гемокоагуляции по ее результирующей наработке фибрина [1]. Основой НПТЭГ является оценка ГП нативной крови по изменению ее вязкоупругих характеристик вследствие механического воздействия и анализ возникающих сдвиговых деформаций, получаемых с помощью ультразвуковых диагностических сканеров.

Однако часто диагностика ГП бывает затруднена. В большинстве случаев различия между коагулографическими данными, соответствующими разным клиническим ситуациям, являются нечеткими, более того, семейства коагулограмм, относящихся к различным клиническим ситуациям, перекрываются между собой.

Решением этой проблемы стало применение нечеткой логики для определения нарушений гемостатического потенциала с использованием данных, полученных методом НПТЭГ.

При разработке нечеткой модели в качестве входных данных были выбраны следующие параметры: концентрация фибриногена, концентрация протромбина, время начала генерации тромбина, время достижения максимальной активности тромбина, протромбиновая активность, время наработки тромбина. Параметры объединены в базу правил, описывающую принадлежность входных параметров к установлению выходного параметра — гемостатического потенциала, который может быть низким, средним или высоким. В зависимости от формирования базы правил и проведения процедуры дефаззификации формирование нечеткого вывода может проводиться с использованием различных алгоритмов. В данной работе рассмотрены модели *Mamdani* и *Sugeno* в приложении к задаче оценки гемостатического потенциала. Определены преимущества и недостатки использования этих моделей для решения поставленной задачи.

1. Тютрин И. И., Удут В. В. Низкочастотная пьезотромбоэластография цельной крови: алгоритмы диагностики и коррекции гемостазиологических расстройств. Томск: Изд. дом Том. гос. ун-та, 2016. 170 с.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин

УДК 543.423.1

Изучение биораспределения бора после внутриопухолевого введения борсодержащих наночастиц методом АЭС ИСП

К. С. Кузьмина

Новосибирский государственный университет

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) — бинарная форма лучевой терапии, основанная на селективном уничтожении клеток злокачественных опухолей, таких как глиобластома. Основным принципом БНЗТ является избирательное уничтожение только тех клеток, которые содержат достаточное количество изотопа бора-10. По этой причине проведение исследований по биораспределению борсодержащего препарата является важным этапом в планировании проведения БНЗТ.

Цель исследования — определить концентрацию бора в органах и тканях при внутриопухолевом введении наночастиц элементного бора иммунодефицитным мышам SCID с гетеротопическим ксенотрансплантатом глиобластомы человека U87. В исследовании был использован бор с натуральным содержанием изотопов: 20 % бор-10, 80 % бор-11.

Наночастицы элементного бора однократно вводили животным в опухолевый очаг. Объем введения рассчитывался в зависимости от объема опухоли для достижения концентрации 40 мкг/г в опухолевом очаге. Через 30 и 90 мин после введения наночастиц осуществляли запланированную эвтаназию животных и забор органов и тканей. Пробоподготовку проводили при помощи кислотного разложения при повышенных температурах. Концентрацию бора измеряли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Концентрация бора в опухоли через 30 мин после введения составила 56 мкг/г, через 90 мин — 82 мкг/г. Концентрация бора-10 в крови была значительно меньше и составила 4 и 3,5 мкг/мл через 30 и 90 мин соответственно. Накопление бора в коже было на уровне фонового значения. Достигнутого содержания бора в опухоли достаточно для успешного проведения БНЗТ в случае обогащения бора изотопом бор-10.

Научный руководитель — А. И. Касатова

УДК 577.354.9, 616.28-008.55

Моделирование течения биологической жидкости в полукружных каналах внутреннего уха человека

А. Ю. Лирмак, В. А. Зайцев

Томский государственный университет

Около 0,3 % населения мира страдает от потери вестибулярной функции, что соответствует распространенности глухих людей — 0,4 % [1]. Это расстройство, так же как и слепота или глухота, значительно влияет на качество жизни и работоспособность. Ведущим симптомом в клинической картине у взрослых с вестибулярными нарушениями является головокружение [2].

Полукружные каналы, заполненные эндолимфой, являются структурной частью вестибулярной системы человека, отвечающей за важную функцию восприятия углового ускорения головы.

Данное исследование направлено на оценку роли полукружных каналов в нарушении вестибулярной функции и их влияния на восстановление вестибулярных рефлексов. В работе проводится моделирование течения жидкости в полукружном канале и расчет давления на переднюю стенку куполы во время поворота головы на основе метода конечных элементов. Создана идеализированная геометрическая модель участка полукружного канала, отражающая распределение скоростей и давления в каждой точке в зависимости от положения куполы в канале. Описаны физико-математические свойства модели в состоянии покоя головы.

Было показано, что разные полукружные каналы имеют схожие размеры, что позволяет нам рассматривать идеализированные модели полукружных каналов вместо реальных. Установлено, что ключевыми параметрами модели являются динамическая вязкость среды и угловая скорость вращения канала, которая имитирует вращение головы.

Дальнейшее развитие математической модели с учетом симуляции поворота головы позволит применять данную модель на практике для расчета величины давления и скорости, которая связана с реакцией организма человека на изменение положения тела.

1. Guinand N., Boselie F., Guyot J.-P. P., Kingma H. Quality of life of patients with bilateral vestibulopathy // Ann. Otology, Rhinology Laryngology. 2012. Vol. 121 (7). P. 471–477.
2. Jahn K., Kressig R. W., Bridenbaugh S. A. et al. Dizziness and Unstable Gait in Old Age: Etiology, Diagnosis and Treatment // Dtsch Arztebl Int. 2015. Vol. 112 (23). P. 387–393. DOI: 10.3238/arztebl.2015.0387.

Научные руководители —
д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин, канд. биол. наук М. В. Светлик

УДК 577

Кинетическая модель взаимодействия хиломикронов с липопротеинлипазой

Д. А. Ненашева

Новосибирский государственный университет

Атеросклероз считается многофакторным заболеванием, и на данный момент нет единого мнения о причинах его возникновения. Именно поэтому важно учитывать все возможные факторы риска развития этого заболевания. Одним из индикаторов является повышенный уровень хиломикронов (ХМ) в крови. Для более глубокого понимания механизма развития болезни необходимо расширить знания о процессах, в которых участвуют ХМ в организме человека.

Одним из способов ранней диагностики атеросклероза является метод сканирующей проточной цитометрии (СПЦ). В основе работы этого метода лежит измерение зависимости интенсивности рассеянного частицей света от полярного угла рассеяния. Эта зависимость обуславливается размером и показателем преломления частицы. СПЦ применяется для исследования сферических частиц, таких как ХМ, поскольку информация о морфологии, размере и показателе преломления является не менее ценной, чем химический состав объекта. В то время как большинство методов исследования ХМ являются качественными, именно СПЦ позволяет отследить кинетику ХМ в крови.

Целью данной работы было математическое описание одного из этапов метаболизма ХМ: гидролиза ХМ липопротеинлипазой (ЛПЛ). Динамика изменения морфологии ХМ в этом эксперименте отслеживалась на основе данных диагностики крови условно здорового донора методом СПЦ.

В результате представлена модель взаимодействия ХМ и ЛПЛ, а также формула зависимости концентрации ХМ в крови от времени. Таким образом, в ходе работы удалось углубить знания о процессах, в которых участвуют ХМ, а именно о процессе расщепления ХМ ферментом ЛПЛ. Это позволит не только прогнозировать риск развития атеросклероза по единичному анализу крови, но и совершенствовать его лекарственную терапию.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Д. И. Строкотов

УДК 544.4

Исследование ХПЯ в зависимости от концентрации изомеров диад напроксен-триптофан

И. А. Пушкин

Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

Известно, что многие биологически значимые процессы в организме протекают зависимо от хиральной формы реагента. Изучение переноса электрона в таких системах может выявить возможный механизм, в котором реализуется разница в селективности химической активности таких молекул. Напроксен — нестероидное противовоспалительное средство, широко используемое в медицине. При этом известно, что его S- и R-изомеры оказывают разное воздействие на организм.

Метод химической поляризация ядер (ХПЯ) хорошо зарекомендовал себя при изучении процессов, включающих короткоживущие радикальные интермедиаты, которые образуются в результате реакции переноса электрона.

В ходе данной работы изучались явления спиновой селективности (различие в коэффициентах усиления ХПЯ систем с разной оптической конфигурацией) при внутримолекулярном переносе электрона в диаде напроксена с триптофаном в растворах.

При облучении раствора УФ-лазером (λ = 308 nm) в диаде происходит внутримолекулярный перенос электрона с образованием бирадикал-цвиттериона и последующим обратным переносом электрона с образованием поляризованной диады.

В ходе работы было показано, что коэффициенты ХПЯ для (S,R-) диастереомера диады вдвое больше, чем для (S,S-) аналога. Это может говорить о различиях как в скорости переноса электрона, так и в распределении констант СТВ в промежуточных бирадикал-цвиттерионах для диастереомеров [1].

Также было обнаружено, что соотношение коэффициентов усиления ХПЯ у диастереомеров изменяется в зависимости от соотношения их концентраций. Это указывает на то, что диастереомеры в растворах вступают друг с другом в ассоциации. Ранее было показано [2], что в результате таких взаимодействий образуются димеры. Это могут быть пары диастереомеров с одинаковой или различной оптической конфигурацией: гомо- или гетеродимеры.

Такое поведение зависимости от концентрации удалось описать в модели, где коэффициенты усиления ХПЯ в гомо- и гетеродимерах различаются.

1. Ageeva A. A. et al. Role of association in chiral catalysis: From asymmetric synthesis to spin selectivity // Chem. Eur. J. 2018. Vol. 24, № 70. P. 18587–18600.

2. Ageeva A. A. et al. Spin selectivity in chiral linked systems // Chem. Eur. J. 2018. Vol. 24, № 15. P. 3882–3892.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук И. М. Магин

УДК 577

Исследование активации тромбоцитов под действием локализованного стимула

Э. С. Стародубцева

Новосибирский государственный университет

Тромбоциты — безъядерные компоненты крови с характерным размером 2–3 мкм, играющие роль в широком спектре биологических процессов, таких как коагуляция, ангиогенез и иммунорегуляция. Особый интерес представляет их участие в процессе первичного гемостаза, во время которого клетки проходят три основные последовательные стадии: активацию, агрегацию и адгезию. Исследование данных процессов с физической точки зрения является актуальной и перспективной задачей биофизики.

Среди современных методов оценки функциональности тромбоцитов можно выделить агрегометрию, основанную на измерении интенсивности света, прошедшего через суспензию клеток, а также метод проточной цитометрии, отличающийся точностью и простотой интерпретации полученных данных. Однако данные методы не позволяют детально исследовать механизмы взаимодействия клеток друг с другом, а также отклики на локальные возмущения среды.

В работе в качестве метода оценки активации тромбоцитов использована флуоресцентная микроскопия. Главными преимуществами данного способа являются возможность наблюдать за биологическими процессами в динамике при характерных пространственных масштабах порядка размера исследуемых клеток, а также достаточное для анализа полученных данных соотношение сигнала к шуму.

Цель данной работы — исследование механизмов и закономерностей распространения активации тромбоцитов за счет диффузии вещества-активатора АДФ. В проведенном эксперименте использована его модификация caged ADP — АДФ с фотолабильной защитной группой, отделяющейся при воздействии УФ-излучения, что позволяет провоцировать начало активации в ограниченном объеме за счет использования узконаправленного лазерного пучка. Для обработки полученных данных разработан алгоритм численного моделирования сигнала ансамбля клеток по интересующей области, концентрически расположенной относительно лазерного пятна. Предложенный алгоритм учитывает простейшую кинетическую модель, описывающую изменение внутриклеточной концентрации ионов кальция, а также уравнение диффузии АДФ при начальном гауссовом распределении. В результате работы определены закономерности распространения активации и параметры, характеризующие процесс активации тромбоцитов.

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

УДК 004.891

Оценка гемодинамической значимости тандемных стенозов в бифуркациях коронарных сосудов методом локальной гемодинамики

А. Т. Суюндукова

Томский государственный университет

Ишемическая болезнь сердца обусловлена атеросклерозом коронарных артерий (КА), который ограничивает кровоток к сердечной мышце и может привести к тяжелым последствиям, в том числе к летальному исходу. Гемодинамические факторы, такие как разделение и рециркуляция потока и низкое колебательное напряжение сдвига стенки, играют важную роль в локализации и прогрессии атеросклероза. В коронарной ангиопластике наиболее сложными и частыми случаями являются поражения КА в области их бифуркаций. Лечение этого поражения связано с низкой процедурной эффективностью, высокой частотой осложнений и рестенозов [1, 2].

Современным методом оценки ишемии миокарда является определение фракционного резерва кровотока (ФРК) по данным компьютерно-томографической коронарной ангиографии (КТКАГ) [3]. Метод демонстрирует высокую информативность и позволяет с высокой точностью идентифицировать гемодинамически значимые стенозы [3, 4]. Однако в клинической практике метод используется недостаточно широко в связи с высокой стоимостью, а анализ КТКАГ проводит только фирма *HeartFlow Inc* [5]. В связи с этим разработка альтернативных решений для оценки ФРК для выявления значимых стенозов КА по данным КТКАГ является актуальной задачей.

В работе рассмотрена 3D-модель локальной гемодинамики коронарных сосудов и предложен метод вычисления коронарного кровотока для оперативной диагностики пациентов с атеросклеротическим бифуркационным поражением КА. Проведен вычислительный эксперимент по определению гемодинамической значимости кровотока для тандемных стенозов различного типа в бифуркации левой КА для различных значений вязкости крови.

Представленный в данной работе метод расчета коронарного кровотока и ФРК позволяет оперативно провести персонифицированную оценку значимости стеноза для принятия врачебного решения.

1. Bon-Kwon Koo, Hyun-Jai Kang, Tae-Jin Youn et al. Physiologic assessment of jailed side branch lesions using fractional flow reserve // J. Am. College Cardiology. 2005. Vol. 46, № 4. P. 633–637.

2. Хелимский Д. А., Бадоян А. Г., Эралиев Т. К. и др. Особенности локальной гемодинамики и формирования атеросклеротического поражения в бифуркациях коронарных артерий // Рос. кардиол. журн. 2020. Т. 25, № 5. С. 106–113.

3. Мочула А. В., Мальцева А. Н., Шипулин В. В. и др. Оценка миокардиального кровотока и резерва — физиологические основы и клиническое значение перфузионной

сцинтиграфии в обследовании пациентов с хроническим коронарным синдромом // Рос. кардиол. журн. 2020. Т. 25, № 2. С. 74–80.
4. Doukas D., Allen S., Wozniak A., et al. Relationship of stress test findings to anatomic or functional extent of coronary artery disease assessed by coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve // Biomed. Res. Int. 2021. Vol. 2021. P. 6674144.
5. Rabbat M., Leipsic J., Bax J. et al. // J. Am. Coll. Cardiol. 2013. Vol. 61 (22). P. 2233–41.

Научные руководители —
д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Демкин, д-р мед. наук К. В. Завадовский

УДК 577

Исследование применимости окулярных тканей приматов для изучения офтальмологических заболеваний человека

М. В. Фоменко

Новосибирский государственный университет

Важной проблемой при исследовании офтальмологических заболеваний является малая доступность образцов окулярных тканей человека, обусловленная этическими ограничениями. По этой причине в исследованиях часто используют окулярные ткани экспериментальных животных, чаще всего мышей. Однако в ряде работ было продемонстрировано, что метаболизм в окулярных тканях крыс и мышей сильно отличается от человеческого. Наиболее генетически близкими к человеку животными являются приматы, в связи с этим в данной работе мы проводили количественное сравнение окулярных тканей Яванского макака и человека.

Окулярные ткани (хрусталик, водянистая влага (ВВ) и стекловидное тело) были взяты у макак посмертно (не более 15 мин), образцы крови получали как посмертно, так и от живых особей. На первом этапе провели сравнение метаболомного состава живой и посмертной плазмы крови и показали, что посмертные процессы привели к умеренным изменениям концентраций только нескольких метаболитов. Следовательно, можно предположить, что концентрации метаболитов окулярных тканей макаков также близки к прижизненным параметрам. Метаболомный состав ВВ близок к составу сыворотки с одним важным исключением: концентрация аскорбата в ВВ намного выше, чем в крови. Это свидетельствует о принудительной накачке аскорбата из крови в ВВ посредством специальных транспортеров.

Принципиальной особенностью метаболома хрусталика являются высокие концентрации целого ряда клеточных метаболитов — антиоксидантов (глутатион), осмолитов (мио-инозитол), УФ-фильтров (кинуренин), пуриновых оснований (НАД, АТФ). Концентрации большинства аминокислот в хрусталике значительно выше, чем в водянистой влаге. Вероятно, в эпителиальном слое хрусталика происходит накачка аминокислот против градиента концентрации в хрусталик для их дальнейшего использования при синтезе кристаллинов.

Сравнительный анализ плазмы и окулярных тканей макака и человека показал, что на качественном уровне метаболомные составы тканей человека и макака очень близки, хотя по ряду метаболитов наблюдаются заметные количественные различия. Таким образом, в результате проделанной работы было показано, что Яванский макак является подходящей моделью для проведения исследований механизмов офтальмологических заболеваний человека.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. Ю. П. Центалович

УДК 615.8

Анализ клинического применения методов гипофракционирования и этапной радиохирургии для лечения метастазов в головном мозге

А. В. Шиленко

Новосибирский государственный университет
ЛДЦ «Медицинский институт им. Сергея Березина», Новосибирск

Стереотаксическую лучевую терапию в режиме гипофракционирования (HF) обычно применяют для лечения пациентов с метастазами в головном мозге (МГМ), прилегающими к критическим структурам и имеющими диаметр более 3 см. Метод HF известен в рамках лучевой терапии с конца 1990-х гг. [1] и заключается в подведении небольших доз ионизирующего излучения (ИИ) к очагу за несколько фракций [2]. Однако в последние годы активно применяют этапную радиохирургию (ST), отличительной особенностью которой является временной интервал подведения небольших доз ИИ, который составляет от 1 до 4 недель [3]. В связи с этим представляет интерес оценка результатов лечения МГМ методами HF и ST, а также проведение сравнительного анализа. В исследование включили 75 пациентов с метастазами в головном мозге (92 очага), которых распределили на две группы по методу лечения на гамма-ноже в ЛДЦ МИБС.

С помощью критерия Фишера показано значимое различие методов (Fрасч = 13,6 > > Fкрит = 1,3). Медиана общей выживаемости для этапной радиохирургии составила 45 %, для гипофракционирования — 43 %. Лучевые реакции в три раза чаще фиксировали у пациентов из группы HF (29 % очагов, при подведенной дозе 3 × 8 Гр; в группе ST 10 % очагов, при дозе 2 × 12 Гр и 3 × 10 Гр). Продолженный рост в группе ST составил 3 %, что в 6 раз меньше, чем в группе HF. В результате статистического анализа установлено значимое влияние количества новых МГМ после лечения и нейрохирургического вмешательства до гамма-ножа. Однофакторный анализ показал также влияние возраста и суммарной очаговой дозы на ОВ, многофакторный — влияние облучения всего головного мозга до гамма-ножа.

1. Le Q. T., Tate D., Koong A. et al. Improved local control with stereotactic radiosurgical boost in patients with nasopharyngeal carcinoma // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2003 Jul 15. Vol. 56 (4). P. 1046–1054.
1. Kwon A. K., Dibiase S. J. et al. Hypofractionated stereotactic radiotherapy for the treatment of brain metastases // Cancer. 2009 Feb 15. Vol. 115 (4). P. 890–898.
2. Осинов И. К., Голанов А. В. и др. Стажированная радиохирургия в лечении пациентов с метастатическим поражением головного мозга // Нейрохирургия. 2021. Т. 23 (1). С. 26–37.

Научный руководитель — канд. техн. наук К. О. Ставицкая

УДК 577

Разработка аналитической модели формы нативного эритроцита

Шэнь Сычжоу

Новосибирский государственный университет

Исследование эритроцитов занимает центральное место в клиническом анализе крови. Будучи самой многочисленной клеткой крови в организме человека, эритроцит выполняет транспортную, иммунологическую и гемостатическую функции. Эритроциты — это эластичные клетки в форме двояковогнутого диска со средним диаметром около 7,5 мкм и толщиной 2 мкм. Высокая эластичность клеток позволяет им проходить через узкие капилляры и выполнять свои функции в труднодоступных местах.

Для проведения биомедицинских исследований важно знать корректную аналитическую модель формы эритроцита. Существует модель на основе минимума энергии деформации поверхности (МЭДП) [1], однако этот метод предполагает длительные вычисления и характеризуется неоднозначностью. В настоящее время наибольшее применение получили следующие аналитические модели формы нативных эритроцитов: эллиптическое уравнение Кассини, уравнение Борового [2], уравнение Фанга [3] и расширенная модель Фанга (РМФ) порядка N [4]. Сравнение данных моделей с результатами, полученными на основе МЭДП, показало, что РМФ 5-го порядка является лучшей из перечисленных.

Однако более важным является вопрос корректности модели с точки зрения решений обратной задачи (близости сигналов светорассеяния от каждой из моделей к экспериментальным оптическим сигналам). Для каждой модели были рассчитаны базы данных сигналов светорассеяния (содержащие также соответствующие параметры моделей). Профили интенсивности светорассеяния получены с использованием метода дискретных диполей. Профили интенсивности светорассеяния нативных эритроцитов были измерены на сканирующем проточном цитометре. Сравнение экспериментальных сигналов светорассеяния с расчетными сигналами для каждой модели показало возможность найти оптимальную аналитическую модель формы эритроцита.

1. Deuling H. J., Helfrich W. The curvature elasticity of fluid membranes: A catalogue of vesicle shapes. URL: http://dx.doi.org/10.1051/jphys:0197600370110133500.
2. Borovoi A. G., Edward I. N., Oppel U. G. Scattering of light by a red blood cell. URL: https://doi.org/10.1117/1.429883.
3. Evans E., Fung Y. C. Improved measurements of the erythrocyte geometry. URL: https://doi.org/10.1016/0026-2862(72)90069-6.
4. Гилев К. В. Развитие метода численного решения обратной задачи. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01006663337.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. В. П. Мальцев

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

УДК 543.424.2

Основные механизмы плазмонных фотореакций

А. А. Аверкиев, Р. Д. Родригес, Е. С. Шеремет

Томский политехнический университет

Современные исследования показывают, что плазмонные наноструктуры могут катализировать энергоемкие реакции [1]. При плазмонных фотореакциях (фотокатализе) происходит облучение светом определенной длины волны. Энергия фотонов, возбуждающих локализованный поверхностный плазмонный резонанс, передается молекулам, что приводит к образованию или разрыву химических связей. В результате рассеяния энергии плазмона происходит выделение тепла и появляются «горячие» носители заряда, что позволяет металлическим наночастицам выступать в качестве фототермических и фотоэлектрических преобразователей. В настоящее время в области исследования плазмонного фотокатализа продолжается дискуссия о важности фототермических и электронных эффектов [2].

Среди нескольких исследованных фотореакций преобразование нитросоединений в аминогруппы может считаться стандартной системой в изучении плазмонного фотокатализа. Несмотря на последние достижения в данной области, условия, необходимые для преобразования нитробензолтиола (4-НБТ) в димеркаптоазобензол, все еще исследуются. С помощью методов гигантской спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света и его модификации с усилением зонда нами было обнаружено, что фототермический нагрев играет ключевую роль в плазмонном фотокатализе, от микро- до наномасштаба. Фототермический нагрев был дополнительно изучен с помощью метода КР-термометрии, который показал увеличение локальной температуры до 111 °C вблизи золотых наночастиц по сравнению с областью без наночастиц.

Полученные результаты обеспечивают глубокое понимание основных механизмов в плазмонном фотокатализе и дают представление о его возможных применениях в областях энергетики.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ и DFG (№ 21-53-12045).

1. Verma P. et al. New insights in establishing the structure-property relations of novel plasmonic nanostructures for clean energy applications // Energy Chem. Elsevier BV. 2022. Vol. 4, № 1. P. 100070.
2. Dubi Y. et al. Distinguishing thermal from non-thermal contributions to plasmonic hydrodefluorination // Nat. Catal. Springer Sci. Business Media LLC. 2022. Vol. 5, № 4. P. 244–246.

Научный руководитель — Ph.D, проф. Родригес Контрерас Рауль Давид

УДК 542.8

Особенности фотоэлектронных спектров кобальта и оксидов кобальта

Е. Е. Айдаков

Новосибирский государственный университет
Институт катализа СО РАН, Новосибирск

Определение степени окисления и химического окружения кобальта имеет важное значение при исследовании систем на его основе. Одним из методов, позволяющих исследовать состояние поверхности, является рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Однако фотоэлектронные спектры кобальта имеют сложную структуру, в частности, фотоэлектронный спектр кобальта Co2p вследствие спин-орбитального расщепления представляет собой дублет. Более того, положение энергии связи пика Co2p зависит от зарядового состояния катиона кобальта, а наличие и интенсивность соответствующих основному пику рентгеновских сателлитов — от локального окружения катионов кобальта. Такая сложная структура в некоторых случаях приводит к неоднозначной интерпретации получаемых экспериментальных данных, особенно в случае наличия в системе нескольких кобальтсодержащих соединений (например, смесь оксидов).

Одним из вариантов решения описанной проблемы является изучение реперных соединений кобальта. Однако, как показал литературный обзор, результаты проведенных ранее исследований не могут быть использованы в дальнейшей работе. Некоторые исследования были проведены на низком экспериментальном уровне и содержали методические ошибки. Таким образом, для получения спектров реперных соединений кобальта необходимо проведение работы на высоком экспериментальном уровне с контролем всех стадий синтеза соединений кобальта.

Проведено исследование оксидов кобальта CoO и Co_3O_4, синтезированных при различных температурах (от 50 до 500 °C) в специальной камере, соединенной со спектрометром, путем окисления металлической кобальтовой фольги. Исследован процесс восстановления оксидов кобальта водородом и монооксидом углерода при давлении 50 мбар. Во всех исследованиях получены фотоэлетронные спектры кобальта — Co2p, Co3s, Co3p. Также определен фазовый состав полученных реперных соединений кобальта методом рентгеновской дифракции на станции «Прецизионная дифрактометрия» СЦСТИ (ИЯФ, г. Новосибирск). Проведенные исследования позволили уточнить спектральные характеристики реперных соединений кобальта, а также определить химические состояния и поведение реперных соединений в реакциях восстановления.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. А. Сараев

УДК 621.921.34

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия наноалмазов, модифицированных путем термического окисления на воздухе

М.П. Акимова[1], И.Е. Иванов[2], А.В. Сивцева[3]

[1]Якутский научный центр СО РАН
[2]Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, Якутск
[3]Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

В работе методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследовано влияние отжига на воздухе в интервале температур 200–550 °С на элементный состав и химическое состояние порошков наноалмаза, полученных измельчением природного алмаза (ПНА) и методом детонационного синтеза (ДНА).

Первичные частицы наноалмазов, полученные вышеуказанными методами, состоят из кристаллического алмазного ядра, окруженного оболочкой, содержащей неалмазный sp^2-гибридизованный графитоподобный углерод, неупорядоченный аморфный углерод в sp^3-состоянии и газообразные примеси, что ограничивает возможности их применения [1]. Неалмазный углерод и примеси в нанопорошках могут быть удалены с помощью термического окисления кислородом воздуха без значимых потерь алмазной компоненты.

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии является наиболее информативным методом для изучения элементного состава и химического состояния наноструктурных материалов.

Доли состояний углерода в спектре C1s образцов ПНА и ДНА до и после отжига

Состояние атомов углерода	ПНА		ДНА	
	До отжига	Отжиг при 550 °С	До отжига	Отжиг при 550 °С
sp^2, %	10,6	7,1	33,2	21,4
sp^3, %	72,9	82,1	39,8	46,5
C-O, C-O-C, %	8,0	9,1	24,8	27,8
COOH, %	2,2	1,7	2,2	4,3

Установлено, что термообработка на воздухе при заданных значениях температуры и времени нагрева не оказывает влияние на элементный состав первичных частиц нанопорошков ДНА и ПНА. Отжиг на воздухе в интервале температур 400–550 °С приводит к эффективному удалению из нанопорошков алмаза аморфного и графитоподобного углерода в sp^2- и sp^3-состояниях путем окисления кислородом воздуха. Значительная потеря в массе нанопорошка ДНА после отжига по сравнению с ПНА главным образом обусловлена более высоким содержанием в его исходном состоянии неалмазного углерода, различных функциональных групп и адсорбированных молекул.

1. Шарин П. П., Сивцева А. В., Попов В. И. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия наноалмазов, полученных измельчением и детонационным синтезом // Журн. техн. физики. 2021. № 2 (91). С. 287.

Научные руководители —
д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. М. Григорьев, канд. физ.-мат. наук П. П. Шарин

УДК 537.533

Изучение взрывной эмиссии углеродных материалов

А. А. Алябьев

Московский физико-технический институт

Интерес к изучению углеродных материалов в последнее время повысился. Конфигурация, свойства катода и другие важные параметры вакуумных приборов получили большое практическое применение [1, 2].

Данная работа посвящена изучению влияния взрывной эмиссии на поверхности электродов. Собрана экспериментальная установка, которая представляет собой генератор, подключенный к генератору импульсов и подсоединенный к форвакуумному насосу, в котором находится катод-анодная система. Параллельно подключен осциллограф для измерения напряжения и тока электродной ячейки, а также подключены 3 резистора параллельно. Условия эксперимента: система откачивает давление до $2{,}5\ 10^{-6}$ Торр, временный сдвиг генератора 1,72 μс, длительность импульса 2,2 μс. Работа проводилась со следующими материалами: пирографит, МПГ-6, УНТ-нити, вольфрамовая нить, ПАН-волокно. Для каждого образца проводили серию экспериментов.

Порядок проведения эксперимента: деформировали поверхность катода для увеличения вероятности взрывной эмиссии, собрали заготовки исследуемых материалов, поместили образцы в камеру, далее откачивали камеру 2 ч до $2{,}5\ 10^{-6}$ Торр, после подключили генератор импульсов и с помощью осциллографа измеряли напряжение и силу тока. Также поверхность катода была исследована до и после экспериментов на РЭМ. Дополнительно была построена функция сопротивления от времени.

Для каждой серии экспериментов оценили характерное время существования пробоя для каждого исследуемого материала, исходя из данных максимального значения силы тока и напряжения. По данным РЭМ оценили сложность получения пробоя для каждого исследуемого образца. Был сделан вывод, что проще всего получить пробой, используя ПАН-волокно, сложнее всего — при помощи вольфрамовой нити.

1. Roy A., Patel A., Menon R. et al. Emission properties of explosive field emission cathodes // Phys. Plasmas. 2011. Vol. 18.

2. Tang W. W., Shiffler D. A., Harris J. R. et al. Field emission characteristics of a small number of carbon fiber emitters // AIP Adv. 2016. Vol. 6.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Е. П. Шешин

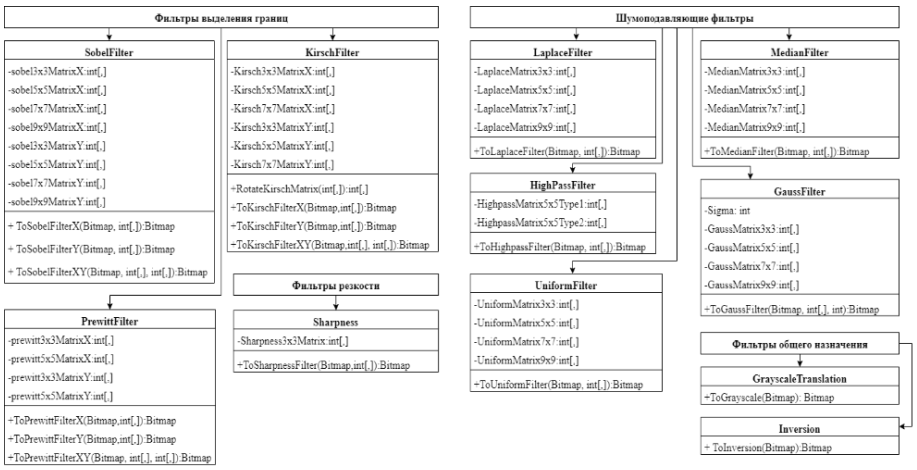
УДК 539.216.2

Модернизация программного комплекса для определения фрактальной размерности

В. А. Анофриев, А. В. Низенко

Тверской государственный университет

Цель работы — дальнейшее развитие ПО [1] для расширения пользовательского интерфейса, используемого при анализе изображений поверхности на наличие самоаффинных структур, а также добавление разработанных программных модулей, реализующих дополнительные матричные фильтры с разными ядрами свертки, к уже имеющимся: фильтрам сглаживания (*Gaussian filter, Uniform filter*), фильтру повышения резкости (*Sharpen filter*), фильтрам выделения границ (*Sobel filters, Prewitt filters, Kirsch filters, Laplacian filters, Highpass filters*), фильтру цветовой инверсии (*Inversion filter*) и фильтру усреднения цвета (*Grayscale filter*). В качестве примера на рисунке представлены фильтры конволюции с различными ядрами свертки, начиная с ядер 3 × 3 и заканчивая ядрами 9 × 9.



Схематическое представление функций, реализованных в программном модуле для фильтрации изображений

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения ГЗ в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006).

1. Свидетельство № 2021618928 РФ. FractalSurface: программа для анализа поверхности на наноуровне / Н. Ю. Сдобняков, В. А. Анофриев, В. А. Кошелев, А. С. Антонов, Д. В. Иванов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». № 20216180353; заявл. 27.05.2021; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 02.06.2021. 1 с.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. Н. Ю. Сдобняков

УДК 547.1

Исследование нематической фазы жидких кристаллов, индуцированных бис(камфоролиден)октаметилендиамином

А. А. Батракова, В. В. Александрийский,
В. А. Бурмистров, А. Н. Матрохина, И. В. Новиков

Ивановский государственный химико-технологический университет

В работе изучено влияние оптически активного бис(камфоролиден)октаметилендиамина (БКОДА) с удельным оптическим вращением $(\alpha)^{25} = -24{,}59$ на мезоморфные, диэлектрические и оптические свойства нематической жидкокристаллической смеси СВ-2 на основе 4-(n-алкилокси-4′-цианобифенилов (n = 5,7).

Жидкокристаллическая эвтектическая смесь СВ-2 (55,3 % n = 5; 44,7 % n = 7) проявляет нематическую фазу в довольно широком температурном интервале (22,0 ÷ 74,5 °С) и имеет сравнительно высокую положительную диэлектрическую анизотропию ($\Delta\varepsilon$ = = +13,4 при 25 °С). При исследовании методом термомикроскопии текстур мезофаз, образующихся в смесях СВ-2 с допантом, наблюдалось образование текстур «отпечатков пальцев». Данный факт свидетельствует об индуцировании данным соединением хиральных нематических фаз.

Методом поляризационной термомикроскопии были определены температуры фазовых переходов, интервал существования мезофазы и текстуры исследуемых соединений. Температуры фазовых переходов исследуемых жидкокристаллических смесей свидетельствуют о снижении термостабильности мезофазы с увеличением концентрации допанта. При этом температурный интервал существования жидкого кристалла остается неизменным. С помощью полученных текстур были рассчитаны значения шага спирали при различных температурах и концентрациях допанта. Величина шага спирали в смесях при температурах существования мезофазы практически не меняется и возрастает вблизи нематико-изотропного фазового перехода.

Диэлькометрически получены температурные зависимости компонент диэлектрической проницаемости в хиральной нематической и изотропножидкой фазах.

Получены температурные и концентрационные зависимости индексов рефракции и двулучепреломления (Δn) растворов оптически активного БКОДА. Анализ этих данных показал, что увеличение концентрации допанта сопровождается незначительным уменьшением двулучепреломления, что связано в основном с падением параметра ориентационного порядка.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. В. А. Бурмистров

УДК 544.032

Влияние природы прекурсора на термическую и электрохимическую стабильность аналогов берлинской лазури для калий-ионных аккумуляторов

Я. О. Батькова, П. А. Морозова

Сколковский институт науки и технологий, Москва

В современном мире литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) успешно питают портативные устройства, но ограниченный и локализованный запас лития и кобальта в земной коре значительно влияет на ценообразование компонентов ЛИА. Использование калиевых систем позволит сохранить высокие емкостные характеристики в маломобильных применениях, снизив при этом затраты на материалы.

Перспективные материалы на основе аналогов берлинской лазури (АБЛ) демонстрируют наибольшую достижимую емкость 155 мА·ч/г со средним рабочим потенциалом ~ 4 В отн. K^+/K [1]. Для дальнейшего применения требуется разработать метод синтеза, в результате которого катодный материал будет наиболее термически и электрохимически стабильным. Таким образом, целью данной работы является изучение влияния условий синтеза на физико-химические свойства материала.

В рамках работы был проведен синтез трех типов АБЛ с общей формулой $K_2Mn[Fe(CN)_6]$ на основе трех различных прекурсоров — $MnSO_4 \cdot H_2O$, $Mn(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ и $MnCl_2 \cdot 4H_2O$. Материалы были получены методом соосаждения растворов солей Mn^{2+} и $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ и затем подвергнуты термической обработке в аргоноводородной атмосфере в диапазоне 100–350 °C. Обнаружено, что электрохимическая стабильность материалов, полученных при использовании сульфатного прекурсора и отожженных в заданном диапазоне температур, оказалась наилучшей по сравнению с другими (сохранение разрядной емкости 79,1 % для образца после отжига 350 °C по сравнению с исходным, неотожженным образцом при плотности тока 15 мА/г).

Таким образом, был определен оптимальный прекурсор и установлено влияние термической обработки на дальнейшую термическую устойчивость и электрохимические свойства. Получение более устойчивого АБЛ данным методом может быть использовано для создания коммерчески жизнеспособных и доступных калий-ионных аккумуляторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 21-53-12039).

1. Deng L. et al. Defect-free potassium manganese hexacyanoferrate cathode material for high-performance potassium-ion batteries // Nat. Commun. 2021. Vol. 12, № 1. P. 2167.

Научный руководитель — канд. хим. наук, проф. С. С. Федотов

УДК 544.2

Моделирование размещения катионов в структуре LiNaLSX

М. Е. Бобков

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Цеолиты широко используются в задачах газоразделения в качестве адсорбентов. Первичными структурными элементами цеолитов являются тетраэдры, в центре которых расположены Т-атомы (Si или Al), а в вершинах размещены атомы кислорода. Эти тетраэдры соединяются друг с другом через общие атомы кислорода, что обеспечивает широкую вариативность пористых топологий. Так как тетраэдры с Si являются электронейтральными, а тетраэдры с Al обладают зарядом −1e, избыточный заряд компенсируется присутствием внекаркасных катионов в структуре цеолитов. Таким образом, контролируя катионной состав цеолитов, возможно настраивать их адсорбционные свойства под конкретные задачи.

Цеолиты с топологией FAU обладают высокой пористостью и возможностью варьирования модуля цеолита (отношение Si к Al) в широком диапазоне. Так, цеолиты с данной топологией и Si/Al = 1, которые также называют LSX (*low silica X*), содержат 96 катионов на элементарную ячейку. Несмотря на большое количество литературных экспериментальных данных по определению размещения катионов внутри структуры цеолитов с топологией FAU, перебрать все комбинации катионного состава с учетом модуля цеолита — крайне затруднительная задача. Методы молекулярного моделирования, позволяющие предсказывать размещение катионов в структуре, являются доступной альтернативой.

В данной работе с помощью метода Монте-Карло были исследованы размещения катионов Li и Na в цеолите LSX. На примере NaLSX показано, что метод параллельного семплирования (*parallel tempering*) лучше описывает литературные экспериментальные данные, чем метод случайных смещений. Продемонстрировано, что результаты моделирования не зависят от выбранной модели элементарной ячейки структуры. Определена очередность замещений позиций катионов Na на катионы Li в структуре LiNaLSX. Полученные результаты для ряда катионных составов LiNaLSX сопоставлены с литературными экспериментальными данными.

Подход, рассмотренный в данной работе, может быть распространен на любой катионный состав, что открывает возможность для проведения исследований по *in silico* скринингу оптимальных катионных составов для разделения заданных газовых смесей.

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

УДК 539.231

Исследование влияния локальной реакционной камеры в магнетронной распылительной системе на качество и характеристики пленок нитрида алюминия

А. Л. Богословцева

Новосибирский государственный университет

В настоящее время пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия имеют наиболее широкую область применения в радиочастотных устройствах по сравнению с другими материалами. Этому способствует ряд уникальных физических свойств, присущих пленкам нитрида алюминия, таких как высокие значения теплопроводности, ширины запрещенной зоны, твердости, скорости звука и низкие потери при распространении сигнала.

Магнетронное напыление является распространенным методом осаждения тонких пленок нитрида алюминия в промышленной технологии из-за его дешевизны и возможности получения покрытий при низких температурах. Основное преимущество магнетронного распыления состоит в том, что этот процесс позволяет получать поликристаллические пленки, в которых кристаллиты строго текстурированы в направлении оси *c*. Тем не менее практическая реализация такого структурного совершенства в тонких пленках, полученных магнетронным распылением, представляет собой непростую задачу.

В представленной работе пленки нитрида алюминия осаждались из алюминиевой мишени на подложки Si(111) методом импульсного реактивного магнетронного распыления в асимметричном биполярном импульсном режиме постоянного тока. В качестве распыляющего газа использовался аргон, реактивного — азот. Осаждение пленок AlN проводилось в двух режимах: с внесением в систему локальной реакционной камерой и без нее. Сравнение воспроизводимости этих двух типов процессов и характеристик полученных пленок приводит к выводу, что присутствие реакционной камеры в текущей геометрии ведет к увеличению содержания кислорода в пленках нитрида алюминия, снижению скорости роста и ухудшению повторяемости структуры. В связи с этим более детальный анализ, дающий информацию о строении внутренней структуры пленок нитрида алюминия, выполнялся только для образцов, полученных без использования реакционной камеры.

Полученные результаты можно использовать для подбора параметров осаждения нитрида алюминия и при разработке модификаций установок магнетронного распыления.

Работа выполнялась при финансовой поддержке госзадания Минобрнауки РФ (№ FSUS-2020-0029).

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук П. В. Гейдт

УДК 621.791.725

Лазерная сварка разнородных алюминиево-литиевых сплавов системы Al-Mg-Li/Al-Cu-Li

К. Р. Бойко

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

В настоящее время в аэрокосмической промышленности алюминиево-литиевые сплавы третьего поколения находят широкое применение в качестве элементов планера самолета (например, обшивка фюзеляжей или лонжероны). Данные сплавы имеют пониженную концентрацию лития (Li < 2 мас.%). К ним относят следующие системы легирования: Al-Cu-Li (В-1461, В-1469 и др.), Al-Cu-Mg-Li (1441) и Al-Mg-Li (1424) [1, 2]. Наиболее актуальным методом соединения данных сплавов, по причине высоких показателей свариваемости, является лазерная сварка.

Целью данной работы является изучение влияния лазерной сварки и последующей термической обработки на структуру и механические свойства разнородных сварных швов системы Al-Mg-Li/Al-Cu-Li (1424/В-1461). Исследования при помощи оптической металлографии позволили установить, что микроструктура зоны плавления со стороны сплава 1424 состоит из разупорядоченных равноосных кристаллов размером 10–15 мкм, в середине сварного шва — из ячеистых дендритов, а со стороны сплава В-1461 — из столбчатых кристаллов размером около 5–10 мкм.

Применение синхротронного излучения позволило установить, что в сварном соединении разнородных алюминиевых сплавов В-1461 и 1424 формируются фазы $\theta(Al_2Cu)$, $T1(Al_2CuLi)$, $S1(Al_2MgLi)$, что обуславливает существенное уменьшение прочности сварного соединения — до 50 % от прочности исходного сплава 1424. Однако с помощью термообработки в сварном соединении была сформирована упрочняющая фаза $\delta'(Al_3Li)$, что позволило увеличить прочность до 70 % и пластичность до 95 % от исходного сплава 1424. Искусственное старение позволило повысить предел прочности и предел текучести до 80 и 89 % от значений исходного сплава 1424. Механические характеристики разнородного сварного шва на основе сплава 1424 и В-1461: предел прочности 411 МПа, предел текучести 327 МПа, относительное удлинение 1,7 %, что близко к значениям сплава 1424.

1. Rioja R. J. et al. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications // Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 2012. Vol. 43. P. 3325–3337.
2. Климов В. Н. и др. Современные авиационные конструкционные сплавы: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. ун-та. 2017. С. 40.

Научный руководитель — д-р техн. наук А. Г. Маликов

УДК 538.9

Уточнение структуры серии вольфраматов $La_{14-x}Nd_xW_4O_{33}$

А. А. Булатов

Новосибирский государственный университет

Экспериментальным путем обнаружено, что молибдаты и вольфраматы лантана обладают смешанной ионно-электронной проводимостью и могут быть использованы в топливных элементах и протонопроводящих мембранах. В зависимости от используемого лантаноида меняется тип проводимости. Так, для вольфраматов с большим содержанием лантана проводимость протонная, а при замещении лантана неодимом проводимость становится кислород-ионной [1]. Важным преимуществом вольфраматов лантана перед другими протонопроводящими материалами, например $BaCeO_3$ и $SrCeO_3$, является отсутствие взаимодействия с CO_2 и SO_x.

О структуре этих соединений имеется немного информации. Были определены два набора параметров элементарных ячеек для ромбической структуры $La_6W_2O_{15}$: a = = 25,25Å, b = 11,917Å, c = 17,824Å и a = 8,93Å, b = 12,65Å, c = 5,97Å. Также была определена структура высокотемпературной фазы α-$La_6W_2O_{15}$ [2] и термическая эволюция параметров ячейки для низкотемпературных β- и γ-форм [3]. Поскольку свойства материалов определяются их структурными характеристиками, дальнейшее исследование структуры этих соединений является важной задачей.

В данной работе проведено исследование структуры серии вольфраматов лантана при замещении их неодимом. Рассматриваются твердые растворы номинального состава $La_{14-x}Nd_xW_4O_{33}$ (x = 0, 2, ..., 14), синтезированные из смеси простых оксидов методом механической активации при температурах 1400–1500 °C. Проведено уточнение структуры данных соединений методом полнопрофильного анализа по данным рентгеновской дифракции и дифракции нейтронов.

1. Shlyakhtina A., Lyskov N., Chernyak S. et al. Oxygen-ion Conductivity of Re Tungstates Ln14W4O33 (Ln = Nd, Sm, Gd) // IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. (ISAF). Sydney, 2021, 16–21 May.

2. Chambrier M.-H., Ibberson R. M., Goutenoire F. Structure determination of α-La6W2O15 // Solid State Chem. 2010. Vol. 183. P. 1297–1302.

3. Chambrier M-H. Analyse structurale au sein du diagramme de phase La2O3-WO3 et exploration des proprietes de conduction ionique: Extended Abstract Doct. Sci. (Chem.) / M-H. Chambrier. L'Université du Maine. Maine, 2009. 231 p.

Научный руководитель — канд. хим. наук К. И. Шефер

УДК 535.3, 543.4, 549.3, 776

Особенности фотолитографического изготовления рентгеновских преломляющих полимерных линз из эпоксидных фоторезистов с гексафторантимонатом триарилсульфония

Н.М. Говоров

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

На экспериментальной станции «РФА-СИ» был создан конфокальный рентгеновский микроскоп в качестве специализированного модуля для исследований с микронным разрешением. Рентгеновское излучение в этом модуле фокусируется за счет многократных отражений в поликапиллярной линзе с ограничением эффективности в диапазоне энергий фотонов от 6 до 23 кэВ. Концентрации элементов, края поглощения которых выше 23 кэВ (например, Pd и Ag), не могут быть определены. Преимуществом полимерных составных преломляющих линз является возможность создания наборов линз, оптимизированных под диапазон энергий, превышающий ограничения поликапиллярных линз.

Для изготовления наборов составных многоэлементных двояковогнутых параболических полимерных линз в работе исследованы процессы глубокой фотолитографии и фоторезисты, состоящие в исходном растворе из эпоксидной смолы с мономером — диглицидиловым эфиром бисфенола А (2,2-бис(4-глицидилоксифенил)пропан) и фотогенератора кислоты. Измерены УФ-спектры отдельных твердых слоев этих фоторезистов толщиной от 0,2 мкм до 2 мм, полученных при 95 °С сушке их растворов на сапфировых подложках.

Установлено, что УФ-поглощение твердых слоев фоторезистов марок *mrl* и SU-8 характеризуется широкими полосами с максимумами при 231; 279; 285 и 306 нм, что с небольшим смещением соответствует литературным данным для спектров раствора гексафторантимоната триарилсульфония в метаноле. При УФ-облучении этой соли в матрице твердой стеклообразной эпоксидной смолы в зоне облучения происходят радикальные реакции, восстановление катиона до сульфида, а комплексный анион притягивает протон, который при последующем нагревании твердой эпоксидной смолы до эластического вязкотекучего состояния при 95 °С катализирует разрыв глицидиловых групп с образованием трехмерной эфирной ароматической полимерной сети. Микроструктуры формируются на подложке при проявлении, когда часть твердого резистивного слоя, необлученная через фотошаблон и неполимеризованная при последующем нагревании, удаляется растворением в пропиленгликоль-моно-этилацетате.

Определено, что твердый фоторезист литографически активен на спаде полосы поглощения в диапазоне длин волн 380–400 нм, где его удельный показатель поглощения имеет значения в диапазоне 0,5–0,2 мм$^{-1}$. Соответствующий перепад доз поглощенного излучения вглубь фоторезиста толщиной около 1 мм не превышает 10 %, что позво-

ляет существенно сократить дифракционные искажения геометрии литографических микроструктур.

Для сборки контактной фотолитографической установки в качестве точечного источника излучения использовали мощный светодиод на 385 нм и стеклянную собирающую линзу диаметром 127 мм для создания широкого равномерного параллельного пучка. Мощность излучения измеряли в плоскости фотошаблона и рассчитывали длительность экспозиции слоя резиста любой заданной измеренной толщины на подложке из латуни или никеля, чтобы доза поглощенного излучения в зоне облучения на дне слоя соответствовала пороговой 50 Дж/см^3. Решена проблема позиционирования пучка УФ перпендикулярно подложке путем прессования образца при нагреве твердого стеклообразного слоя фоторезиста до температуры его вязкой эластичности 60 °С. Для предотвращения прилипания эпоксидного фоторезиста к прессу использовали полиимидную пленку марки Каптон. Получены качественные полимерные микроструктуры с вертикальными стенками — первые линейные прототипы длинных составных рентгеновских преломляющих линз.

Научный руководитель — канд. хим. наук Е. Ф. Резникова

УДК 536,6

Изучение фазовых переходов в гетеро-структурированных системах на основе мезопористых металл-органических координационных полимеров (МОКП) и органической соли $[(C_4H_9)_4N]BF_4$ методом дифференциальной сканирующей калориметрии

Я. А. Данилов

Новосибирский государственный университет
Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, Новосибирск

В связи с открытием твердотельных суперионных проводников, удельная электропроводность в которых достигает 10^{-1} См/см, усилился интерес к соединениям, на основе которых могут быть разработаны новые функциональные материалы с высокими параметрами по проводимости. В качестве таких материалов рассматриваются гетероструктурированные системы, в которых различные по строению и составу соединения объединены в единую структуру. В частности, такими системами выступают соединения на основе мезопористых металл-органических координационных полимеров и ионных проводников. МОКП представляют собой микропористые структуры с размером пор в единицы нанометров и характеризуются высокой идентичностью пор, высокими значениями пористости. Основное их преимущество состоит в том, что кристаллические открытые каркасы обеспечивают четко очерченные каналы для миграции ионов.

Для проверки возможности использования данных структур в качестве ионных проводников были взяты исходные образцы МОКП серий NIIC-10 [1] и NIIC-20 [2]. В теории они удовлетворяют всем условиям существования суперионной проводимости. В качестве источника ионов была взята соль $[(C_4H_9)_4N]BF_4$, которая обладает такими свойствами, как переход в пластическую фазу и низкая температура плавления, которая позволит внедрить ее в каналы, не разрушив МОКП. Поскольку в процессе синтеза структуры предполагается вхождение соли внутрь каналов МОКП, был использован метод дифференциальной сканирующей калориметрии, который в теории позволит по характеру фазовых переходов зафиксировать данный процесс.

1. Lysova A. A. et al. Tuning the Molecular and Cationic Affinity in a Series of Multifunctional Metal–Organic Frameworks Based on Dodecanuclear Zn(II) Carboxylate Wheels // J. Am. Chem. Soc. 2019. Vol. 141. P. 17260–17269.
2. Lysova A. A. et al. A Series of Mesoporous Metal-Organic Frameworks with Tunable Windows Sizes and Exceptionally High Ethane over Ethylene Adsorption Selectivity // Angew. Chem. Int. Ed. 2020. Vol. 59. P. 20561–20567.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Д. П. Пищур

УДК 548.3

Термическое поведение и люминесцентные свойства новых красноизлучающих люминофоров на основе твердых растворов $BaBi_2B_2O_7$: Eu^{3+}, Sm^{3+}

С. В. Демина

Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный университет

Новые твердые растворы $BaBi_2B_2O_7$: Eu^{3+}, Sm^{3+} ($P6_3$, a = 5,3378(8), c = 13,583(2) Å, V = = 335,15(9) Å^3) были получены кристаллизацией из стеклокерамики. Кристаллическая структура содержит изолированные треугольники BO_3, ориентированные в плоскости *ab*. Катионы Ba и Bi практически статистически распределены по трем независимым позициям, которые расщеплены на Ba и Bi подпозиции.

На основе данного бората получены перспективные новые настраиваемые красноизлучающие люминофоры $BaBi_{2-x}Eu_xB_2O_7$ и $BaBi_{2-x}Sm_xB_2O_7$ (x = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50). Были уточнены кристаллические структуры с различным содержанием ионов Eu^{3+} и Sm^{3+}: $BaBi_{1,9}Eu_{0,1}B_2O_7$, $BaBi_{1,8}Eu_{0,2}B_2O_7$, $BaBi_{1,6}Eu_{0,4}B_2O_7$, $BaBi_{1,95}Sm_{0,05}B_2O_7$, рассмотрена корреляция между кристаллической структурой и оптическими свойствами. По результатам анализа спектров возбуждения люминесценции возбуждение на длине волны 615 и 601 нм было выбрано оптимальным для боратов $BaBi_{2-x}Eu_xB_2O_7$ и $BaBi_{2-x}Sm_xB_2O_7$ соответственно. Все полосы на спектрах люминесценции соответствуют излучательным переходам ионов Eu^{3+} и Sm^{3+}. Максимальная интенсивность люминесценции наблюдается у бората состава $BaBi_{1,6}Eu_{0,4}B_2O_7$ и $BaBi_{1,95}Sm_{0,05}B_2O_7$. Проведено содопирование бората $BaBi_2B_2O_7$ ионами Eu^{3+} и Sm^{3+}, что должно повысить эффективность люминесценции, как в сходном соединении $SrBi_2B_2O_7$ [1].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-13-00317) и с использованием оборудования ресурсного центра «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ.

1. Wua L., Baia Y., Wua Li et al. Sm3+ and Eu3+ codoped SrBi2B2O7: a red-emitting phosphor with improved thermal stability // R. Soc. Chem. 20xx. 2017. P. 1–9.

Научные руководители —
канд. геол.-минер. наук А. П. Шаблинский, д-р геол.-минер. наук С. К. Филатов

УДК 620.22

Керамика B_4C-CrB_2, синтезированная с использованием нановолокнистого углерода

Д. В. Дик[1,2], Т. С. Гудыма[1], Ю. Л. Крутский[1], А. А. Филиппов[2]

[1]Новосибирский государственный технический университет
[2]Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Керамика на основе карбида бора является привлекательным материалом для применения в различных отраслях промышленности из-за уникальных физико-механических свойств. В связи с этим возникает потребность в модифицирующих добавках, которые способствуют процессу спекания керамики и улучшают ее физические свойства. Одной из таких добавок является диборид хрома. Существуют несколько методов изготовления композиционных порошков, используемых для приготовления керамики B_4C–CrB_2: а) смешивание карбида бора и диборида хрома [1]; б) смешивание бора, углерода и хрома [2]; в) карбидоборное восстановление оксида хрома в избытке B_4C с использованием углерода. Последний метод недостаточно изучен.

Получать керамику B_4C–CrB_2 по методу *в* можно следующими способами: I) поэтапно, получением порошков карбидоборным восстановлением и дальнейшим горячим прессованием; II) карбидоборным восстановлением одновременно с процессом горячего прессования. Различия свойств керамик, полученных методами I и II с использованием нановолокнистого углерода, не изучены.

Шихты для изготовления керамики с мольным содержанием CrB_2 10, 20 и 30 % методом II смешивали в стехиометрических коэффициентах, дробили в планетарной мельнице и прессовали на лабораторном горячем прессе (КТИ НП СО РАН) при максимальном давлении прессования 17,5 МПа, максимальной температуре 2000 °С с выдержкой максимальных параметров в течение 10 мин в атмосфере аргона.

РФА показал полноту прохождения химической реакции, на дифрактограммах присутствуют пики целевых фаз и пик остаточного углерода. По снимкам РЭМ видно, что распределение частиц CrB_2 равномерное, их размер не превышает 3–4 мкм. Энергодисперсионный анализ показал хорошее схождение теоретического и практического атомного содержания хрома. Были получены зависимости микротвердости и модуля упругости от содержания CrB_2, последний хорошо сходится с теоретическими моделями.

1. Yamada S., Hirao K., Yamauchi Y. Sintering behavior of B4C-CrB2 ceramics // J. Mater. Sci. Lett. 2002. Vol. 21. P. 1445–1447.
2. Suzuya Yamada, Kiyoshi Hirao, Yukihiko Yamauchi S. K. B4C-CrB2 composites with improved mechanical properties // J. Eur. Ceram. Soc. 2003. Vol. 23. P. 561–565.

Научный руководитель — А. А. Филиппов

УДК 539.217.1

Исследование физических свойств измельченной коры даурской лиственницы, модифицированной гидротермическим методом в интересах получения перспективных теплоизолирующих и сорбирующих материалов

Т. В. Жебсаин

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

В работе представлены результаты исследования физических свойств измельченной коры даурской лиственницы в естественном и модифицированном состояниях с целью изучения ее теплоизолирующих и сорбирующих свойств.

Даурская лиственница является одним из доминантных видов древесной растительности всего Дальнего Востока России [1]. Кора даурской лиственницы в Республике Саха (Якутия) является наиболее распространенным видом отходов лесозаготовительной промышленности. Исследования образцов коры лиственницы методом рамановской спектроскопии при помощи спектрального анализатора «Интегра спектра» (ЗАО NT-MDT, г. Зеленоград) показали, что гидротермическая модификация коры даурской лиственницы приводит к изменению состава максимумов спектра. В частности, модификация коры приводит к исчезновению в спектре одного максимума E(3474) и появлению двух новых максимумов: F(4400), G(4609), что обусловлено вымыванием из коры различных смол и появлением новых соединений.

Измерения плотности коры показали, что гидротермическая обработка приводит к уменьшению плотности на 40–45 %. Интенсивное вымывание смол сопровождается механическим расширением пор коры лиственницы, что приводит к уменьшению плотности материала и увеличению пористости. Также в результате исследований сорбирующих свойств коры лиственницы обнаружено, что гидротермическая модификация приводит к повышению сорбирующей способности на 30–40 % по отношению к горюче-смазочным материалам. Повышение пористости тела способствует усилению теплоизолирующих и сорбирующих свойств материала, что свидетельствуют о перспективности применения модифицированной коры даурской лиственницы в качестве теплоизолирующего материала в строительстве и сорбирующего материала при ликвидации загрязнений.

1. Pihtahvoya.ru — Берегите хвойные леса. URL: https: https://pihtahvoya.ru/chvoynie-derevya-i-kustarniki-dalnego-vostoka/rod-listvennitsa/listvennitsa-daurskaya-listvennitsa-primorskaya (дата обращения: 15.02.2023).

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

УДК 542.8

Исследование изменения структуры аморфного углерода при его термической обработке

Н. А. Золотарев

Новосибирский государственный университет
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Углеродные наноматериалы (нанотрубки, графены и их производные, наноалмазы и др.) становятся все более востребованными в науке и производстве за счет комплекса уникальных физико-химических свойств: высокой электрической проводимости, прочности и теплопроводности. Вместе с тем углеродные материалы могут содержать примесь аморфного углерода (АУ), структура которого может изменяться в зависимости от условий получения, что оказывает существенное влияние на свойства углеродных материалов, в частности, при взаимодействии с матрицей композита. В связи с этим при введении углеродных материалов в состав композитов требуется тщательный контроль используемых компонентов на содержание форм АУ.

Цель данной работы — исследование термических превращений аморфизованных форм углерода в пленках, полученных методом вакуумного осаждения углерода (ВУП-4) на подложку из кристаллического кремния. АУ состоит из атомов углерода в трех основных электронных состояниях, соответствующих sp, sp^2- и sp^3-гибридизации электронных оболочек. Комплексом независимых физических методов (ПЭМ, СКР и РФЭС) было установлено, что при отжиге пленок АУ доминирующими становятся фрагменты sp^2-форм углерода, что соответствует их наиболее высокой термодинамической устойчивости. Получена информация о размерах фрагментов sp^2-форм углерода и об их спектральных характеристиках.

Размеры графеновых фрагментов образцов, прогретых при разных температурах, были оценены при помощи ПЭМ и СКР. При нагреве пленок АУ с помощью ПЭМ наблюдалось увеличение протяженности графеновых фрагментов и числа слоев в образующихся графитоподобных блоках, при этом в спектрах КР наблюдались изменения отношения колебательных мод, которые свидетельствуют о графитизации АУ. Полученные данные были использованы для создания методики охарактеризования аморфизованных форм углерода в различных наноструктурированных углеродных материалах (многослойные углеродные нанотрубки, сажи, каталитический волокнистый углерод, взрывные наноалмазы).

Научные руководители —
канд. хим. наук В. Л. Кузнецов, канд. хим. наук С. И. Мосеенков

УДК 544.2, 544.4

Исследование окисления метанола на катализаторе V_2O_5/CeO_2 методами *operando* ИК-Фурье спектроскопии и *pseudo in situ* РФЭС

К. А. Литвинцева

Новосибирский государственный университет
Институт катализа СО РАН, Новосибирск

Реакция окисления метанола на ванадиевых оксидных катализаторах является перспективным процессом промышленного синтеза ценных органических соединений, таких как формальдегид (HCHO), метилформиат ($HCOOCH_3$) и диметоксиметан ($H_2C(OCH_3)_2$) [1]. В связи с этим исследование этого процесса не только представляет интерес с научной точки зрения, но и имеет весомую практическую значимость.

Для создания эффективных катализаторов селективного окисления метанола необходимо выяснить детальный механизм реакции. Благодаря использованию методологий *operando*, в случае ИК-Фурье спектроскопии, и *pseudo in situ*, в случае РФЭС, исследуется реально работающий катализатор, а значит, можно изучить химические процессы, протекающие на поверхности катализатора, и, сравнивая продукты и реагенты в газовой фазе, определить основные маршруты реакции. Соответственно, целью настоящей работы являлось определение методами ИК-Фурье-спектроскопии и РФЭС реакционных интермедиатов на поверхности катализатора и продуктов реакции в газовой фазе, а также определение состояния катализатора 5,3%V_2O_5/CeO_2 в ходе реакции окисления метанола.

Показано, что в ИК-спектрах поверхности катализатора и в потоках метанола в гелии и кислороде присутствуют полосы поглощения, соответствующие адсорбированному метанолу, формиат ионам ($HCOO^-$) и метокси-группам ($-OCH_3$). Основными продуктами реакции в присутствии и в отсутствие кислорода в газовой фазе над катализатором являются CO, CO_2, формальдегид, метилформиат и диметоксиметан. Наличие кислорода влияет на концентрацию интермедиатов на поверхности и продуктов в газовой фазе. Данные, полученные методом РФЭС, подтвердили частичное восстановление катионов ванадия и церия в условиях реакции. Определено, что кислород решетки участвует в окислении метанола и его поверхностных соединений, что указывает на то, что реакция идет по механизму Марса-Ван Кревелена.

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.

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

УДК 351

Исследование механических характеристик фотолюминесцентных композиционных материалов на основе эпоксидных смол и люминофора

С. Э. Лукин

Новосибирский государственный университет

Композиционные материалы на полимерной основе с каждым годом находят все новые области применения [1]. Одним из способов составления двухкомпонентного композита является однородное распределение неорганических мелкодисперсных частиц различной природы в полимерной матрице [2]. Данный метод позволяет комбинировать свойства, присущие компонентам. Путем вариации концентраций компонент можно добиться изменения характеристик композиционного материала.

В данной работе рассмотрен композиционный материал, изготовленный на основе эпоксидной смолы с добавлением фотолюминесцентного микропорошка в качестве наполнителя. Для исследования характеристик данного материала были изготовлены 4 типа образцов, отличающихся типами матрицы и наполнителя. В качестве двух типов полимерной матрицы были использованы эпоксидные смолы Crystall 85-5 и ЭД-20. В качестве двух типов фотолюминесцентного наполнителя были использованы порошки MHG-4E и ФВ-530Д. Анализ наполнителей с помощью электронного растрового микроскопа показал, что частицы данных микропорошков имеют одинаковый элементный состав (состоят из алюмината стронция, легированного европием), однако отличаются по морфологии.

Массовая концентрация наполнителя изменялась в пределах 0–15 %. Для каждого значения концентрации определялся модуль упругости композита. Определение модуля упругости производилось по результатам испытаний подготовленных образцов на трехточечный изгиб согласно стандарту испытаний ASTM D 790.

По полученным данным произведен анализ зависимости модуля упругости композитного материала от массовой концентрации фотолюминесцентного наполнителя.

1. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Тр. ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). С. 29–37.

2. Тренисова А. Л. Получение композиционных материалов на основе эпоксидного олигомера и нанонаполнителей: дис. … канд. техн. наук. М.: АЛ Тренисова, 2009.

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

УДК 537.226

Исследование диэлектрических свойств полинорборненов с объемными карбоциклическими группами методом диэлектрической спектроскопии

А. О. Лунин[1,2], М. А. Зоткин[1]

[1]Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва
[2]РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Москва

Современные изоляционные материалы должны обладать как можно более низкой диэлектрической проницаемостью для увеличения числа электронных компонентов в единице объема без появления «паразитной» емкости.

В настоящее время установление взаимосвязей «строение полимера – его свойства» многократно ускоряет процесс получения материалов с заданными характеристиками направленным синтезом. В данный момент макромолекулярный дизайн ориентирован на разработку полимерных диэлектриков с высокой долей свободного объема, которой можно добиться либо внедрением объемных заместителей в боковые цепи полимера, либо повышением жесткости его основной цепи.

Полинорборнены с объемными группами являются перспективными изоляционными материалами: отсутствие полярных групп и наличие большой доли свободного объема улучшают их диэлектрические свойства.

В данной работе проведено исследование диэлектрических свойств полинорборненов, содержащих объемные карбоциклические группы в боковой цепи, методом диэлектрической спектроскопии. Обнаружено, что для аддитивного полинорбонена с циклогексильными заместителями значение диэлектрической проницаемости при температуре 25 °C и частоте 1 МГц составило 2,3 при достаточно низких значения угла диэлектрических потерь ($8{,}8 \cdot 10^{-4}$). Для аналогичного аддитивного полинорборнена с норборнановыми заместителями при тех же условиях диэлектрическая проницаемость оказалась незначительно больше (2,4), при похожих значениях угла диэлектрических потерь ($12{,}6 \cdot 10^{-4}$). В тоже время для метатезисного полинорборнена с норборнановыми заместителями при тех же значениях диэлектрической проницаемости (2,4) угол диэлектрических потерь был значительно ниже ($0{,}4 \cdot 10^{-4}$).

Исследование диэлектрических свойств выполнено при поддержке гранта Президента РФ (№ МК-983.2022.1.3).

Научный руководитель — канд. хим. наук А. И. Возняк

УДК 539.23

Формирование квантовых точек GaN на поверхности Ван-дер-Ваальсовой структуры g-SiN/Si (111)

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. На основе КТ GaN было продемонстрировано создание светодиодов, однофотонных излучателей, солнечных элементов, одноэлектронных транзисторов и спиновых затворов. Формирование графеноподобных слоев g-SiN и рост КТ на этих слоях открывают возможности создания новых излучающих приборов с малым излучательным временем жизни.

При эпитаксиальном росте КТ на графеноподобных слоях взаимодействие ростового материала с подложкой носит ван-дер-ваальсовый характер, поэтому формирование КТ и g-SiN существенно отличается от роста на вюрцитных подложках. Отсутствие прочных химических связей ослабит требования согласования постоянных решеток и позволит выращивать бездефектные структуры, тем самым улучшив качество GaN/g-SiN/Si(111) структур.

Эксперименты по формированию КТ на g-SiN проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии Riber CBE-32P. Эксперименты по росту КТ на g-SiN проводились в температурном диапазоне 600–850 °C, при потоке аммиака 275 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 разориентированных 3D-островков GaN, что подтверждается проявлением на картине дифракции рефлексов в виде комбинации концентрических полуколец, характерных для поликристаллитов, и пятен Брэгга, характерных для трансмиссионной дифракции от 3D-островков. Исходя из данных ВРПЭМ, можно заключить, что слой g-SiN отстоит от последнего монослоя подложки Si (111) на расстояние, равное около 3,3 Å, что указывает на слабое ван-дер-ваальсовое взаимодействие. Из анализа ВРПЭМ изображений следует, что часть островков обладают кубической решеткой, часть — гексагональной, а некоторые островки обладают смешанной гексагонально-кубической решеткой.

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

УДК 539.5

Сравнение структуры и свойств сверхпластичных сплавов 40ХНЮ и 67КНБ

А. Е. Макаренко, И. С. Кульбакин

Восточно-казахстанский университет
им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

Работа посвящена сравнению структуры и свойств сплавов 40ХНЮ и 67КНБ, обладающих сверхпластичностью, с целью определения наиболее пригодного к использованию в экстремальных условиях при высоких температурах и высоких давлениях сплава.

Сверхпластичность — способность материала с кристаллической решеткой испытывать пластические деформации, многократно превышающие максимальные пределы для этого материала в обычных условиях. Сверхпластическое поведение объясняется образованием мелкозернистой микроструктуры в процессе измельчения зерна. Высокая температура и низкие скорости деформации позволяют интерметаллидам, возникающим по границам зерен, подвергаться значительной пластической деформации без разрушения, что приводит к значительному удлинению структуры.

Сравнение экспериментальных данных, полученных при исследовании сплавов 40ХНЮ и 67КНБ методами рентгеноструктурного анализа и дифракционной электронной микроскопии, показало формирование протяженных, тетраэдрически плотно упакованных структур в зонах локализации пластической деформации.

Благодаря своей способности к деформации без разрушения сверхпластичные материалы позволяют создавать более сложные формы, которые были бы невозможны с использованием традиционных материалов. Важно также понимать, что сверхпластичные материалы могут быть использованы для улучшения производительности и долговечности различных устройств. Например, они могут использоваться для создания лопастей газовых турбин, которые способны выдерживать высокие температуры и давления. Стоит отметить, что сверхпластичные материалы — это идеальный выбор для создания сложных 3D-структур.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. Л. И. Квеглис

УДК 67.017

Исследование влияния наноразмерных частиц нитрида алюминия на структуру и механические свойства магниевого сплава МЛ12

К. А. Макаров, А. А. Ахмадиева

Томский государственный университет

Сплавы магния считаются материалами нового поколения для легких транспортных средств. Низкая плотность, хорошая обрабатываемость, высокая удельная прочность и хорошие технологические и эксплуатационные характеристики делают их особенно подходящими для применения в автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности [1]. Однако применение магниевых сплавов в настоящее время все еще ограничено из-за плохой формуемости, умеренной прочности и неудовлетворительных коррозионных характеристик [2]. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния наноразмерных частиц AlN на структуру и физико-механические свойства сплава МЛ12.

В качестве исходных материалов в работе были использованы магниевый сплав МЛ12 (93,58–95,4 % Mg, 4–5 % Zn, 0,6–1,1 % Zr и др.) и нанопорошок нитрида алюминия. Количество наночастиц AlN, введенных в расплав, составило 0,1; 0,5 и 1 мас.%. Для равномерного распределения частиц расплав был подвергнут механическому перемешиванию при скорости вращения смесителя 500 об/мин и вибрационной обработке с частотой 60 Гц и амплитудой 0,5 мм.

Исследование микроструктуры методом оптической и электронной микроскопии показало, что введение 0,5 и 1 мас.% наночастиц приводит к формированию однородной структуры со средним размером зерна 46 и 54 мкм соответственно. Введение 0,1 мас.% AlN приводит к увеличению пределов прочности (с 151 до 212 Мпа) и пластичности (с 6,4 до 19,7 %) магниевого сплава при растяжении на испытательном стенде Instron 3369 (Томский региональный центр коллективного пользования).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (№ FSWM-2020-0028).

1. Song G., Xu Zh. The surface, microstructure and corrosion of magnesium alloy AZ31 sheet // Electrochim. Acta. 2010. Vol. 55, № 13. P. 4148–4161. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.02.068

2. Penghuai F. et al. Tensile properties of high strength cast Mg alloys at room temperature: A review // China Foundry. 2014. Vol. 11, № 4. P. 277–286.

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

УДК 544.6

Электрохимический механизм влияния ультратонкого слоя никеля на коррозионную стойкость серебряных оптических покрытий

Г. В. Марчий

Университет ИТМО, Санкт-Петербург
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Серебряные оптические покрытия могут быть применены в широком круге областей благодаря высокому отражению в видимой и ближней инфракрасной полосе спектра. Однако многие сферы применения требуют от зеркал стойкости к коррозии во влажной среде и (или) температурным воздействиям.

Одна из наиболее эффективных конструкций покрытия, предназначенная для работы в условиях коррозионной среды, представляет из себя оптически толстый слой серебра (90–200 нм), защищенный сверху массивом чередующихся прозрачных тонких диэлектрических слоев, препятствующих доступу коррозионных агентов к серебру. Большую роль в защите от коррозии в таких покрытиях играет ультратонкий (< 1 нм) металлический слой, находящийся между диэлектриком и серебром. Folgner et al. [1] показали, что наличие Ni в составе этого слоя приводит к значительному уменьшению интенсивности коррозии и качественному ее изменению. Также в работе [1] отмечается электрохимическая природа коррозии. Несмотря на обилие экспериментальных данных [1, 2], механизм действия слоя Ni на стойкость к коррозии остается необъясненным теоретически, что усложняет дальнейшее совершенствование конструкции. В частности, при повышении температуры до 200–300 °C существующие защитные покрытия уже не обеспечивают необходимой для некоторых задач защиты от коррозии [3].

В данной работе предлагается модель, объясняющая эффект повышения коррозионной стойкости воздействием подобной примеси на химический потенциал серебра, приводящим к изменению потенциалов электрохимической коррозии и соответствующему ее замедлению. Для расчетов были использованы методы Молекулярной динамики и Монте-Карло, Теория функционала плотности. Модель проверяется с помощью вольтамперометрических измерений в растворе ацетатного буфера. Также на основании модели предложено использование Ru и Rh в качестве новой основы ультратонкого металлического слоя для улучшения оптической эффективности и коррозионной стойкости рассматриваемых покрытий.

1. Folgner K. A., Chu C.-T., Lingley Z. R. et al. Environmental durability of protected silver mirrors prepared by plasma beam sputtering // Appl. Optics. 2017. Vol. 56, No. 4. P. C75–C86.
2. Wolfe J. D., Laird R. E., Carniglia C. K., Lehan J. P. Durable silver-based antireflection coatings and enhanced mirrors // Opt. Interference Coatings. 1995. Vol. 17. P. 115–117.
3. Samsonov D. S et al. Large-scale collecting mirrors for ITER optical diagnostic // Nucl. Fusion. 2022.

Научный руководитель — канд. техн. наук Д. С. Самсонов

УДК 67.017

Исследование влияния покрытия TiN на механическое поведение сплава Mg-Ca-Zn

В. Д. Мирошкина, М. А. Селиховкин

Томский государственный университет

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений в материаловедении и ортопедии является создание биорезорбируемых имплантатов, которые после вживления в организм человека со временем растворяются в нем. Магний и его сплавы являются перспективными материалами для создания на их основе таких изделий, однако есть существенный недостаток — сплавы обладают низкими механическими и эксплуатационными характеристиками [1]. С целью упрочнения и контроля скорости деградации металл покрывают биосовместимыми инертными покрытиями, в числе которых покрытие на основе нитрида титана. Цель работы заключалась в исследовании влияния покрытия нитрида титана на механические свойства сплава Mg-Ca-Zn.

Для создания исходного сплава проводилась лабораторная плавка с использованием чистого магния (99,5 %), на протяжении всего процесса плавки осуществлялся обдув аргоном. При достижении расплавом температуры 720 °С происходило введение цинка, далее при температуре 760 °С был введен кальций с последующей механической обработкой. Напыление TiN на поверхность магниевого сплава производилось с помощью метода вакуумно-дугового испарения. Скорость осаждения TiN на вращающуюся подложку составляла 0,76 мкм/час. Температура образцов во время напыления не превышала 200 °С. Для сравнительного анализа были произведены образцы магниевого сплава без напыления и с напылением толщиной 0,5 и 3 мкм.

Установлено, что при нанесении 0,5 мкм покрытия TiN предел текучести увеличивается с 58 до 67 МПа, предел прочности — с 121 до 138 Мпа, а максимальная накопленная деформация возрастает вплоть до разрушения с 4,6 до 6,1 %. Увеличение толщины покрытия сплава до 3 мкм демонстрирует более стабильное механическое поведение с увеличением предела текучести до 78 МПа, предела прочности до 152 МПа и незначительным повышением максимальной деформации до 6,5 % соответственно.

1. Селиховкин М. А. и др. Исследование влияния наночастиц алмаза на структуру и механическое поведение сплава Mg-Ca-Zn // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2022. № 79. С. 152–161.

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

УДК 543.42

Изучение механизма зарядовой компенсации в Берлинских лазурях – катодных материалах для калий-ионных аккумуляторов

П. А. Морозова, С. С. Федотов

Сколковский институт науки и технологий, Москва

Вследствие повсеместного развития технологий наличие аккумуляторов стало обязательным требованием автономности устройств. Наиболее практичными и универсальными являются металл-ионные аккумуляторы. Калий-ионные аккумуляторы, благодаря своим физико-химическим свойствам, могут быть использованы в качестве устройств для стационарного запасания энергии.

Как известно, катодный материал определяет энергоемкость электрохимической ячейки, а точное понимание механизмов (де)интеркаляции и процессов зарядовой компенсации формирует подход к созданию высокоемких материалов. Среди катодных материалов для калий-ионных аккумуляторов одними из самых перспективных являются аналоги Берлинской лазури с общей формулой $K_2M^1[M^2(CN)_6]\cdot nH_2O$, достигающие значения энергоемкости > 600 Вт·ч·кг$^{-1}$ [1].

Несмотря на большое количество работ, посвященных этим типам материалов, механизмы зарядовой компенсации во время заряда/разряда в связи M^1-C ≡ N-M^2 малоизучены. Цель данной работы — изучить механизмы зарядовой компенсации во время заряда/разряда катодных материалов состава $K_2Fe_xMn_{1-x}[Fe(CN)_6]$ и $K_2Fe_xMn_{1-x}[Mn(CN)_6]$ (x = 0; 0,5; 1).

Синтез катодных материалов на основе гексацианоферрата и гексацианоманганата выполнен методом гидротермального соосаждения. Кристаллическая структура материалов была изучена методом рентгеновской дифракции, электрохимические свойства — хронопотенциометрией в гальваностатическом режиме и циклической вольтамперометрией. *Операндо* исследование тонкой структуры краев поглощения переходных металлов проводилось с помощью синхротронного излучения методом рентгеновской абсорбционной спектроскопии во время заряда и разряда. Обнаружены корреляции между окислительно-восстановительным поведением переходных металлов в разных позициях M^1 и M^2 и электрохимическим поведением. Результаты данной работы помогут сформировать фундаментальное представление о механизме работы катодных материалов на основе Берлинских лазурей в калий-ионных аккумуляторах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 21-53-12039).

1. Morozova P. A., Trussov I. A., Rupasov D. P. et al. Exploring the Role of Crystal Water in Potassium Manganese Hexacyanoferrate as a Cathode Material for Potassium-Ion Batteries // Cryst. 2021. Vol. 11.

Научный руководитель — канд. хим. наук, проф. А. М. Абакумов

УДК 67.017

Исследование механических свойств сплава системы Al-Mg-Sc с добавлением частиц TiC

Р.Г. Мубараков, И.А. Синкина, Н.И. Кахидзе

Томский государственный университет

Алюмоматричные композиты с добавками керамических частиц получили широкое применение благодаря высоким показателям удельной прочности, износостойкости и других свойств. В качестве добавок особый интерес представляет карбид титана из-за его высокой твердости и хорошей смачиваемости жидким алюминием, при этом TiC способствует измельчению зеренной структуры [1]. Повышение механических характеристик алюминиевых сплавов является актуальной задачей промышленности. Цель работы — исследование влияния TiC на структуру и механические свойства сплава системы Al-Mg-Sc.

В качестве исходного материала был использован сплав Al-5Mg-1Sc-1Mn. Для введения частиц TiC использовалась лигатура системы Al-Ti-C на основе порошковой смеси титана марки ПТМ-1, алюминия марки АСД-0 и детонационного алмаза. Сплав получен методом литья в графито-шамотном тигле с применением ультразвуковой обработки в атмосфере аргона, подробное описание приведено в работе [2]. Расчетная концентрация TiC в структуре сплава составила 0,2 мас.%.

Твердость сплава определялась на твердомере METOLAB-703 (Томский материаловедческий центр коллективного пользования (ТМЦКП)). Испытания на растяжение проводились на разрывной машине Instron-3369 (ТМЦКП). Микроструктура исследовалась методом оптической микроскопии на микроскопе Olympus GX71 (ТМЦКП).

Установлено, что значения предела текучести, предела прочности и максимальных деформаций до разрушения сплава Al-5Mg-1Sc-1Mn с добавкой частиц TiC составили 182 ± 5 МПа, 302 ± 13 МПа и 20,9 % соответственно; среднее значение твердости составило 88 HB. Добавка частиц и ультразвуковая обработка обеспечивает получение беспористых отливок с однородным строением и измельчение среднего размера зерна до 33 ± 15 мкм.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (№ 0721-2020-0028).

1. Karantzalis A.E., Wyatt S., Kennedy A.R. The mechanical properties of Al-TiC metal matrix composites fabricated by a flux-casting technique // Mater. Sci. Eng.: A. 1997. Vol. 237, № 2. P. 200–206.
2. Khrustalyov A. et al. Influence of Tungsten Nanoparticles on Microstructure and Mechanical Properties of an Al-5% Mg Alloy Produced by Casting // Metals. 2022. Vol. 12, № 6. P. 989.

Научный руководитель — д-р техн. наук И.А. Жуков

УДК 537.86

Исследование коэффициентов прохождения и отражения пластин композитов на основе ОУНТ в СВЧ-диапазоне

З. Н. Нуриахметов

Новосибирский государственный университет

Использование одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в технике сверхвысоких частот (СВЧ) позволит создавать устройства с заданными свойствами, например, объекты с высоким коэффициентом отражения или, наоборот, высоким коэффициентом поглощения электромагнитного излучения. Многообещающим направлением исследований является изучение электродинамических характеристик композитов из ОУНТ.

В данной работе изучены свойства пластин из композитов на основе ОУНТ, нанесенных на подложку из полиэтилентерефталата. Композит подготавливался следующим образом: ОУНТ в суспензиях H_2O, C_2H_5OH, H_2O + ПАВ подвергались ультразвуковому диспергированию, затем полученная суспензия распылялась на подложку аэрографическим методом с последующим выпариванием жидкой фазы.

Измерение коэффициентов отражения и пропускания происходило по следующей методике: полученный композит устанавливался в поперечном сечении прямоугольного волновода сечения 72 × 34 мм. Затем с помощью анализатора цепей Agilent N5230A измерялись S-характеристики данного устройства в диапазоне от 2 до 5 ГГц.

В работе показано, что композиты на основе ОУНТ имеют сравнимый с медной пластиной коэффициент отражения, но также обладают достаточно большим (−45 dB; −90 dB для меди) коэффициентом пропускания.

Научный руководитель — канд. техн. наук Ю. Д. Черноусов

УДК: 535.3

Определение коэффициентов отражения и пропускания методом матриц переноса

А. А. Павлов

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

Метод матриц переноса позволяет весьма эффективно определять оптические свойства многослойных гетероструктур. Этот способ моделирования поведения световой волны в многослойных материалах раскрывает особенности изменения волновой функции. Одним из важных преимуществ метода является широкая масштабируемость, а именно возможность задать любое количество слоев практически любых тонкопленочных материалов. Это, в свою очередь, позволяет с достаточной точностью прогнозировать изменения световой волны при прохождении через слои материалов без необходимости воссоздавать физически гетероструктуры.

В общем, метод матриц переноса можно представить следующим образом:

$$M = \prod_{i=0}^{N} I\left(z_i\right) * P\left(z_i, z_{i+1}\right) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где I — матрица интерфейсов, P — матрица распространения [1].

В данной работе представлен анализ метода матриц переноса для определения коэффициентов отражения и пропускания. Рассматривалась однослойная структура *Si*. В численных расчетах предполагалось, что слои являются однородными и изотропными. Представлены численные результаты для коэффициентов отражения и пропускания однослойного *Si* толщиной 1 мкм в оптическом диапазоне.

Как показали численные результаты, полученные значения коэффициента отражения R и коэффициента пропускания T отличаются от литературных данных [2]. Обосновано это может быть погрешностью самого метода. Из литературных данных известно, что метод матриц переноса ведет себя нестабильно при длинах волн, $\lambda \leqslant 750$ нм. Также следует отметить, что метод матриц переноса численно нестабилен для относительно толстых слоев (> 100 Å). Численная нестабильность заключается в невозможности масштабирования матрицы распространения вида (1), так как показатель преломления — входящая в экспоненциальное выражение комплексная величина и, как следствие, выражение (1) будет содержать как малые, так и большие значения, что и приводит к численной нестабильности.

1. Dyakov S. A., Tolmachev V. A. Numerical methods for calculation of optical properties of layered structures. 2014.
2. Polyanskiy M. N. Refractive index database. URL: https://refractiveindex.info (дата обращения: 15.02.2023).

Научный руководитель — канд. техн. наук. А. Г. Федоров

УДК 538.9

Исследование электронных и оптических свойств нанолент MoS_2

Г. Р. Павлов

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

Двумерные материалы обладают рядом уникальных свойств, которые делают их привлекательными для использования в устройствах электроники [1] и оптоэлектроники (работающих в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах длин волн) [2, 3]. Особый интерес к двумерным материалам был привлечен в связи с активными исследованиями и разработкой практически реализуемых методов получения двумерного графена. К двумерным материалам относится также целый класс соединений, известных как дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). Среди ДПМ-материалов встречаются проводники, изоляторы и полупроводники с различными ширинами запрещенных зон и подвижностями зарядов.

Спектр возможных применений ДПМ-материалов очень широк. Наличие прямой зоны в монослоях ДПМ (например, MoS_2, WS_2) позволяет создавать транзисторы и эффективные оптические и ИК-эмиттеры и детекторы. Сильное спин-орбитальное взаимодействие за счет участия *d*-электронов в образовании химических связей приводит к спиновому расщеплению зон и делает ДПМ-материалы перспективными для применения в спинтронике.

Успешное изготовление атомарных слоев MoS_2 в виде нанолистов, нанотрубок и даже тонких пленок вызвало дальнейший исследовательский интерес к их электронным и магнитным свойствам. Электронная структура нанолент MoS_2 с прямой запрещенной зоной является важным свойством для многих оптических приложений.

В данной работе в рамках теории функционала плотности, относящейся к высокоточным первопринципным методам, с использованием псевдопотенциального подхода в пакете Quantum Espresso исследуются электронные и оптические свойства нанолент дихалькогенидов молибдена (MoS_2). Результаты работы могут быть полезны для интерпретации экспериментальных фактов по оптическим свойствам двумерных материалов.

1. Giannazzo F., Greco G., Roccaforte F., Sonde S. S. Vertical Transistors Based on 2D Materials: Status and Prospects // Crystals. 2018. Vol. 8 (2). DOI: 10.3390/cryst8020070.
2. Bharadwaj P., Novotny L. Optoelectronics in Flatland // Opt. Photonics News. 2015. Vol. 26 (7). P. 24. DOI: 10.1364/OPN.26.7.000024.
3. Mittendorff M., Winnerl S., Murphy T. E. 2D THz Optoelectronics // Adv. Opt. Mater. 2021. Vol. 9 (3). DOI: 10.1002/adom.202001500.

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

УДК 538.97; 004.942

Оптимизация решений прямой задачи рентгенографии в криволинейных координатах

Д. Д. Першин

Новосибирский государственный университет

Современные источники синхротронного излучения имеют характеристики, позволяющие вести *in situ* наблюдение совершенно различных объектов: от нативных образцов биологических клеток до взрывчатых веществ в момент взрыва. Существенную роль в этих исследованиях играют методы абсорбционного и фазового контраста. Обработка экспериментальных данных, полученных этими методами, требует решения как обратных, так и прямых задач (т. е. моделирование). Кроме того, адекватное моделирование позволяет лучше подготовиться к самому эксперименту и увеличить его эффективность (понизить необходимое экспериментальное время).

Моделирование экспериментов, в которых ключевую роль играет высокая доля когерентного и частично когерентного изучения, не может быть проведено с использованием подхода геометрической оптики [1, 2]. Для этой задачи необходим специализированный программный пакет, который рассматривает рентгеновское излучение как электромагнитное поле. Примером такого программного пакета является *Ocelot* [3], использующий матричный метод расчета и быстрое преобразование Фурье. Однако при использовании линейной декартовой сетки появляются нефизические отклонения, вызванные «отражениями» от границ сетки во время выполнения преобразования Фурье.

Представленная работа была направлена на внедрение в систему *Ocelot* возможности работы с криволинейными координатами, позволяющими динамически отслеживать особенности эксперимента без увеличения размеров сетки.

1. Sanchez del Rio M., Canestrari N., Jiang F., Cerrina F. SHADOW3: a new version of the synchrotron X-ray optics modelling package. URL: https://scripts.iucr.org/cgi-bin/paper?S090904951102630.
2. Klementiev K., Chernikov R. Powerful scriptable ray tracing package xrt. 2014.
3. Tomin S. et al. Ocelot as a framework for beam dynamics simulations of x-ray sources // Proc. IPAC'17. 2017. P. 2642–2645.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Ракшун

УДК 532.133

Характеризация водных дисперсий ОУНТ методами дифференциального осаждения в дисковой центрифуге и динамического рассеяния света

И. Ю. Петров

Новосибирский государственный университет

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) — уникальный объект, обладающий рядом исключительных свойств. Однако для практического применения ОУНТ наиболее эффективно их диспергирование в жидкости. Поскольку морфология нанотрубок значительно влияет на свойства дисперсий, до сих пор остаются вопросы по характеризации ОУНТ с точки зрения их размеров.

Цели данной работы — экспериментальное изучение свойств водных дисперсий ОУНТ и оценка влияния размеров ОУНТ на эти свойства.

В экспериментах использовались дисперсии с ОУНТ, диспергированные двумя способами: с помощью гомогенизатора высокого давления (ГВД) и с использованием ультразвуковой обработки (УЗО). Вязкость дисперсий измеряли с помощью ротационного вискозиметра *Brookfield DV3T*.

Дисперсии ОУНТ характеризировали с помощью динамического рассеяния света (ДРС) и дифференциальной седиментации (ДС) в дисковой центрифуге. Для дисперсий стержнеобразных частиц средний гидродинамический размер D_h, получаемый методом ДРС, связан с длиной L и диаметром d частицы следующей формулой [1]:

$$D_h = \frac{L}{\ln\frac{L}{d} + 0{,}32}. \quad (1)$$

В случае ДС диаметр стокса D_s определяется следующей формулой [2]:

$$D_s = d\sqrt{\ln\frac{2L}{d}}. \quad (2)$$

Приблизительные длина и диаметр пучков ОУНТ в дисперсиях были найдены численным решением уравнений (1) и (2). Используя вышеизложенный подход, было показано, как изменяется длина и диаметр пучков ОУНТ по мере диспергирования. При этом для дисперсий с УЗО длина и диаметр пучков ОУНТ меньше, чем для дисперсий, обработанных в ГВД. Установлена линейная корреляция между вязкостью дисперсий в разбавленном режиме и средней длиной ОУНТ.

1. Malvern Panalytical Combining Dynamic Light Scattering and Raman Spectroscopy to Characterize Single Wall Carbon Nanotubes (SWNTs) // AZoNano. URL: https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4133 (дата обращения: 13.02.2023).

2. Henn A. R. Calculation of the stokes and aerodynamic equivalent diameters of a short reinforcing fiber // Part. Part. Syst. Char. 1996. Vol. 13, № 4. P. 249–253.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук О. Ф. Бобренок

УДК 681.7

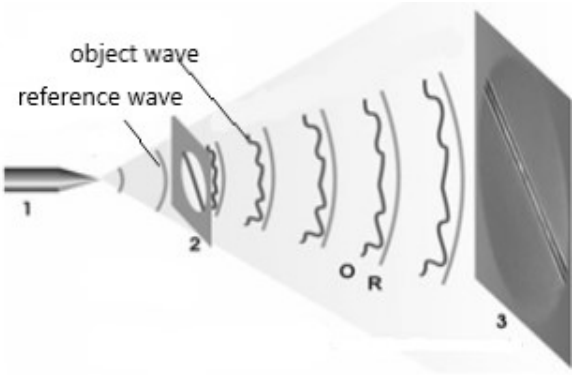
Разработка цифрового голографического микроскопа для исследования тонкопленочных материалов

В. В. Платонов

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

Отличием цифровой осевой голографии от классической голографии Габора [1] является то, что регистрация в первом случае осуществляется напрямую на ПЗС-матрицу или на цифровой аппарат. Классический подход подразумевает регистрацию на некоторый фоточувствительный элемент или координатно-чувствительный детектор (в случае электронной микроскопии) [2].

Принципиальная схема цифровой осевой голографии (см. рисунок) чрезвычайно проста, но в то же время весьма эффективна и перспективна.



Принципиальная схема осевой голографии Габора: *1* — источник; *2* — плоскость объекта; *3* — плоскость регистрирующей среды; *R* и *O* — опорная (волна, прошедшая без взаимодействия) и объектная волны (вторичные волны от объекта) соответственно

В рамках данной работы предлагается разработка схемы осевой голографии Габора в оптическом диапазоне и проведение натурных исследований. Под оптическим диапазоном подразумевается длина волны $\lambda = 632$ нм.

Работа фактически состоит из двух этапов. В данной работе представлены результаты первого этапа, где была реализована схема осевой голографии Габора в лабораторной установке. Представлены результаты натурных исследований с металлической проволокой с диаметром 0,14 мм. Основным недостатком такой схемы является его ограниченность и непереносимость в силу реализации его на лабораторных приборах.

Второй этап работы будет связан со сборкой схемы, представленной на рисунке, основным достоинством которой будет являться переносимость и динамичность по времени при регистрации.

1. Gabor D. A new microscope principle // Nat. 1948. Vol. 161. P. 777–778.
2. Egorov N. V., Trofimov V. V., Antonov S. R. et al. Studying the Electrophysical Parameters of a Holographic Microscope // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Techniques. 2014. Vol. 8, No. 4. P. 745–747.

Научный руководитель — канд. техн. наук А. Г. Федоров

УДК 539.4

Параметрическая модель прогнозирования ресурса работы двухслойного металлокерамического термозащитного покрытия

Т. И. Семенов

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

Термозащитные покрытия (ТЗП) на основе керамики из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ), широко используются в различных отраслях промышленности и в современных технологиях, в частности, для защиты лопаток газотурбинных установок и других видов теплонагруженных элементов в энергетике и авиастроении [1]. ТЗП представляет собой трехслойную систему, состоящую из металлической основы (жаропрочные сплавы), связующего металлического подслоя на основе никеля и теплозащитного керамического слоя YSZ. Для таких систем критически важным параметром является продолжительность работы (ресурс) покрытия, определяемая термомеханической деградацией и окислением ТЗП в процессе эксплуатации и оцениваемая с помощью параметрических моделей. В нашей стране до настоящего момента разработка таких моделей не проводилась. Цель данной работы — создание параметрической модели расчета ресурса термобарьерных покрытий на основе YSZ.

В процессе выполнения работы изучены основные концепции параметрических моделей ресурса покрытий, разработанные R. Miller [2] и A. Evans [3, 4]. Создан алгоритм расчета ресурса покрытий на основе двух концепций и реализована программа на базе данного алгоритма. Получена репрезентативная выборка данных термоциклических испытаний из имеющихся литературных источников. По указанным выше данным выполнены предварительные расчеты ресурса покрытий и проведена валидация программы.

1. Smialek J. L., Miller R. A. Revisiting the birth of 7YSZ thermal barrier coatings: Stephan Stecura // Coat. 2018. Vol. 8, № 7. P. 255.
2. Miller R. A. Oxidation-based model for thermal barrier coating life // J. Am. Ceram. Soc. 1984. Vol. 67, № 8. P. 517–521.
3. Evans A. G. et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings // Prog. Mater. Sci. 2001. Vol. 46, № 5. P. 505–553.
4. Vaßen R., Giesen S., Stöver D. Lifetime of plasma-sprayed thermal barrier coatings: comparison of numerical and experimental results // J. Therm. Spray Technol. 2009. Vol. 18. P. 835–845.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Е. В. Картаев

УДК 538.9, 548.7341

Структурные особенности нанесенных на оксид алюминия платино-родиевых катализаторов парциального окисления углеводородов

С.Н. Семушев

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Реакция парциального окисления углеводородов имеет большую значимость для промышленности, в том числе для производства синтез-газа и водорода и для дожига отходящих газов в различных технологических процессах. Ее использование способствует снижению вредных выбросов и рациональному обращению с природными ресурсами. Для проведения этой реакции важно подобрать эффективный и стабильный катализатор. Особенности действия катализаторов объясняются при исследовании их свойств и структуры и зависят от способов их приготовления. В качестве активного компонента реакции парциального окисления лучше всего зарекомендовали себя благородные металлы, одними из лучших носителей являются оксиды алюминия с определенными характеристиками.

В данной работе рассматриваются структурные характеристики нанесенных биметаллических платино-родиевых катализаторов парциального окисления углеводородов на основе оксида алюминия с помощью дифракционных методов. Поскольку нанесенные катализаторы являются дисперсными веществами, при изучении их структуры требуется использование специальных дифракционных методик, учитывающих особенности дифракционных картин от этих систем. В ходе работы проведен качественный рентгенофазовый анализ носителей и катализаторов, определены параметры элементарной ячейки и размеры области когерентного рассеяния для активного компонента [1]. Уточнены структурные характеристики активного компонента с использованием методов полнопрофильного анализа [2], а также рассмотрена локальная структура носителей и катализаторов методом радиального распределения электронной плотности [3, 4].

1. Плясова Л.М. Введение в рентгенографию катализаторов. Новосибирск: Ин-т катализа, 2010. 58 с.
2. McCusker L.B., Von Dreele R.B., Cox D.E. et all. Rietveld refinement guidelines // J. Appl. Crystallogr. 1999. Vol. 32, is.1. P. 36–50.
3. Egami T., Simon J.L.B. Underneath the Bragg peaks: structural analysis of complex materials. Oxford: Elsevier, 2003. 404 p.
4. Мороз Э.М. Рентгенографическая структурная диагностика наноматериалов // Успехи химии. 2011. Т. 80, № 4. С. 315–334.

Научный руководитель — канд. хим. наук К.И. Шефер

УДК 538.9

Разработка подходов к определению элементов тензора тепловой деформации монокристаллов средних сингоний

П. С. Серебренникова

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

Точное знание отдельных элементов тензора тепловой деформации кристаллической решетки (ТДКР) крайне важно для решения ряда научно-технических задач. В частности, оно имеет большое значение для понимания термодинамических свойств и эксплуатационных характеристик материалов-термоэлектриков, интерес к которым обусловлен необходимостью перехода к альтернативным источникам энергии, что является одной из ключевых задач современности.

Определение отдельных элементов ТДКР обычно производится расчетом параметров элементарной ячейки (ПЭЯ) кристаллических фаз при каждой из выбранных температурных точек посредством обработки дифрактограмм поликристаллов методом Ритвельда. Однако такой метод в применении к средним и низшим сингониям имеет ряд недостатков, связанных с необходимостью учета корреляций вкладов большого числа уточняемых параметров в положения и формы перекрывающихся дифракционных линий. В результате зависимости ПЭЯ(Т) для одних и тех же фаз, полученные разными исследователями, часто не совпадают между собой [1].

Решением может быть переход к исследованию теплового поведения отдельных монокристаллов методом рентгеноструктурного анализа (РСтА), однако серьезным недостатком такого подхода является низкая точность стандартных методик при использовании дифрактометров, оснащенных 2D-детекторами, — значения случайных и систематических ошибок могут на порядок превышать величины изменений ПЭЯ, вызванные тепловыми эффектами. Таким образом, целью данной работы является разработка комплекса методик прецизионного определения элементов ТДКР отдельных монокристаллов. В качестве образцов для отработки методик использованы кристаллы тетрагональной сингонии — t-$Ag_xLi_{1-x}InSe_2$ (x = 0,6; 0,8; 1), которые интересны благодаря своим термоэлектрическим свойствам [2].

В рамках работы предложены модификации методики уточнения ПЭЯ монокристаллов, описанной ранее в [3] и основанной на использовании внешнего эталона. Показано, что предложенные модификации позволяют уменьшить относительную ошибку определения ПЭЯ до $1 \cdot 10^{-5}$. С помощью данной методики построены зависимости ПЭЯ(Т) для монокристаллов t-$Ag_xLi_{1-x}InSe_2$ (x = 0,6; 0,8; 1) в диапазоне температур 90–500 К. Показано, что данные зависимости подтверждаются результатами ДСК, а также имеют производные разных знаков (что может представлять дополнительный интерес).

Для определения структурных особенностей тепловой деформации данных фаз проведена серия РСтА при разных температурах.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет-2030».

1. In-situ Synchrotron X-ray Diffraction and Thermal Expansion of TiB_2 up to ~ 3050 °C / E. L. Converse et al. // J. Eur. Ceram. Soc. 2023. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.050.
2. Synergistically optimizing carrier concentration and decreasing sound velocity in n-type AgInSe2 thermoelectrics / Y. Zhu et. al. // Chem. Mater. 2019. Vol. 31, № 9. P. 8182–8190.
3. On the accuracy of determining unit cell parameters of single crystals on modern laboratory diffractometers / P. S. Serebrennikova et. al. // J. Struct. Chem. Vol. 62, № 5. P. 682–691.

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

УДК 621.762

Исследование композиционного материала, полученного методами порошковой металлургии из смеси АСД-О – базальтовые волокна

И. Л. Синкина, В. Д. Валихов

Томский государственный университет

Порошковая металлургия позволяет увеличивать технико-экономические показатели, что способствует решению многих задач при изготовлении деталей в современной технике. Также порошковая металлургия играет важную роль в создании сверхтвердых и композиционных материалов [1].

В данной работе был исследован композиционный материал на основе алюминиевого порошка марки АСД-0 и базальтовых волокон. Супертонкое непрерывное базальтовое волокно измельчалось в планетарной мельнице с частотой 12 Гц в течение 40 мин. Путем механической активации алюминиевого порошка АСД-0 с базальтовыми волокнами в шаровой мельнице планетарного типа были получены частицы алюминиевого порошка АСД-0, покрытые базальтом. Механическая активация проходила при частоте вращения 14 Гц в течение 40 мин. Спекание образцов проводилось в печи муфельного типа при температуре 600 °С в течение 3 ч, а также методом горячего прессования при параметрах процесса, температуре 450 °С в течение 10 мин.

Исследование структуры и поверхности разрушения полученных образцов проводилось методами растровой электронной микроскопии. Испытания на твердость по Бринеллю демонстрируют увеличение средних значений твердости у образцов с добавлением базальтового волокна, полученных методами спекания и горячего прессования от 4 до 9 НВ и от 14 до 24 НВ соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0028. Исследования исходных и полученных материалов выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета. Центр поддержан Грантом Министерства Науки и Высшего Образование Российской Федерации № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0012).

1. Torralba J. D., Da Costa C. E., Velasco F. P/M aluminum matrix composites: an overview // J. Mater. Process. Technol. 2003. Vol. 133, № 1–2. P. 203–206.

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

УДК 544.03, 537.6, 53.096

Магнитоактивные цепочечно-полимерные комплексы Cu(II) с нитроксильными радикалами

К. А. Смирнова

Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Комплексы Cu(II) с 2-имидазолиновыми нитроксильными радикалами способны проявлять обратимые магнитноструктурные переходы при изменении температуры [1, 2]. Вариацией заместителя в пиридиновом фрагменте можно регулировать температуру и характер фазового перехода, что позволит создавать на их основе температурные сенсоры для необходимого рабочего диапазона.

Цель данной работы — исследование магнитноструктурных корреляций в ряду новых комплексов гексафторацетилацетоната Cu(II) ($Cu(hfac)_2$) с пиридилзамещенными нитроксильными радикалами L^R (*R* = Me, MeO, Et, *i*-Pr, *n*-Pr, *n*-Bu и циклопентил — CP) методами рентгеноструктурного анализа и магнетохимии.

По результатам рентгеноструктурного исследования установлено, что цепочечно-полимерные комплексы $[[Cu(hfac)_2L^R]_2Cu(hfac)_2]_\infty$ образованы циклическими димерами $[Cu(hfac)_2L^R]_2$, объединенными в цепь фрагментами $Cu(hfac)_2$. При исследовании магнитных свойств комплексов обнаружено значительное изменение $\mu_{эфф}$ при понижении температуры, что свидетельствует о протекании фазовых переходов. Структурные данные, полученные в интервале температуры 335–30 K, показали, что при фазовом переходе происходят значительные изменения координационного окружения ионов Cu(II) в димерных фрагментах $[Cu(hfac)_2L^R]_2$, в результате которых происходит смена координации нитроксильного радикала с аксиальной на экваториальную. Установлена взаимосвязь между температурой фазового перехода и объемом свободного пространства, занимаемого заместителем пиридинового фрагмента.

1. Ovcharenko V. I. Metal-Nitroxide Complexes: Synthesis and Magnetostructural Correlations // Stable Radicals / ed. R. G. Hicks. UK Wiley, 2010. P. 461–506.
2. Tolstikov S. E. et al. Heterospin complex showing spin transition at room temperature // Polyhedron. 2015. Vol. 100. P. 132–138.

Научные руководители —
канд. хим. наук А. С. Богомяков, канд. физ.-мат. наук Г. А. Летягин

УДК 54.06

Метод резонансной рентгеновской дифракции для установления заселенностей позиций атомов с близким количеством электронов в соединениях с большим числом кристаллографических позиций на примере легированных гексаферритов М-типа

А. С. Султановская

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Гексаферриты М-типа $MFe_{12}O_{19}$ (M = Ba, Sr, Pb) в силу низкой себестоимости, химической и термической стабильности являются важным классом промышленных магнитотвердых материалов. В их структуре ионы железа расположены в пяти различных кристаллографических позициях: трех октаэдрических ($2a$, $4f_2$, $12k$), одной тетраэдрической ($4f_1$) и одной тригонально-бипирамидальной ($2b$). Каждая позиция вносит уникальный вклад в поле анизотропии, которое определяет величину коэрцитивной силы однодоменных частиц и частоту естественного ферромагнитного резонанса. Частичное замещение ионов железа позволяет прецизионно настраивать магнитные свойства соединений. Для моделирования функциональных свойств любых соединений с большим количеством позиций необходимо точно знать распределение легирующих ионов по ним. Метод резонансной рентгеновской дифракции на источнике синхротронного излучения теоретически может позволить устанавливать заселенности позиций различными элементами, даже имеющих близкое количество электронов.

В представленной работе были синтезированы однодоменные образцы гексаферритов, в которых ионы Fe^{3+} частично замещены ионами Cr^{3+}, Mn^{3+} Ga^{3+} ($SrFe_{12-x}Cr_xO_{19}$, $SrFe_{12-x}Mn_xO_{19}$, $SrFe_{12-x}Ga_xO_{19}$), и образцы гексаферритов, полученных при одновременном частичном замещении Sr на Ca и Fe^{3+} на Al^{3+} ($Sr_{0,66}Ca_{0,33}Fe_{12-x}Al_xO_{19}$). Полученные образцы были исследованы с помощью метода резонансной рентгеновской дифракции для прецизионного установления распределений легирующих ионов по позициям атомов железа. С помощью уточнения кристаллической структуры по методу Ритвельда было установлено распределение легирующих ионов в кристаллической структуре гексаферритов, которое хорошо согласуется с экспериментально полученными магнитными свойствами образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 21-53-12002)

Научный руководитель — канд. хим. наук Е. А. Горбачев

УДК 539.23

Удаление оксида с поверхности InSb в потоке сурьмы

М. А. Суханов

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

Одной из самых перспективных наукоемких технологий XXI в. является тепловидение. Основой тепловизионных устройств являются матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона, формирующие изображение. Для создания матричных фотоприемников среднего ИК-диапазона (3–5 мкм) широко применяются полупроводниковые гетероструктуры на основе InSb, которые обычно выращиваются на подложках InSb. Перед эпитаксиальным наращиванием подложки очищают и удаляют слой оксида с поверхности, иначе его остатки приводят к формированию дефектов на границе слоя и подложки. Наиболее часто используемый способ — термический отжиг подложек. На данный момент влияние потока сурьмы на процесс удаления оксида до сих пор не изучено.

Удаление оксида с подложек InSb производилось путем термического отжига в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях сверхвысокого вакуума и в потоке сурьмы. Нагрев осуществлялся до температуры 450 °C. Процесс удаления оксида контролировался с помощью дифракции быстрых электронов с энергией 12 кэВ. В начале эксперимента картина дифракции представляет собой фон без рефлексов, что говорит о достаточной толщине слоя оксида для рассеяния пучка электронов и, соответственно, уменьшения его интенсивности. По мере повышения температуры интенсивность фона картины дифракции уменьшается и возникают основные дифракционные рефлексы от поверхности InSb. При температуре 423 °C на поверхность подавался поток сурьмы. При подаче потока сурьмы скорость роста интенсивности уменьшается, что означает замедление скорости удаления оксида с поверхности. Интенсивность рефлексов после достижения конечной температуры растет в течение 2 мин и после насыщается.

Уменьшение толщины оксида было рассчитано с помощью химических реакций разложения и образования оксида сурьмы, учитывалась десорбция кислорода и сурьмы с поверхности. Показано, что при подаче потока сурьмы реакция образования оксида начинает играть существенную роль из-за увеличения концентрации сурьмы на поверхности и замедляет процесс удаления оксида.

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

УДК 548.734

Структурная диагностика рутений-содержащих катализаторов $Ru/Ce_{1-x}Zr_xO_2$ для процесса метанирования оксидов углерода

Н. А. Харченко

Новосибирский государственный университет
Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Разработка эффективных катализаторов для процесса метанирования оксидов углерода представляет большую практическую значимость. Реакция метанирования используется для удаления CO из получаемых водородсодержащий смесей и позволяет добиваться высокой степени очистки водорода. Реакция метанирования диоксида углерода привлекает большой интерес как способ утилизации оксида углерода CO_2 с одновременным синтезом энергоносителя.

Многочисленными исследованиями показано, что эффективными для процессов метанирования являются рутений-содержащие катализаторы. Данные системы высокоактивны при сравнительно низких температурах (200–250 °C) и малом содержании активного компонента (~ 1–5 ат.%). В качестве перспективных материалов носителей были предложены легко восстанавливаемые оксидные материалы, в частности, диоксид CeO_2 и смешанные церий-циркониевые оксиды $Ce_{1-x}Zr_xO_2$.

Несмотря на интенсивное изучение функциональных свойств катализаторов на основе рутения, практически отсутствует информация о структуре нанесенных частиц активного компонента ввиду их высокой дисперсности. В данном случае необходимо привлекать методы диагностики, позволяющие изучать структуру ультрадисперсных материалов, в том числе атомарных кластеров. Ценную информацию о структуре ультрадисперсных компонентов катализаторов можно извлечь методами, дающими информацию о ближнем порядке атомов. Для изучения рутений-содержащих катализаторов на Ru/CeO_2 был привлечен метод EXAFS (*Extended X-Ray Absorption Fine Structure*) спектроскопии [1]. Это позволило выявить формирование на поверхности носителя ультрадисперсных частиц RuO_2. Еще одним эффективным методом диагностики систем на атомарном уровне является рентгенографический метод анализа распределения атомных пар (*atomic pair distribution function analysis — PDF analysis*).

Данная работа посвящена исследованию структурных особенностей нанесенных гетерогенных катализаторов $Ru/Ce_{1-x}Zr_xO_2$, а также изучению влияния восстановительной активационной обработки на изменение фазового состава катализаторов и структурных характеристик окристаллизованных фаз. В качестве основных методов исследования использованы методы порошковой рентгеновской дифракции. Для идентификации и изучения структуры ультрадисперсных форм рутения в составе катализаторов использован рентгенографический метод радиального распределения атомов. Кроме того, привлечены дополнительные физико-химические методы, такие как просвечи-

вающая электронная микроскопия высокого разрешения и рентгенофотоэлектронная спектроскопия.

1. Nakaji Y. et al. Mechanism of formation of highly dispersed metallic ruthenium particles on ceria support by heating and reduction // J. Phys. Chem. C. 2019. Vol. 123, № 34. P. 20817–20828.

Научный руководитель — канд. хим. наук В. П. Пахарукова

УДК 538.9

Формирование доменной структуры при облучении ионным пучком монодоменных областей в кристаллах ниобат бария-стронция

М. Д. Холоденко, Е. А. Пашнина

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

Проведено исследование формирования доменной структуры (ДС) при облучении ионным пучком монодоменных областей монокристаллов ниобата бария-стронция ($Sr_{0,61}Ba_{0,39}Nb_2O_6$, SBN). Выявлены основные закономерности формирования доменов при точечной и полосовой записи. Определены дозовые зависимости параметров ДС. Измерены предельные значения глубины прорастания доменов.

Кристаллы SBN могут использоваться для создания управляемых электрическим полем дифракционных оптических элементов [1] и фотонных кристаллов нового поколения. Практический интерес представляет создание кристаллов SBN с регулярной доменной структурой с заданной геометрией.

При комнатной температуре кристаллы SBN исследованного состава являются полидоменными, с размером отдельных доменов ~ 10 нм. Создание монодоменных областей проводилось при помощи облучения поверхности сфокусированным электронным пучком с дозами облучения от 100 до 200 мкКл/см^2, а поверх них проводилась запись ДС ионным пучком. На облучаемую Z^--поверхность наносился слой фоторезиста, а на Z^+-поверхность — сплошной медный электрод. Контроль качества ДС в монодоменных областях на поверхности проводился при помощи оптической микроскопии, а в объеме — при помощи микроскопии генерации второй гармоники.

Показано, что при одних и тех же дозах облучения изолированные точечные домены были меньше, чем в матрице, что объясняется взаимодействием сближающихся доменных стенок соседних доменов. Полосовые домены в решетке прорастали в 2,5 раза глубже, чем изолированные, что обусловлено влиянием электрических полей от соседних облученных линейных областей на прорастание полосового домена в решетке. С увеличением дозы облучения глубина прорастания увеличивается. При дозах облучения более 50 мкКл/см^2 полосовые домены в решетке прорастают на всю глубину образца, изолированные — менее чем на половину толщины кристалла.

Полученные результаты представляют значительный интерес для дальнейшего развития методов доменной инженерии в кристаллах SBN.

1. Mávita J. et al. Switchable phase/intensity sensor made with ring-shaped and hexagonal ferroelectric domains // Appl. Opt. 2018. Vol. 57, № 9. P. 2208.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук А. Р. Ахматханов

УДК 621.383.523

Влияние концентрации легирования зарядового слоя на параметры лавинного фотодиода на основе Ge/Si

К. И. Хомякова, Д. Хазем

Томский государственный университет

В современном мире к параметрам устройства детектирования одиночных фотонов ставятся все более жесткие требования. Несмотря на это, в настоящее время доступно несколько однофотонных фотоприемников, включая фотоумножители, сверхпроводящие нанопроволки и полупроводниковые лавинные фотодиоды (ЛФД). Высокоэффективные лавинные фотодиоды на основе Ge/Si, работающие в коротковолновом инфракрасном диапазоне 1310–1550 нм при температуре, близкой к комнатной, потенциально могут найти применение в разных областях, включая квантовую связь, квантовую визуализацию, определение дальности (ЛИДАР), флуоресцентную медицинскую визуализацию, регистрацию слабого излучения в спектроскопии и т. д. [1, 2].

Для исследования характеристик и параметров фотоприемника была спроектирована и смоделирована планарная структура ЛФД Ge/Si. В структуре ЛФД при обратном напряжении смещения наличие зарядового слоя должно гарантировать, что электрическое поле в узкополосном слое поглощения Ge остается низким во избежание эффекта туннелирования. Кроме этого, оно должно быть значительно ниже поля пробоя ЛФД, а также поле в слое умножения должно быть больше, чем поле пробоя ЛФД, чтобы обеспечить ударную ионизацию. По этим причинам с помощью TCAD были смоделированы три разные ЛФД с разной концентрацией легирования зарядового слоя.

В работе проведено проектирование и моделирование планарной конструкции лавинного фотодиода Ge/Si. Выявлена оптимальная концентрация легирования зарядового слоя, удовлетворяющая всем критериям проектирования с точки зрения электрического поля и параметров ЛФД.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (№ 21-72-10031).

1. Thorburn F., Yi X., Greener Z. M. et al. Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors for short-wave infrared wavelengths // J. Phys.: Photonics. 2021. Vol. 4. P. 012001.
2. Hadfield R. H. Single-photon detectors for optical quantum information applications // Nat. Photonics. 2009. Vol. 3, No. 12. P. 696–705.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. П. Коханенко

УДК 535.34

Антиотражающие свойства покрытий из частиц германия, выращенных на поверхности кварца

Чжу Чжен

Новосибирский государственный университет

Антиотражающие покрытия используются во многих областях науки и техники, в частности, в солнечной энергетике и оптике. Обычно они состоят из нескольких сплошных пленок разного химического состава. Альтернативой им могут служить покрытия, состоящие из массивов диэлектрических частиц гораздо меньших размеров, чем длина волны рассеиваемого света. По сравнению со сплошными пленками, антиотражающие свойства таких покрытий меньше зависят от угла падения света и могут служить в качестве узкополосных фильтров. Под действием электромагнитного излучения в частицах возбуждаются магнитные и электрические колебания. Такие колебания становятся интенсивными в условиях резонансов.

Сначала нами изучались спектры отражения покрытия из частиц германия, полученных отжигом сплошного слоя германия на подложку из кремния, покрытую слоем SiO_2. Образование компактных частиц германия происходило благодаря явлению твердотельной несмачиваемости [1]. В измеренных спектрах отражения наблюдалось два минимума, за счет которых отражательные свойства таких покрытий становились широкополосными. Также установлено, что глубина минимумов выше у покрытий, полученных при более высоких температурах отжига.

В используемом нами спектральном диапазоне подложка из кремния имеет довольно сильное поглощение. Для получения спектров пропускания покрытий из частиц германия нами использовались подложки из кварца, на которых также образуются компактные частицы при отжиге сплошного слоя германия. Сравнение спектров поглощения образцов, покрытых частицами германия и сплошным слоем германия, показало, что покрытие из частиц германия значительно увеличивает поглощение. Это обусловлено деструктивной интерференцией между падающим излучением и полями магнитных и электрических резонансов, возбуждаемых в частицах. Деструктивная интерференция может подавлять как падающее, так и проходящее излучение и направлять его вдоль поверхностных слоев подложки. Это приводит к значительному увеличению поглощения и может увеличить эффективность оптоэлектронных преобразователей по сравнению с использованием просветляющих покрытий из сплошных диэлектрических пленок.

1. Shklyaev A. A., Latyshev A. V. Dewetting behavior of Ge layers on SiO_2 under annealing // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. Art. No 13759.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук А. А. Шкляев

УДК 535.34, 536.241

Моделирование ближнепольного радиационного теплопереноса методом дискретных диполей

Д. В. Шершнев

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

В режиме ближнего поля, когда величина зазора между телами порядка характерной тепловой длины волны, теплообмен может превышать предел, предсказываемый законом Стефана — Больцмана, на несколько порядков. Это явление имеет множество применений, например, для управления температурой в замкнутых системах бесконтактным способом. В связи с этим в последнее десятилетие данный эффект активно изучался с использованием разнообразных численных методов, в том числе и метода дискретных диполей (МДД). На данный момент имеются реализации МДД для моделирования ближнепольного теплопереноса, которые хорошо согласуются с аналитическим решением для сферических частиц [1]. Тем не менее остаются вопросы, связанные с оптимизацией вычислений и правильным моделированием флуктуационных токов внутри частицы. Таким образом, основная цель данной работы — реализовать моделирование ближнепольного радиационного переноса методом дискретных диполей и попутно ответить на открытые вопросы в этой области.

Задача работы состоит в том, чтобы применить МДД, который уже реализован в открытом ПО ADDA, к общей задаче радиационного теплообмена между двумя частицами. В данном методе частицы представляют собой конечный набор диполей, которые могут взаимодействовать друг с другом и с падающим электрическим полем. Тепловое излучение представляется флуктуационными токами, которые связаны с локальной температурой источника через флуктуационно-диссипационную теорему. Интенсивность теплопереноса между двумя частицами выражается через двойной интеграл по объемам обеих частиц. Для вычисления этого интеграла был реализован скрипт на языке Python, который запускает ADDA с источником внутри частицы.

Разработанный алгоритм использовался на тестовых задачах (два шара и два куба), где было получено качественное согласие спектров с результатами программы T-DDA [1], которые ранее сравнивались с аналитической теорией.

1. Edalatpour S., Francoeur M. The Thermal Discrete Dipole Approximation (T-DDA) for near-field radiative heat transfer simulations in three-dimensional arbitrary geometries // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. Vol. 133. P. 364–373.

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

УДК 616-74

Исследование свойств магнитоактивных композитных кондуитов на основе полиоксибутирата и наночастиц магнетита для инженерии нервной ткани

Л. Е. Шлапакова, М. А. Сурменева

Томский политехнический университет

Периферическая нервная система человека (ПНС) уязвима для травм вследствие болезней, аварий, операций, природных катаклизмов. Повреждения ПНС приводят к потере сенсорной и моторной функций конечностей, что существенно снижает качество жизни миллионов пациентов по всему миру и может повлечь потерю их трудоспособности и инвалидность [1]. На данный момент «золотым стандартом» восстановления нервов является имплантация донорского нерва. Ввиду существенных недостатков данного метода необходим поиск альтернативных стратегий терапии повреждений ПНС. В настоящее время разрабатываются полимерные имплантаты трубчатой формы (кондуиты), которые имплантируются в область поврежденного нерва и обеспечивают направленную стимуляцию восстановления нерва, а также его механическую поддержку и защиту.

В данном исследовании методом электроформования получены волокнистые магнитные кондуиты на основе биосовместимого и биоразлагаемого поли-3-оксибутирата (ПОБ) и наночастиц магнетита (МНЧ) для магнитной стимуляции восстановления нервной ткани. Кондуиты имеют пористую структуру с диаметром волокон 1,2 ± 0,1 мкм. Атомная силовая микроскопия позволила установить, что добавление МНЧ увеличивает среднюю шероховатость волокон от 11,2 ± 1,9 до 19,4 ± 5,5 нм. Методом рентгенофазового анализа показано, что МНЧ могут увеличивать содержание электроактивной β-фазы ПОБ. Фазовый и химический состав магнитных кондуитов изучен методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Дифференциальная сканирующая калориметрия выявила снижение кристалличности кондуитов на основе ПОБ от 59 до 54 % при введении МНЧ. Значения намагниченности насыщения МНЧ и магнитного кондуита составляют 61,9 ± 0,3 и 7,4 ± 0,1 эме/г соответственно. В ходе механических испытаний на растяжение установлено повышение пластичности композитных кондуитов в сравнении с кондуитами из чистого ПОБ. Это следует из снижения модуля Юнга композита от 468 ± 11 до 221 ± 52 МПа и усиления удлинения до разрыва от 17,9 ± 3,6 до 28,6 ± 2,9 %.

Проведенные исследования демонстрируют потенциал использования разработанных магнитоактивных кондуитов в клинической терапии повреждений ПНС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 20-63-47096).

1. Zarrintaj P. et al. Conductive biomaterials as nerve conduits: recent advances and future challenges // Appl. Mater. Today. 2020. Vol. 20. P. 100784.

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. Р. А. Сурменев

ХИМИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 523.429.22

Использование тритильного радикала для исследования спинового кроссовера в комплексе железа

А. В. Бородулина

Новосибирский государственный университет

Спин-кроссовер в комплексах железа, представляющий собой гистерезисное переключение между высокоспиновым и низкоспиновым состояниями, при изменении температуры влечет за собой изменения многих физических свойств, в том числе и магнитных. Однако непосредственное исследование подобных соединений с помощью ЭПР-спектроскопии в X-диапазоне невозможно. В данной работе предлагается метод регистрации переключения спинового состояния с помощью ЭПР-спектрометра и бесконтактного спинового зонда на основе тритильного радикала. Данный метод основан на том, что при переходе в высокоспиновое состояние исследуемый комплекс железа приобретает парамагнитные свойства и искажает поле спектрометра. Тогда определенный по стационарному ЭПР-спектру эффективный g-фактор тритильного радикала, окруженного данным комплексом, меняет свое значение.

В данной работе было зарегистрировано температурное переключение спинового состояния в комплексе железа $[FeL_2][BF_4]$[L = 2,6-di(pyrazol-1-yl)pyridine]. Величина отклонения эффективного g-фактора тритильного радикала была оценена теоретически и рассчитана с помощью компьютерного моделирования и магнитометрических данных о намагниченности комплекса [1]. Экспериментально температурная зависимость эффективного g-фактора была получена из моделирования стационарных ЭПР-спектров, полученных в выбранном диапазоне температур. Эксперименты были проведены на ЭПР-спектрометре, образец был подготовлен таким образом, чтобы ампула с тритильным радикалом была окружена исследуемым комплексом, измерение температуры осуществлялось при помощи термопары, расположенной около порошка исследуемого комплекса. В результате переключение спинового состояния при температуре ~ 257 K было зарегистрировано. Величина эффекта оказалась сопоставима с теоретическими оценками и составила ~ 10^{-4}.

1. Holland J. M., McAllister J. A., Lu Zhibao et al. An unusual abrupt thermal spin-state transition in [FeL2][BF4]2 [L = 2,6-di(pyrazol-1-yl)pyridine]Electronic supplementary information (ESI) available: tabulated and plotted unit cell dimensions for 1 between 240–300 K // Chem. Commun. 2001. P. 577–578. DOI: 10.1039/b100995h.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. Л. Вебер

УДК 544.27

Изучение водных растворов ТГФ методом молекулярной динамики

А. В. Ведькал

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

Изучение структуры растворов является важной задачей, поскольку растворы окружают нас повсеместно. В них проходят большинство химических реакций, которые используются во многих сферах промышленности. Протекание этих реакций напрямую зависит от свойств и структуры растворов. Все биологические процессы также протекают в растворах. Современные экспериментальные методы не позволяют взглянуть на раствор на молекулярном уровне. С этим помогают компьютерные модели и современные методы моделирования, в первую очередь метод молекулярной динамики. Они позволяют получить координаты всех атомов в любой момент времени, т. е. дают полную информацию о их строении. Однако для анализа таких моделей необходимо развивать новые методы, которые позволят получать физико-химическую информацию из набора координат атомов.

Цели данной работы — получение моделей водных растворов ТГФ, хорошо описывающих экспериментальные свойства, и изучение их структуры и объемных свойств методом Вороного.

В результате исследования были получены МД-модели растворов ТГФ, вычислены собственные объемы молекул компонентов и распределения по количеству их соседей каждого типа (растворитель, растворенное вещество) в зависимости от концентраций. Также были посчитаны объемные характеристики: мольный объем, избыточный мольный объем, кажущийся мольный объем и парциальный мольный объем компонентов в зависимости от концентрации, они были выражены через собственные объемы молекул, и были рассчитаны вклады каждого из компонентов раствора в них. Показано, что поведение объемных характеристик определяется в первую очередь вкладом воды при всех концентрациях.

Научный руководитель — канд. хим. наук Е. Д. Кадцын

УДК 539.2

Исследование комплексов фталоцианинов с человеческим сывороточным альбумином с помощью ЭПР-спектроскопии

С. А. Дементьев

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Одним из перспективных подходов к лечению злокачественных новообразований является фотодинамическая терапия. При облучении фотосенсибилизатор (ФС) переходит в триплетное состояние и генерирует активные формы кислорода, при этом $^1O_2$ обладает наибольшей реакционной способностью. Одними из эффективных ФС являются фталоцианины из-за высокого квантового выхода $^1O_2$ и высокой молярной абсорбции в диапазоне 600 ÷ 700 нм. Однако, как правило, наиболее эффективные ФС склонны к агрегации в физиологических средах. Человеческий сывороточный альбумин (ЧСА) является самым распространенным белком в плазме крови, имеет множество сайтов связывания и является эффективным носителем различных ФС. Локализация ФС в ЧСА влияет на фотофизические свойства ФС, в связи с чем актуальной задачей является установление корреляции между сайтом связывания ФС с ЧСА и эффективностью генерации $^1O_2$.

В данной работе были проведены исследования эффективности генерации $^1O_2$ ряда катионных фталоцианинов с различными боковыми заместителями. Данные соединения были синтезированы проф., д-ром хим. наук Ю. Г. Горбуновой в лаборатории ИФХЭ РАН. Исследования проводились при стационарном фотолизе с использованием светодиода при комнатной температуре в оптической кювете. $^1O_2$ детектировался с помощью водорастворимой спиновой ловушки TAAN. Также проводилось исследование локализации фталоцианинов в ЧСА с помощью дипольной ЭПР-спектроскопии. Измерение расстояний проводилось между триплетным состоянием фталоцианина, связанным с альбумином, и нитроксильным радикалом, селективно введенным в цистеин-34 ЧСА. Для всех исследуемых образцов характерно неспецифическое связывание с альбумином: распределения по расстояниям содержат широкий набор расстояний.

Научные руководители — Н. Э. Санникова, канд. физ.-мат. наук О. А. Крумкачева

УДК 543.4

Изучение температурной зависимости упругих свойств гидратированных планарных слоев фосфолипидов методом рассеяния Мандельштама – Бриллюэна

Е. А. Добрынина

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

Мембраны клеток сформированы преимущественно из фосфолипидных молекул, состоящих из полярной головки и гидрофобного углеводородного хвоста, которые в присутствии воды формируют двойной слой. Биологические мембраны имеют сложную структуру, поэтому в настоящее время для изучения клеточных процессов используются модельные мембранные системы. В зависимости от температуры бислой может находиться в состоянии геля (углеводородные хвосты упорядочены) либо в разупорядоченном состоянии флюида. Температура перехода (T_m) из гелевого состояния во флюидное зависит от вида фосфолипидной молекулы и является важной характеристикой бислоя.

Вязкоупругие свойства материала (скорость звука и гигагерцовый упругий модуль) являются важными характеристиками объекта и могут быть получены с помощью спектроскопии рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (РМБ). Упругие свойства липидных систем чувствительны к составу, неоднородностям, фазовому и конформационному состояниям и могут быть успешно применены в ряде исследовательских задач. Как правило, при исследовании липидных систем объектами исследования является водная суспензия многослойных везикул. Для уменьшения водяного вклада и детального моделирования клеточной мембраны применяются упорядоченные планарные системы, позволяющие измерять эффекты поперек и вдоль бислоев липидов.

В настоящей работе были исследованы упругие свойства упорядоченных слоев насыщенного фосфолипида DMPC и ненасыщенного DOPC методом РМБ в широком диапазоне температур от 90 до 320 К в латеральном и ортогональном направлениях. Полученные результаты показали сложное поведение скорости звука при низких температурах, что указывает на эффекты дополнительного упорядочения углеводородных хвостов при температурах ниже T_m [1]. Характер температурных зависимостей скоростей звука для различных направлений схож, что опровергает гипотезу о слабой зависимости упругих свойств в латеральном направлении для липида DMPC, выдвинутую в работе [2], в сравнении с данными для везикул. Упругие свойства вдоль слоев для DMPC и DOPC совпадают внутри гелевой фазы (ниже T_m) и во флюидной фазе обоих фосфолипидов.

1. Zaytseva Y. V. Raman study of temperature-induced hydrocarbon chain disorder in saturated phosphatidylcholines // Chem. Phys. Lipids. 2020. Vol. 230. 104926.

2. Zykova V. A. Effect of the Hydrocarbon Chain Disorder in Phosphatidylcholine Bilayers on Gigahertz Sound Velocity // J. Phys. Chem. B. 2020. Vol. 124 (41). P. 9079–9085.

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

УДК 537.6

Применение импульсов заданной формы в ЭПР для спиновых пар разного типа

М. И. Колоколов

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Структурная биология занимает важную область в науке о жизни, раскрывая взаимосвязь между строением биологических молекул и их свойствами. Одним из методов структурной биологии является техника электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), которая отличается возможностью исследования распределения конформаций молекул. Важной вехой в развитии метода стало использование импульсных последовательностей, с помощью которых можно получить дополнительную информацию о внутренних взаимодействиях. Последней инновацией в этой области являются импульсы заданной формы, в которых частота и амплитуда — произвольные функции от времени, что позволяет точно контролировать эволюцию спина. Их главными преимуществами, по отношению к прямоугольным импульсам, являются широкая полоса возбуждения (до 1 ГГц и более) и компенсация неоднородности магнитного поля [1]. Это приводит к увеличению глубины модуляции, что позволяет повысить чувствительность ЭПР-экспериментов в несколько раз. Увеличение полосы возбуждения также позволяет проводить эксперименты с полным возбуждением спектров ЭПР.

Целью данной работы являлось внедрение импульсов заданной формы в коммерческий ЭПР-спектрометр Bruker, работающий в X- и Q-диапазонах. Описана экспериментальная установка AWG, позволяющая генерировать импульсы заданной формы на гигагерцовых частотах. Описаны технические трудности, ограничивающие эффективность импульсов заданной формы, и способы их решения. Описана процедура оптимизации параметров импульсов.

После интеграции модуля были проведены эксперименты ДЭЭР с использованием AWG на органических молекулах, меченых спиновыми парами нитроксил-нитроксил и нитроксил-медь. Проведенные эксперименты показали повышение чувствительности адиабатических импульсов по сравнению с прямоугольными в 1,7–2,3 раза, что позволяет значительно сократить время экспериментов ЭПР.

1. Spindler P. E., Zhang Y., Endeward B. et al. Shaped Optimal Control Pulses for Increased Excitation Bandwidth in EPR // J. Magn. Reson. 2012. Vol. 218. P. 49–58.

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

УДК 543.4

Исследование упругих свойств гидрогелей на основе желатина методом спектроскопии рассеяния Мандельштама – Бриллюэна

А. В. Лактионова

Новосибирский государственный университет

Гидрогели представляют собой трехмерные полимерные сетки, образованные посредством топологической, электростатической или ковалентной сшивок из гидрофильных мономеров. Благодаря особой структуре сетки вода эффективно заполняет внутрипоровое пространство, тем самым влияя на упругие свойства материала. Гидрогели на основе желатина широко используются в тканевой инженерии, в моделировании биологоческих тканей, а также в лабораториях как среда для культивирования клеток. Важным параметром геля при его использовании в вышеперечисленных областях является модуль упругости, характеризующий его механические свойства, значения которого напрямую зависят от содержания водной компоненты. Применение сшивающих агентов, таких как глутаровый альдегид (ГА), в задачах тканевой инженерии и при подготовке биоимплантов с целью уменьшения их биодеградации также оказывает заметное влияние на упругие свойства гидрогеля.

Спектроскопия рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (РМБ) — бесконтактная неинвазивная методика, позволяющая получать информацию об упругих характеристиках материала (скорости звука и упругом модуле) в гигагерцовом частотном диапазоне. Указанная методика хорошо зарекомендовала себя при исследовании различных биологических объектов и может быть успешно применена при исследовании гидрогелевых образцов.

Настоящая работа посвящена изучению возможностей РМБ для исследования гидрогелей на основе желатина и влияния ГА на упругие свойства биополимера. Для разработки протокола исследования и анализа влияния сшивающих агентов и степени гидратации материала на его свойства были приготовлены гидрогелевые пленки с различным содержанием воды, а также с различной концентрацией ГА. Варьирование водной составляющей осуществлялось путем изменения влажности окружающего воздуха. Для изменения концентрации ГА менялось время выдержки образца над парами альдегида.

Из анализа спектров РМБ следует, что степень гидратации гидрогеля сильно влияет на его упругие свойства — при изменении содержания водной компоненты от полностью гидратированного образца до дегидратированного наблюдается увеличение скорости звука в гидрогеле более чем в два раза. Также была получена зависимость скорости звука в гидрогеле от времени выдержки над парами ГА.

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

УДК 577, 539.2

Изучение роли ионизируемых групп в каталитическом механизме гликозилазы Fpg

И. А. Литвинов

Новосибирский государственный университет
Новосибирский институт органической химии
им. Н. Н. Ворожцова СО РАН

Fpg является важным ферментом для процесса репарации оснований ДНК у бактерий. Он распознает и удаляет из ДНК окисленные гетероциклические основания пуринового ряда. В активном центре данного белка находится фрагмент Pro1-Glu2, играющий ключевую роль в его гликозилазной активности. Мутация любого аминокислотного остатка в этом фрагменте приводит к полной потере активности Fpg к субстратам. Предполагается, что Glu2 выступает в реакциях, катализируемых Fpg, в качестве донора протона, поэтому данные о зарядовом состоянии этого остатка необходимы для установления его роли в каталитическом механизме. Методом молекулярной динамики было показано, что мутация E2Q, в которой Glu2 заменен на Gln2, приводит к значительным изменениям электростатических взаимодействий в активном центре фермент-субстратного комплекса [1].

Цели настоящей работы — экспериментально установить состояние ионизации активного центра для белка Fpg дикого типа и инактивированного мутанта E2Q и выявить различия. Для этого был применен метод ЭПР с использованием имидазолиновой нитроксильной спиновой метки, чувствительной к физиологическому диапазону pH, которая вводилась на 5’- или 3’-концы олигонуклеотидов. Чтобы измерить pH внутри активного центра фермент-субстратного комплекса, были сформированы специальные конструкции ДНК-дуплексов с одноцепочечным разрывом, к которым Fpg обладает специфическим сродством. ДНК-дуплексы формировали так, чтобы спиновая метка попадала в место разрыва и оказывалась внутри активного центра Fpg в фермент-субстратном комплексе. В данной работе измерены значения pH в комплексах Fpg и ДНК-дуплексов, а методом модуляции спинового эха (ESEEM) изучена доступность воды в активном центре фермента.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-14-00219).

1. Perlow-Poehnelt R. A., Zharkov D. O., Grollman A. P. et al. Substrate discrimination by formamidopyrimidine-DNA glycosylase: Distinguishing interactions within the active site // Biochem. 2004. Vol. 43, No. 51. P. 16092–16105.

Научные руководители — С. С. Овченко, канд. хим. наук А. В. Шернюков

УДК 539.2

Влияние окислительного повреждения oxoG:A на стабильность ДНК-дуплекса

Д. М. Насонов

Новосибирский государственный университет

ДНК живых организмов повреждается по ряду причин: из-за окислительного стресса, солнечной радиации, ионизирующего излучения естественного и искусственного происхождения и т. д. Без хорошо отлаженной системы репарации накопление повреждений в ДНК может привести к развитию рака, различным наследственным заболеваниям и преждевременному клеточному старению. Следовательно, изучение процессов, моделирующих репарацию ДНК, является актуальной задачей.

Одним из наиболее распространенных повреждений ДНК является 8-оксо-7,8-дигидрогуанин (8-оксогуанин, oxoG) — соединение, образующееся в результате модификации гуанина активными формами кислорода [1]. При этом какие-либо экспериментальные данные о динамике пар oxoG:A в литературе отсутствуют. Цели данной работы — получить информацию о кинетике процесса открытия-закрытия пары oxoG:A и определить, как наличие этого повреждения влияет на термодинамическую стабильность ДНК-дуплекса. Результаты исследования могут быть полезными для изучения механизма раннего распознавания повреждения oxoG ферментом ДНК-гликозилазой.

Химический обмен иминопротонов с протонами воды, наблюдаемый в спектрах ЯМР, связан с процессом открытия-закрытия пар оснований. Информацию о кинетике последнего можно извлечь из зависимости скорости обмена от концентрации катализатора DFEA. В работе для получения кинетических констант обмена использована модифицированная методика ЯМР CLEANEX. Определены термодинамические свойства дуплекса с повреждением, такие как температура и энтальпия плавления. Показано, что иминопротон пары oxoG:A в открытом состоянии является существенно более доступным, чем в паре oxoG:C [2]. Присутствие в дуплексе пары oxoG:A оказывает бóльший термодинамически дестабилизирующий эффект, чем пары oxoG:C. Эти различия могут играть важную роль в процессе поиска ДНК-гликозилазами повреждения oxoG.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-14-00219).

1. Free-Radical-Induced DNA Damage and Its Repair: A Chemical Perspective / von Sonntag C. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. 523 p.
2. Dynamics of 8-oxoguanine in DNA: Decisive effects of base pairing and nucleotide context / Ovcherenko S., Shernukov A., Nasonov D. et al. // J. Am. Chem. Soc. in press in March 2023.

Научные руководители — С. С. Овчеренко, канд. хим. наук А. В. Шернюков

УДК 543.4

Характеризация метаболизма клеток дрожжей методом комбинационного рассеяния света дейтерированных меток

А. Н. Омельченко

Новосибирский государственный университет

Вода участвует во многих метаболических процессах в клетке. Замещение обычной воды на тяжелую позволяет отслеживать водородный обмен во внутриклеточных реакциях и детектировать молекулы, синтезируемые в клетке. Получить информацию об этих соединениях помогает метод комбинационного рассеяния света дейтерированных меток (d-КРС), который является неразрушающим и неинвазивным и применим к исследованию одиночных клеток. Однако количество исследований, посвященных КРС клеток, культивируемых в присутствии D_2O, остается малым, и данный метод нуждается в дальнейшем развитии для исследования метаболических путей.

Данная работа направлена на демонстрацию возможностей спектроскопии d-КРС для характеризации клеточного дыхания на примере дрожжевых клеток, культивируемых в присутствии тяжелой воды. Развитие клеток происходило в аэробных и анаэробных условиях при разной концентрации D_2O.

В результате работы были обнаружены дейтерированные вещества, которые, предположительно, отвечают новосинтезированным липидам и белкам с одиночными замещениями H/D при аэробном культивировании. В анаэробном случае наблюдается синтез молекул тяжелого этанола с замещениями H/D. При этом накопление дейтерированных молекул при культивировании клеток в аэробных условиях примерно в 15 раз интенсивнее, чем в анаэробных. Было замечено, что при увеличении концентрации D_2O в спектрах КРС растут пики, отвечающие дейтерированным соединениям. Кроме того, показано, что при высоких концентрациях D_2O в спектрах появляются дополнительные пики, свидетельствующие о замещениях H/D целых метиленовых и метильных групп. Данные согласуются с результатами расчетов спектров КРС частично дейтерированных соединений.

Таким образом, в работе показано, что использование метода d-КРС позволяет детектировать меченые метаболиты, полученные при культивировании клеток в тяжелой воде, и характеризовать их метаболическую активность. Применение численных расчетов является полезным подходом, помогающим идентифицировать частично дейтерированные соединения, образующиеся в процессе клеточного метаболизма.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Окотруб

УДК 544.034

Эффект удерживания летучих соединений в метаболомных экстрактах

Н. А. Осик

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

В настоящее время метаболомное профилирование тканей животных является актуальной задачей, а сама метаболомика продолжает активно развиваться. Важным шагом в подготовке биологических образцов в количественной метаболомике является высушивание экстрактов для смены растворителя или концентрирования, в особенности при использовании ЯМР-спектроскопии. На данном этапе подготовки образцов летучие метаболиты (например, ацетон, этанол, уксусная и муравьиная кислоты) могут частично или полностью испаряться из экстракта, что заметно усложняет интерпретацию полученных результатов.

Цели данной работы — установить механизм удерживания летучих соединений в метаболомных экстрактах в процессе ротационно-вакуумного высушивания и оценить достоверность получаемых значений концентрации в экспериментах.

Исходная гипотеза заключалась в формировании в процессе дегидратации образца кристаллической матрицы из солей и метаболитов, которая удерживает летучие соединения. Для проверки гипотезы были исследованы следующие модельные системы: 1) вода, метанол, летучие соединения; 2) 1%-й водный раствор соли, метанол, летучие соединения; 3) реальный экстракт сыворотки крови человека с добавлением летучих соединений. В качестве летучих метаболитов были выбраны ацетон, ацетонитрил, этанол, муравьиная и уксусная кислоты. Ни в одной из исследуемых систем после высушивания не удалось обнаружить ацетон, этанол и ацетонитрил. Из летучих соединений в сухих образцах были обнаружены только хлороформ и метанол из растворителей, а также остатки уксусной и муравьиной кислот. В отсутствие солей задерживается до 10 % от исходной концентрации кислот, тогда как в соляном растворе и в реальном экстракте остается до 100 %. При этом доля кислот в остатке зависит от содержания солей, а различия в модельной системе с раствором соли и реальным экстрактом сыворотки крови минимальны.

Органические кислоты частично диссоциируют в растворе, и за счет своей ионной формы остатки задерживаются в экстракте во время высушивания. Ионная сила раствора и его pH являются ключевыми показателями для удержания кислот в экстракте, поскольку напрямую влияют на долю депротонированной формы.

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

УДК 535.343.4

Детектирование гидроксильного радикала методом FRS при помощи полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью

Д. М. Пластинина

Новосибирский государственный университет

Для изучения кинетики элементарных химических реакций важным является развитие времяразрешенных методов детектирования свободных радикалов. Свободные радикалы — высокоактивные промежуточные продукты реакций горения, атмосферных химических реакций и т. д. Молекулы свободных радикалов обладают магнитным моментом, поэтому их колебательно-вращательные спектры чувствительны к магнитному полю.

В данной работе для детектирования OH-радикала мы использовали высокочувствительный метод *Faraday Rotational Spectroscopy* (FRS), основанный на вращении плоскости поляризации лазерного излучения из-за возникновения вращательного магнитного дихроизма на линиях поглощения парамагнитных молекул.

Частота излучения лазерного диода с распределенной обратной связью (DFB) перестраивалась изменением температуры. Для настройки лазера на линию поглощения OH (6971,392 $см^{-1}$) использовались реперные линии водяного пара.

Радикалы OH получались в фотохимической реакции, инициируемой импульсным УФ-лазером. Наблюдались сигналы поглощения гидроксильным радикалом, величина которых была порядка 10^{-3}. Сечение поглощения на этой линии известно $5 \cdot 10^{-19}$ $см^2$, что позволяет определять концентрация OH. Время жизни радикалов составляло около 10^{-3} с.

Для изучения эффекта поворота поляризации в магнитном поле использовались два поляризатора. Они были переведены в скрещенное положение, что дало возможность определить зависимость угла поворота плоскости поляризации от времени.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с помощью лазерного диода на 6971 $см^{-1}$ можно проводить кинетические измерения при концентрациях радикалов OH менее 10^{-14} $см^{-3}$ (10^{-7} моль/л). Высокая чувствительность обусловлена хорошими шумовыми свойствами DFB лазерного диода. В методике FRS при таких концентрациях возникает величина угла поворота 10^{-3} рад. В перспективе поляризационный метод позволит измерять на несколько порядков меньшие углы поворота. Таким образом, открывается возможность детектирования в близлежащей для перестраиваемого диапазона области и иных свободных радикалов.

Научный руководитель — д-р хим. наук Е. Н. Чесноков

УДК 539.2

Исследование новых спиновых ловушек синглетного кислорода с улучшенными функциональными свойствами методами ЭПР-спектроскопии

Р. А. Подаров

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр, Новосибирск

Генерация синглетного кислорода ($^1O_2$) фотосенсибилизатором (ФС) является классическим примером фотоиндуцированного переноса энергии: после поглощения света ФС переходит в возбужденное триплетное состояние, которое способно генерировать активные формы кислорода, при этом наиболее реакционноспособной формой является $^1O_2$. Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) может быть использована для детекции синглетного кислорода в нативных условиях. Для определения фотосенсибилизаторной активности в данном методе используются специальные диамагнитные молекулы — «спиновые ловушки», которые вступают в реакцию с кислородом с высокой константой скорости, образуя стабильные радикалы. Актуальной задачей является поиск «идеальной» спиновой ловушки, которая отвечает следующим требованиям: высокий сигнал ЭПР при малых концентрациях ловушки, высокая константа скорости реакции с синглетным кислородом, а также отсутствие влияния на pH раствора.

В данной работе были проведены исследования эффективности генерации $^1O_2$ с использованием модельного порфирина с применением ряда различных спиновых ловушек различного химического строения при стационарном фотолизе в водном растворе. Соединения были синтезированы проф., канд. хим. наук И. А. Кирилюком в лаборатории азотистых соединений института органической химии им. Н. Н. Ворожцова. Были зарегистрированы кинетики образования стабильных радикалов при различных соотношениях концентраций порфирина и спиновой ловушки. Также были проведены исследования изменения pH буфера при различных концентрациях спиновых ловушек до и после облучения. По полученным данным были отобраны соединения с оптимальными для детекции синглетного кислорода свойствами.

Научные руководители — Н. Э. Санникова, канд. физ.-мат. наук О. А. Крумкачева

УДК 539.196.5

Изучение процессов распада синглетного экситона в димерах тетрацена

В. М. Роговешко

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

Эффективное преобразование солнечной энергии в электрическую является важной задачей мировой энергетики, однако теоретический предел КПД современных солнечных элементов составляет всего 34 %. Эффективность этого процесса можно повысить до 44 % [1] использованием процесса деления синглетного экситона (ДСЭ), который может происходить в димерах полиаценов, в частности в димерах тетрацена. Этот эффект достигается за счет образования двух носителей заряда вместо одного. Конкуренцию этому процессу составляет S-T-конверсия в димерах, не дающая выигрыш в КПД солнечных элементов.

Для исследования ДСЭ используются преимущественно пленки или кристаллы тетрацена [2], где велико влияние окружения на характеристики молекул, из-за чего затруднена интерпретация. Данная работа посвящена изучению процессов распада синглетных экситонов в димерах тетрацена в холодном молекулярном пучке, где влияние окружения отсутствует. Для возбуждения и ионизации тетрацена и его димеров использовалась резонансно усиленная многофотонная ионизация РУМФИ(1+1`), обеспечиваемая двумя наносекундными лазерами с перестраиваемой длиной волны.

Вариация времени задержки между возбуждающим и ионизирующим излучениями в совокупности с измерением спектра фотоионизации фрагментов распада димеров позволила определить электронные состояния тетрацена, образующиеся в результате распада синглетного экситона. Выявлены короткоживущее и долгоживущее состояния тетрацена, последнее из которых соответствует состоянию, определяемому в литературе как «темное», так как не флуоресцирует. Отсутствие короткоживущей компоненты в продуктах распада димеров говорит о том, что она превращается в долгоживущую за очень быстрые времена. По данным Хоше и др. [3], время жизни димера тетрацена в рассматриваемом возбужденном состоянии составляет около 200 пикосекунд, что намного меньше времени S-T-конверсии короткоживущей компоненты в долгоживущую в мономере тетрацена — 50 нс. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что на используемой длине волны возбуждения димера тетрацена 455 нм не происходит ДСЭ, в димере происходит S-T-конверсия, существенно более быстрая, чем в мономере, которая и является источником «темных» долгоживущих состояний.

1. Hanna M. C., Nozik A. J. Solar conversion efficiency of photovoltaic and photoelectrolysis cells with carrier multiplication absorbers // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100 (7). 074510.

2. Smith M. B., Michl J. Recent advances in singlet fission // Annu. Rev. Phys. Chem. 2013. Vol. 64. P. 361–386.
3. Hoche J., Flock M., Miao X. et al. Excimer formation dynamics in the isolated tetracene dimer // Chem. Sci. 2021. Vol. 12. 11965.

Научный руководитель — д-р хим. наук, проф. А. В. Бакланов

УДК 536.461

Исследования огнестойкости эпоксидной смолы с добавками антипиренов DOPO и графена

А. Р. Сагитов

Новосибирский государственный университет
Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

Эпоксидная смола (ЭС) широко используется в качестве покрытий, композиционных материалов и клеев благодаря исключительным механическим свойствам, подходящей химической и термической стойкости. Однако ЭС обладает высокой пожароопасностью при использовании в транспортной промышленности (самолеты, поезда, корабли и т. д.) из-за низкой огнестойкости. При горении ЭС наблюдается высокая скорость выделения тепла и дыма, что может привести к серьезным последствиям. По этой причине в последнее время в мировой индустрии и науке уделяется внимание модификации ЭС для повышения ее огнестойкости.

В настоящее время добавление антипиренов к ЭС является эффективным и широко распространенным способом повышения ее огнестойкости. С ростом внимания к защите окружающей среды наблюдается тенденция к разработке экологически чистых и нетоксичных антипиренов для полимерных материалов, в том числе ЭС. Современной альтернативой галогеновых антипиренов являются фосфорсодержащие антипирены. В связи с этим многие современные исследования посвящены изучению антипирена 9,10-дигидро-9-окси-10-фосфафенантрен-10-оксида (DOPO). В настоящее время получают распространение также антипирены на основе наночастиц — фуллерены, углеродные нанотрубки, наносиликаты и др. Однако в научной литературе содержится недостаточно данных по влиянию ДОПО и графена на горючесть ЭС, а также их взаимному влиянию на огнезащитные свойства.

Цели данной работы — исследование огнестойкости эпоксидной смолы без добавок антипиренов, с добавками графена и модификацией DOPO в лабораторных условиях с помощью тестов на горючесть UL-94, кислородного индекса, тестов в конусном калориметре и изучение влияния антипиренов на скорость окислительной деструкции под действием внешнего теплового излучения. Эксперименты по определению скорости линейного пиролиза проводились под конусным нагревателем и сравнивались с моделированием разложения с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом Gpyro. Входными данными для моделирования были кинетические параметры термического разложения ЭС, определенные с помощью генетического алгоритма, реализованного в Gpyro, для данных термогравиметрического анализа. Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения DOPO и графена для повышения огнестойкости ЭС. Более того, был обнаружен синергетический эффект повышения огнестойкости смесью данных антипиренов из-за разного механизма их действия.

Научный руководитель — С. А. Трубачев

УДК 543.429.22

Исследование термически индуцированной релаксации в дирадикалах методом ЭПР-спектроскопии

А. А. Самсоненко

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Наличие обменного взаимодействия между двумя неспаренными электронами приводит к формированию синглетного и триплетного состояний этих электронов. Методы стационарной и импульсной ЭПР-спектроскопии позволяют исследовать релаксацию внутри триплета, в совокупности же с мощным источником терагерцового излучения они позволяют проводить измерения релаксации между синглетным и триплетным состояниями. Терагерцовое излучение в таком эксперименте используется для резкого нагрева образца и создания таким образом неравновесной заселенности, а методы ЭПР-спектроскопии позволяют детектировать кинетику процесса релаксации.

Мощным источником тегарецового излучения является Новосибирский лазер на свободных электронах. Он позволяет получать монохроматическое излучение в широком диапазоне длин волн (от 5 до 240 мкм). Станция ЭПР-спектроскопии Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ) позволяет проводить стационарные, импульсные и времяразрешенные эксперименты и тем самым осуществлять характеризацию широкого класса магнитоактивных соединений.

Наличие антиферромагнитного взаимодействия небольшой величины (J/k ~ −20K) между неспаренными электронами — одно из свойств, которыми должен обладать образец, чтобы существовала экспериментальная возможность детектировать релаксацию между его синглетным и триплетным состояниями. В данной работе методами ЭПР-спектроскопии произведен первичный отбор соединений с подходящим значением константы обменного взаимодействия. На станции ЭПР-спектроскопии ЛСЭ проведены измерения термически индуцированной релаксации.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук С. Л. Вебер

УДК 556.113 + 577.3

Жидкая фаза воды в невесомости и возможные биологические индикаторы некоторых ее физических свойств

Г. К. Симонян

Московский государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана

Анализ данных, вытекающий из современных представлений о физике жидкой фазы H_2O, выявляет целый ряд предпосылок к обоснованию возможности температурного сдвига для *особых термодинамических точек* воды, в зависимости от значения *g* силы тяжести. Важность экспериментальной проверки гипотезы методом прямых измерений, ряда термодинамических характеристик воды и особых точек Max плотности и Min теплоемкости продиктована большим количеством следствий, к которым может привести обнаружение данного эффекта в самых разных областях естественных наук и инженерии [1].

Подтверждение гипотезы о температурном сдвиге особых точек воды в условиях микрогравитации может оказать влияние на физику воды, химию, биологию, космическую медицину, энергетику. Особый интерес представляет влияние данного фактора на процессы физиологической адаптации живых организмов в этих условиях.

В невесомости происходит включение функций адаптации, начиная уже с клеточного уровня. В рамках обоих принципов *Гомеостаза* и *Энантиостаза* адаптивные механизмы будут включать в себя новые типы или сценарии биохимических реакций в организме. Ход реакций будет прямо связан с активностью кластерной самоорганизации жидкой фазы воды, влияющей на индукцию водородных связей, в том числе и с органическими соединениями в растворах. Если температурные сдвиги особых точек воды в невесомости существуют, то разница в механизмах гидратации [2] биомолекулами молекул воды неизбежна.

Уже сейчас есть ряд физиологических проявлений, которые на своем физическом уровне могут быть связаны с описанными выше процессами. Пока они имеют иные интерпретации и содержат много противоречий. К таким проявлениям отнесем:

1) гипертермию космонавтов [3–4];

2) физиологические отклонения у медуз в невесомости [5];

3) данные по колониям патогенов *in vitro* (сальмонелла, кишечная палочка).

Особый интерес могут представлять *не проводившиеся* до сих пор исследования синовиальной жидкости космонавтов и различия в длинах цепочек молекул *гиалуронана* в ней.

Возможно, уже сейчас некоторые особенности физиологических проявлений у живых организмов в невесомости являются биологическими индикаторами, указывающими на то, что температурная шкала особых термодинамических точек воды зависит от *g*, и в условиях невесомости ее сдвиг может быть обнаружен.

1. Симонян Г. К. Теоретические обоснования возможности температурных сдвигов особых термодинамических точек жидкой фазы воды, в условиях невесомости, на примере аномальных критических точек максимальной плотности и минимальной теплоемкости H_2O // Конкурс «Орбита молодежи — 2022» — Роскосмос, сб. тез., Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. по перспективам развития рос. космонавтики. 2022. С. 281–282.
2. Пеньков Н. В. Терагерцовая динамика воды в гидратных оболочках биомолекул: сб. тр. // 12-я Всерос. конф. «Необратимые процессы в природе и технике»; МГТУ им. Н. Э. Баумана, ФИАН им. Лебедева РАН. 2023.
3. Сообщения дискуссионного клуба «Открытия Российских ученых», секция «Медицина», 05.01.2018. URL: https://indicator.ru/medicine/nevesomost-temperatura-tela-05-01-2018.html.
4. Stahn A. C., Werner A. et al. Increased core body temperature in astronauts during long-duration space missions // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Article number: 16180.
5. Spangenberg D. B., Jernigan T., McCombs R. et al. Development Studies Of Aurelia (Jellyfish) Ephyrae Which Developed During The Sls-1 Mission // Adv. Space Res. 1994. Vol. 14, No. 8. P. 239–247.

Научный руководитель — канд. техн. наук, доц. А. И. Плохих

УДК 539.2

Исследование комплексов катионных порфиринов с аптамером AS1411 методами ЭПР и оптической спектроскопии

Т. А. Хлынова

Новосибирский государственный университет
Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск

Фотодинамическая терапия — один из наиболее перспективных методов лечения онкологических заболеваний, основанный на использовании фотосенсибилизаторов (ФС) — фоточувствительных молекул, которые при облучении переходят в возбужденное триплетное состояние, способное генерировать активные формы кислорода, при этом наиболее реакционноспособной формой является ($^1O_2$). Порфирины и их производные активно используются в качестве ФС высокого квантового выхода $^1O_2$. Однако большинство эффективных ФС склоны к агрегации в водных растворах и не имеют селективности к раковым клеткам. Данную проблему можно решить использованием целевых средств доставки.

AS1411 — это богатый гуанином олигонуклеотид ДНК, аптамер белка нуклеолина, обнаруженного в высоких концентрациях на поверхности раковых клеток. AS1411 способен образовывать различные G-квадруплексные структуры, четырехцепочечные спирали, где четыре гуаниновых основания образуют плоскую структуру, удерживаемую парными взаимодействиями двух гуанинов. Связывание ФС с G-квадруплексами может повлиять на свойства порфиринов, поэтому понимание механизмов данного взаимодействия открывает новые перспективы создания ФС на основе G-ДНК.

В данной работе были проведены исследования катионных порфиринов (C_3Py и C_5Py) с различной длиной боковых цепей в комплексе с олигонуклеотидом AS1411. В оптических спектрах был зарегистрирован интересный эффект: при соотношении концентраций порфиринов и ДНК 3:1 наблюдается значительное (в 7 раз для C_3Py и в 10 раз для C_5Py) увеличение способности поглощения света в длинноволновой области (650–700 нм). Для Zn-содержащих производных C_3Py и C_5Py аналогичный эффект не наблюдался. Для понимания природы данного эффекта мы обратились к структурной информации комплекса. С помощью методов дипольной ЭПР-спектроскопии было обнаружено, что образование комплекса с катионными порфиринами стабилизирует димерные структуры AS1411.

Работа выполнена при поддержке фонда РНФ (№ 20-73-10239).

Научный руководители —
канд. физ.-мат. наук О. А. Крумкачева, канд. физ.-мат. наук Н. Э. Санникова

УДК 536.461

Экспериментальное и теоретическое изучение химии образования катионов в пламени диметилового эфира

А. В. Черепанов

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

Ионы образуются в пламени в результате реакции хемиионизации. Детальное изучение процессов образования и взаимодействия заряженных частиц имеет важное значение для развития и создания новых методов диагностики и ионно-чувствительных технологий для управления процессами горения.

В данной работе методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии измерено пространственное распределение положительных ионов (катионная структура) в пламени предварительно перемешанной смеси диметиловый эфир/кислород/аргон в широком диапазоне коэффициентов избытка горючего $\phi = 0{,}5 \div 1{,}5$, стабилизированном на плоской горелке при атмосферном давлении. Выбор диметилового эфира в качестве топлива обусловлен экологическими соображениями. Также были проведены численные расчеты катионной структуры пламени с применением программного обеспечения Cantera 3.0 [1]. Для расчетов использован детальный кинетический механизм, включающий реакции с участием заряженных частиц, построенный на основе доступных в литературе моделей и дополненный реакциями для катионов $C_2H_3^+$, CH_3O^+, $[H_3COCH_3]H^+$, термохимические данные которых были рассчитаны высокоточными методами квантовой химии (CCSD(T)-F12). Кроме того, было изучено влияние двух различных (никелевого и палладиевого) пробоотборников на пространственное распределение катионов и их гидратов в пламени.

На основе сопоставления данных эксперимента и моделирования было установлено, что предложенный механизм корректно описывает относительное содержание ключевых кислородсодержащих катионов (CH_5O^+, $C_2H_3O^+$), а также катионов с общей формулой $C_xH_y^+$. Полученные данные послужат основой для дальнейшего усовершенствования механизма превращения ионов в пламенах углеводородов.

1. Goodwin D. G., Moffat H. K., Speth R. L. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. 2018.

Научные руководители —
канд. физ.-мат. наук Д. А. Князьков, канд. физ.-мат. наук В. Г. Киселев

УДК 537.311.1, 544.435.4

Кинетика парной рекомбинации носителей заряда на квазиодномерном молекулярном проводнике в электрическом поле

А. О. Четвериков

Новосибирский государственный университет

В развивающейся области органической электроники существует проблема измерения свойств сопряженных полимеров как молекулярных проводников. Одним из возможных путей ее решения является изучение кинетики рекомбинации носителей заряда, локализованных на одной и той же полимерной молекуле. Такая ситуация возникает при фотоиндуцированном разделении заряда. Приложение внешнего электрического поля позволяет влиять на время оседлой жизни носителей и определить проводимость, в связи с чем возникает необходимость решения задачи об одномерной парной рекомбинации в электрическом поле. Известны решения в диффузионном пределе [1], пределе бесконечной цепи [2] и асимптотика по времени [3].

Целью данной работы являлось получение точного аналитического решения данной задачи, т. е. несимметричного стохастического одношагового процесса с реакцией на границе.

Полимер был представлен линейной цепью из N эквидистантных мест локализации, на конце цепи закреплен один из носителей заряда, а другой перемещается вдоль нее. Они предполагались невзаимодействующими, что отвечает, например, сильно полярной среде или паре экситон/полярон. Вероятность прыжка в единицу времени определяется в рамках теории Маркуса. Для решения задачи о нахождении кинетики нужно выполнить суммирование по спектру возникающего в задаче оператора, явное нахождение спектра которого не представляется возможным в терминах известных спецфункций. Эту трудность удалось преодолеть с помощью удачной декомпозиции искомой суммы и нахождения рекуррентной зависимости между элементами спектра. В рамках примененного подхода может быть учтено влияние таких факторов, как кулоновское взаимодействие и нелинейные конформации молекул.

1. Kim H., Shina K. J., Agmon N. Diffusion-influenced reversible geminate recombination in one dimension. II. Effect of a constant field // J. Chem. Phys. 2001. Vol. 114. P. 3905–3912.
2. Pfluegl W., Silbey R. J. Long-time properties of random walks with a single trap // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58. P. 4128–4133.
3. Cordes H., Baranovskii S. D. One-dimensional hopping transport in disordered organic solids. I. Analytic calculations // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 63. P. 1–7.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. РАН В. И. Боровков

УДК 577

Исследование генерации синглетного кислорода под действием света

Яо Сунъинь

Новосибирский государственный университет

В биологических системах синглетный кислород ($^1O_2$) является важной активной формой кислорода. $^1O_2$ обладает высокой химической активностью, что может приводить к повреждению ДНК и белков. Это используется при фотодинамической терапии рака, в которой синглетный кислород образуется за счет энергии красителя, который возбуждается светом [1].

Работа посвящена разработке детектора люминесценции синглетного кислорода [2] и исследованию новых фотосенсибилизаторов с его помощью. В качестве фотосенсибилизаторов мы используем красители из ряда BODIPY [3, 4].

В наших экспериментах кювета с образцом в CCl4 освещается светодиодом (525 нм, 1 Вт). Люминесценция синглетного кислорода проходит через монохроматор и попадает на детектор через собирающую линзу и ИК-фильтр. Для сбора излучения, распространяющегося в противоположную от монохроматора сторону, используется вогнутое зеркало.

Имеющийся в лаборатории детектор не позволял провести измерения для всех образцов в одинаковых условиях, так как количество образованного синглетного кислорода отличалось на два порядка, а динамический диапазон детектора составлял лишь 1 порядок. В связи с этим нами был разработал новый детектор.

Разработанный детектор состоит из микроконтроллера, лавинного фотодиода, аналогового-цифрового преобразователя, повторителя напряжения и модуля преобразования напряжения. По сравнению с предыдущей версией он имеет более низкий шум, расширенный динамический диапазон и стабильную базовую линию.

1. Photosensitized singlet oxygen and its applications. URL: https://doi.org/10.1016/S0010-8545(02)00034-6/.
2. Singlet oxygen luminescence detector based on low-cost InGaAs avalanche photodiode. URL: https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00224/.
3. Editorial: BODIPYs and Their Derivatives: The Past, Present and Future. URL: https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00290/.
4. Photophysical properties of BODIPYs with sterically-hindered nitrophenyls in meso-position. URL: https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.118837/.

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

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

д-р физ.-мат. наук *М. Н. Ачасов*
д-р физ.-мат. наук, акад. РАН *А. Е. Бондарь*
д-р физ.-мат. наук *А. Ю. Гармаш*
канд. физ.-мат. наук *Е. А. Кравченко*
д-р физ.-мат. наук *И. Б. Логашенко*
канд. физ.-мат. наук *Д. В. Матвиенко*
канд. физ.-мат. наук *А. В. Резниченко*
д-р физ.-мат. наук *К. Ю. Тодышев*

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY

Section head — Dr. Phys.-Math. Sci. *A. Yu. Garmash*

Section responsible secretary — *T. V. Maltsev*

Section scientific committee

Dr. Phys.-Math. Sci. *M. N. Achasov*
Dr. Phys.-Math. Sci., Acad. RAS *A. E. Bondar*
Dr. Phys.-Math. Sci. *A. Yu. Garmash*
Cand. Phys.-Math. Sci. *E. A. Kravchenko*
Dr. Phys.-Math. Sci. *I. B. Logashenko*
Cand. Phys.-Math. Sci. *D. V. Matvienko*
Cand. Phys.-Math. Sci. *A. V. Reznichenko*
Dr. Phys.-Math. Sci. *C. Yu. Todyshev*

УДК 539.1.05

Изучение характеристик детектора для экспериментов с быстропротекающими процессами на пучке СИ

В. Е. Бурдин

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

В работе исследуются характеристики кремниевого микростripового детектора DIMEX-Si (*Detector for IMaging of EXplosions*) [1–3]. DIMEX-Si используется для измерения малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгенографии быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения (СИ).

Цель работы — изучение предельного значения потока фотонов, при котором детектор работает в линейном режиме, а также проверка способности детектора работать в многосгустковом режиме.

Проведены серии экспериментов на пучке СИ на комплексе ВЭПП-4М. Для изучения динамического диапазона детектора накопитель ВЭПП-4М работал в двухсгустковом режиме. Необходимо было проверить, что зависимость сигнала, полученного с детектора, является линейной в зависимости от потока фотонов, поглощенных в сенсоре. В многосгустковом режиме в кольце накопителя создавалась последовательность из 17 сгустков, с интервалом между сгустками 55 нс. В последовательности сгустков был разрыв примерно в 300 нс. Нужно было проверить, что во время разрыва удается найти момент отключения схемы компенсации темнового тока так, чтобы последующие измерения не были искажены неправильным уровнем сигнала в отсутствие облучения. Также рассматривается моделирование работы детектора в программе GEANT4 и сравнение с газовым детектором DIMEX-G.

Предполагается, что многосгустковый режим, аналогичный получаемому на ВЭПП-4М, будет использоваться в СКИФ. Фактически в работе проверяется, может ли детектор DIMEX-Si работать в СКИФ.

1. L. I. Shekhtman, V. M. Aulchenko, V. V. Zhulanov et al. Upgrading a Detector for Studying Fast Processes on a Beam of Synchrotron Radiation // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2019. Vol. 83, № 2. P. 220–224.
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. P. 162655.
3. Aulchenko V. M., Shekhtman L. I., Zhulanov V. V. Development of an Application Specific Integrated Circuit for Signal Detection in Experimental Studies of Fast Processes // Optoelectronics, Instrum. Data Proc. 2020. Vol. 56. P. 81.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Л. И. Шехтман

УДК 535.5

Вычисление взаимной информации для оптического канала связи с малой дисперсией в рамках модели нелинейного уравнения Шредингера

В. О. Губа

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

Величина, называемая взаимной информацией, описывает количество информации, передаваемой по каналу связи при заданном вероятностном распределении начального сигнала. Задача нахождения взаимной информации может быть сведена к вычислению интеграла по траекториям от распределения начального сигнала, умноженного на определенный функционал, зависящий от начального сигнала. Конкретный вид функционала зависит от физической модели распространения сигнала по каналу связи и модели детектирования сигнала на выходе из канала.

Подобные вычисления в рамках модели канала, описываемого нелинейным стохастическим уравнением Шредингера, уже были проделаны ранее в приближении канала связи с нулевой второй дисперсией, а также канала с малой керровской нелинейностью. Для таких каналов уже найдены выражения для оптимальных распределений начального сигнала, а также посчитана взаимная информация для случая гауссовского распределения, являющегося оптимальным в случае линейного канала. Цель данной работы — вычисление взаимной информации для канала связи с малым параметром безразмерной второй дисперсии и для распределения начального сигнала, представляющего собой модифицированное гауссовское распределение с подавлением высокочастотных компонент случайного сигнала. Используя подобное распределение, мы можем рассматривать начальные сигналы с фиксированной средней мощностью и средней спектральной шириной. Аналогичное распределение имеет квантовый гармонический осциллятор, движущийся в евклидовом времени, и эта аналогия позволяет применять в вычислениях известные функции Грина для квантового осциллятора.

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

УДК 539.1.05

Измерение сечения процесса $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ на энергии 7 ГэВ с детектором КЕДР

Д. А. Зубков

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

Одним из важных направлений исследований на детекторе КЕДР являются двухфотонные процессы: позитрон и электрон испускают по одному фотону, которые взаимодействуют и рождают новые частицы. Электрон и позитрон, потеряв часть энергии, сходят с орбиты пучков и попадают в систему регистрации рассеянных электронов, а рожденные из фотонов частицы регистрируются в детекторе. Одним из таких процессов является процесс $e^+e^- \to e^+e^-\,\mu^+\mu^-$. При его обработке была обнаружена пониженная по сравнению с ожидаемой эффективность отбора, предположительно связанная с работой триггера. Для исследования этого предположения было решено рассмотреть более простой, схожий с исходным, двухтрековый процесс $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$.

Таким образом, целью работы является изучение процесса $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ и измерение его сечения. Для достижения данной цели была написана программа отбора событий $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$. Программное обеспечение детектора обладает библиотеками реконструкций событий в отдельных системах детектора, эти библиотеки были использованы для объединенной программы реконструкции. Произведен выбор условий отбора для исследуемого процесса. Условия отбора наложены на энергию и импульс частиц для выделения мюонов на фоне электронов, на коллинеарность для отбора событий с сохраняющимся импульсом, на время пролета во времяпролетной системе для игнорирования событий с космическими частицами и т. д. Эффективность выбранных условий отбора определяется по моделированию за исключением времяпролетной системы, а ее эффективность — по экспериментальным данным. Для определения светимости используется процесс Баба-рассеяния. В результате получено значение сечения $\sigma(\sqrt{s} = 7\ \text{ГэВ}) = 1{,}77 \pm 0{,}04$ (стат.) нб (предварительно).

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

УДК 539.12

Измерение массы нейтрального каона

Д. Р. Иванов

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

Уточнение массы нейтрального каона позволит точнее моделировать различные процессы, в которые в качестве параметра входит масса нейтрального каона, и улучшить точность разности масс нейтрального и заряженного каона. В результатах предыдущих экспериментов наблюдается небольшое расхождение на уровне $S = \sqrt{(\chi^2/ndf)} = 1{,}2$ при среднемировой точности 13 кэВ/c^2 [1]. Новое исследование представляет особый интерес.

Данная работа посвящена новому измерению массы нейтрального каона в процессе $e^+e^- \to \varphi(1020) \to K_S K_L$, $K_S \to \pi^+\pi^-$ по данным, полученным при помощи детектора КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 на пике φ-мезонного резонанса. В данном анализе используется интеграл светимости, равный 11 $пб^{-1}$, что соответствует более 800 тысячам отобранных сигнальных событий. Это значительно превышает использованную в предыдущих экспериментах статистику [1, 2]. Масса каона определяется по кинематике его распада на два заряженных пиона [2].

Показано, что все эффекты, связанные с детектором и расчетами, могут контролироваться с точностью около 10 кэВ, и есть возможность провести новое измерение со сравнимой с мировой точностью. С учетом текущего значения неопределенности в энергии пучков получено предварительное значение массы нейтрального каона.

1. Beringer J. et al. Review of particle physics // Phys. Rev. D. 2012. Vol. 86. 010001.
2. Зайцев А. С. Прецизионное измерение массы нейтрального каона с детектором КМД-2. Новосибирск: НГУ, 2001.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Е. П. Солодов

УДК 539.1.05

Реконструкция нейтрального пиона в жидкоксеноновом калориметре детектора КМД-3

Т. А. Кузнецов

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

Эффективное изучение процесса $e^+e^- \to \pi^0\gamma$ при энергиях системы центра масс больше 1 ГэВ на детекторе КМД-3 [1] требует развития метода регистрации быстрых π^0. Стандартный способ реконструкции, используемый на детекторе КМД-3, не обладает достаточным пространственным разрешением, чтобы однозначно разделить два близкопролетающих фотона, образующихся после распада нейтрального пиона. В данной работе изучается возможность реконструкции пи-мезона с применением полосковой подсистемы жидкоксенонового калориметра детектора КМД-3.

Предложен алгоритм реконструкции распада $\pi^0 \to \gamma\gamma$, основанный на минимизации энергетического момента инерции электромагнитных ливней. Для оценки эффективности предложенного алгоритма используется моделирование отклика детектора, реализованное с помощью пакета GEANT4 [2].

Проведен анализ работы алгоритма в случае разделения событий с одиночным фотоном и событий с нейтральным пионом, определен пороговый критерий разделения двух классов событий. Рассчитана точность алгоритма и вероятность ошибок первого и второго рода.

1. Khazin B. I. Physics and detectors for VEPP-2000 // Nucl. Phys. Proc. Suppl. B. 2008. Vol. 181–182. P. 376.
2. Agostinelli S. et al. Geant4 — a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. Vol. 506. P. 250–303.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц

УДК 539.1.05

Изучение распада $\overline{B^0} \to D^+ \eta \pi^-$ на детекторе Belle

С. Д. Обершт

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

Цель данной работы — измерение вероятности распада $\overline{B^0} \to D^+\eta\pi^-$ на полной статистике B-мезонов (772 × 10^6 пар B-мезонов) в эксперименте Belle. Промежуточный η-мезон реконструируется через распад $\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$. Актуальность данного измерения связана с тем, что данный процесс изучается впервые. Измеренная вероятность может оказаться, с одной стороны, достаточно большой, чтобы улучшить точность адронного тагирования аромата B-мезонов в полулептонных каналах, с другой стороны, достаточно малой из-за подавленной вероятности распада $\tau \to \eta\pi\nu$.

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

УДК 539.12.01

Проявление электрического дипольного момента в распадах тау-лептонов, рожденных в электрон-позитронной аннигиляции

И. В. Образцов

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

Одним из способов поиска Новой физики является проведение прецизионных измерений электрического дипольного момента τ-лептона (d_τ). Значение d_τ, которое предсказывает Стандартная модель (СМ), на сегодняшний день находится за пределами экспериментальной точности. Поэтому измерение ненулевого значения электрического дипольного момента τ-лептона будет указывать на существование Новой физики.

В данной работе рассматривались процессы $e^+e^- \to \tau^+\pi^-\nu_\tau$, $e^+e^- \to \pi^+\tau^-\bar{\nu}_\tau$, $e^+e^- \to \tau^+\rho^-\nu_\tau$, $e^+e^- \to \rho^+\tau^-\bar{\nu}_\tau$ с продольно-поляризованными электронами, а также процесс $e^+e^- \to \pi^+\pi^-\nu_\tau\bar{\nu}_\tau$ с неполяризованными электронами. Чтобы учесть наличие электрического дипольного момента у τ-лептона, использовалась модифицированная вершина взаимодействия $\gamma\tau^+\tau^-$

$$\Gamma^\mu = -ie\left[\gamma^\mu + \frac{\sigma^{\mu\nu}k_\nu}{2M}F_3^\tau\left(k^2\right)\gamma_5\right],$$

где e — заряд электрона; M — масса τ-лептона; $F_3^\tau\left(k^2\right)$ — электрический дипольный форм-фактор ($F_3^\tau\left(0\right) = d_\tau 2M/e$), $k^2 = s$. Для перечисленных выше процессов были построены и теоретически предсказаны асимметрии, которые пропорциональны CP-нечетной части сечения. Вычисления были выполнены для инвариантных масс начального электрона и позитрона $\sqrt{s} \ll m_Z$. Поскольку эти асимметрии линейны по $F_3^\tau\left(k^2\right)$, извлечение их из экспериментальных данных может улучшить верхние пределы как для $\mathrm{Re}\,F_3^\tau\left(s\right)$, так и для $\mathrm{Im}\,F_3^\tau\left(s\right)$. Причем наличие поляризации упрощает измерение $\mathrm{Re}\,F_3^\tau\left(s\right)$.

На данный момент эксперименты, в которых были бы продольно поляризованы электроны, не проводились. Однако такой эксперимент планируется провести на Супер чарм-тау фабрике (СЧТФ). СЧТФ — это электрон-позитронный коллайдер сверхвысокой светимости (~ 10^{35} см$^{-2}$с$^{-1}$) с энергией в системе центра масс от 3 до 5–7 ГэВ. Такой коллайдер при наличии высокой светимости станет интенсивным источником очарованных частиц и τ-лептонов.

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

УДК 539.1.05

Измерение сечения процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0\pi^0$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 в интервале энергий центра масс от 1,5 до 2 ГэВ

И. Д. Першин

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

Детектор КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 предназначен для регистрации процессов, происходящих при электрон-позитронной аннигиляции. С его помощью измеряются сечения процессов $e^+e^- \to$ адроны, дающие вклад в аномальный магнитный момент мюона, и исследуется динамика рождения промежуточных состояний.

Данная работа посвящена изучению процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0\pi^0$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 в области энергии от 1,5 до 2 ГэВ. Чтобы определить сечение данного процесса, была выбрана статистика размером ~ 130 $пб^{-1}$, набранная детектором в сезоны 2019–2021 гг. Для выделения сигнальных событий необходимо выбрать оптимальные критерии отбора таких событий, а для вычисления сечения — определить эффективность регистрации частиц с помощью моделирования и вычислить радиационные поправки.

События данного процесса содержат две заряженные частицы, которые соответствуют двум трекам в дрейфовой камере, и два нейтральных пиона, каждый из которых распадается на два фотона, регистрируемые в калориметре детектора. Основным фоном при изучении данного процесса является $e^+e^- \to \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$. В представленной работе для разделения K/π событий используется информация по ионизационным потерям заряженных частиц в дрейфовой камере, с помощью которой строится функция максимального правдоподобия для идентификации каонов. В данный момент выполняется выделение событий изучаемого процесса.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Г. В. Федотович

УДК 539.1

Измерение сечения рассеяния $e^+e^- \to \eta\gamma$

А. Д. Скоробогатов

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

Данные по радиационным распадам векторных мезонов представляют собой большой интерес для физики частиц, примером таких реакций являются, в частности, распады $(\rho, \omega, \varphi) \to \eta\,\gamma$. Именно эти переходы дают наибольший вклад в сечение позитрон-электронной аннигиляции с образованием эта-мезона и фотона в области энергии до 2 ГэВ. Задачей данной работы является измерение сечения этого процесса в заряженных модах, в частности $\eta \to \pi^+\,\pi^-\,\pi^0$, с детектором КМД-3. В рамках данной работы были выработаны критерии отбора сигнальных событий. На основе моделирования была определена эффективность регистрации сигнальных событий, оценено влияние событий фона для основных фоновых процессов. В анализе используется метод кинематической реконструкции. Получены предварительные результаты по сечению процесса в области энергии вблизи пика φ-мезона, оценена применимость алгоритма на более широком диапазоне энергий.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Б. А. Шварц

УДК 535.3 + 621.386.8

Исследование зависимости эффективности светового сбора на спектросмещающее волокно от поперечного размера сцинтиллятора

К. А. Шестакова

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

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера ведется разработка многоэлементных сцинтилляционных экранов для регистрации жестких гамма-квантов. В качестве сцинтилляторов используются кристаллы BGO. Для того чтобы убрать фотоприемники и электронику из-под воздействия гамма-излучения, используются спектросмещающие волокна [1]. Световые сигналы от сцинтилляторов транспортируются при помощи волоконно-оптической линии передачи сигнала на фотоприемники. Фотоприемник преобразует световой сигнал в электрический сигнал, который в дальнейшем оцифровывается электроникой.

Показатели преломления BGO и спектросмещающего оптического волокна значительно отличаются, что может приводить к значительному уменьшению светового сбора сцинтилляционного света на спектросмещающее волокно. Цель работы — исследование эффективности светового сбора на спектросмещающее волокно, которая значительно влияет на световой выход канала детектора в целом. Для ее определения была выполнена теоретическая оценка. Так как в полученной формуле зависимости есть неизвестные параметры, была разработана методика измерения этих параметров и проведены их измерения.

В докладе представлены результаты расчетов и эксперимента по исследованию зависимости эффективности светового сбора на спектросмещающее волокно от поперечного размера сцинтиллятора.

1. Афанасенко С. С., Ахметшин Р. Р., Григорьев Д. Н. и др. Детектор потоков жестких гамма-квантов с минимизированным шумом изображения и увеличенной эффективностью регистрации // Автометрия. 2021. Т. 57, № 2. С. 82–92.

Научный руководитель — А. В. Тимофеев

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. Ершов*
канд. физ.-мат. наук *Д. А. Медведев*
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. *D. A. Medvedev*
Dr Techn. Sci. *E. I. Palchikov*
Cand. Phys.-Math. Sci. *E. R. Pruuel*

УДК 534.222.2

Измерение скорости частиц WC-12%Co в расширяющемся канале продуктами газовой детонации

А. В. Агейков

Новосибирский государственный университет

Детонационное напыление широко используется для создания износостойких покрытий с низкой пористостью, высокой адгезией и без значительных термических напряжений. Покрытие формируется в результате ускорения частиц порошка напыляемого материала и их разогрева до температуры плавления продуктами газовой детонации. Ускорение и нагрев традиционно происходит в цилиндрическом канале ствола детонационного аппарата. Для увеличения скорости частиц в непрерывных процессах напыления, таких как плазменное, высокоскоростное газопламенное и холодное газодинамическое, используются сопла переменного сечения типа сопла Лаваля. Таким образом, за счет применения расширяющегося канала ствола детонационного аппарата можно рассчитывать на дополнительное ускорение сверхзвукового потока продуктов детонации и, как следствие, на увеличение скорости частиц.

Цель работы — изучение ускорения частиц продуктами газовой детонации в расширяющемся канале ствола детонационного аппарата и влияния угла расширения от 0° до 4° на скорость частиц.

Эксперименты проводились с ацетилено-кислородной смесью, разбавленной азотом — $1{,}23C_2H_2 + 1{,}31O_2 + 1{,}26N_2$, — с использованием комплекса детонационного напыления CCDS2000, с отсевом композитного порошка WC/Co (88/12), размером фракции 30 ÷ 40 мкм. Регистрация пролета частиц производилась осциллографом и фотодатчиками на основе фототранзисторов SFH 309 FA с чувствительностью в инфракрасном диапазоне 730 ÷ 1120 нм.

В результате проведенных измерений было установлено, что при углах расширения от 2° до 4° наблюдается максимальное ускорение. Скорость вылета мелких частиц увеличивается почти на 35 %, а скорость крупных частиц — почти на 60 %, что хорошо согласуется с результатами теоретического расчета. Расширение канала до 3° можно рекомендовать для реализации детонационного напыления с целью улучшения эксплуатационных характеристик покрытий.

Научный руководитель — д-р техн. наук В. Ю. Ульяницкий

УДК 544.03

Восстановление распределения массы за фронтом сильной ударной волны в пенопласте

А.М. Асылкаев

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет

Синхротронное излучение (СИ) является следствием того, что заряженная частица, движущаяся по криволинейной траектории, излучает электромагнитное поле вдоль движения [1]. Свойства СИ позволяют осуществлять измерения в динамических экспериментах, в которых результаты взаимодействия излучения с веществом фиксируются в последовательные моменты.

Методика определения параметром сжатого вещества за фронтом ударной волны основана на измерении проходящего СИ от ускорителя ВЭПП-4 (энергия электронов — 4,5 эВ, вигглер с магнитной индукцией 2 Тл). В данной работе исследовалось распределение плотности в пенопласте при ударном нагружении взрывом цилиндрических зарядов на основе ВВ ТАТБ диаметром 40 мм [2]. Когда излучение проходит через предмет исследования, часть излучения поглощается самим объектом. Луч, проходящий без отклонения, имеет наибольшую интенсивность. Он несет информацию о распределении плотности вещества. Регистрация проходящего излучения велась детектором DIMEX (конструкция, позволяющая работать с быстрой электронной компонентой сигнала). Детектор представляет собой ионизационную камеру с электронным усилителем, который отделяет область конверсии рентгеновских фотонов от промежутка, где заряд индуцируется на считывающую полосковую структуру. Ширина полосковой структуры (один канал) составляет 0,1 мм, что определяет координатное разрешение детектора.

В процессе разлета продуктов взрыва меняется плотность вещества вдоль луча СИ, а значит, и спектр поглощения. Для вычисления массы сжатого вещества проводилась калибровка поглощения детектора DIMEX (перед детектором ставилась известная масса того же вещества). Все каналы калибровались отдельно и одновременно.

Регистрируемую детектором интенсивность перед проведением эксперимента можно записать как $I_{before} = I_0 \exp(-\alpha_1 m_0 + \alpha_2 m_0^2)$, где I_0 — начальный поток СИ; m_0 — начальная масса (до ударного сжатия) вещества вдоль луча СИ; α_1, α_2 — интерполированные коэффициенты поглощения. Интенсивность I_{exp}, записанную детектором DIMEX во время эксперимента, можно представить в аналогичном виде $\ln \dfrac{I_{\text{exp}}}{I_{before}} = g = -\alpha_1 (m_x - m_0)^2 + \alpha_2 (m_x - m_0)^2$, где m_x — масса вещества вдоль луча. Откуда можно получить квадратное уравнение для $\dfrac{m_x}{m_0}$:

$$\left(\frac{m_x}{m_0}\right)^2 - \frac{m_x}{m_0}\frac{\alpha_1}{\alpha_2 m_0} + \frac{1}{\alpha_2 m_0}\left(\alpha_1 - \frac{g}{m_0}\right) - 1 = 0\,.$$

Решая его, получаем относительное увеличение массы пенопласта на фронте:

$$\frac{m_x}{m_0} = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2 m_0} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_1}{2\alpha_2 m_0}\right)^2 - \frac{1}{\alpha_2 m_0}\left(\alpha_1 - \frac{g}{m_0}\right) + 1}\,.$$

Массив масс m_x, вычисленных для каждого канала детектора, составляет распределение массы пенопласта за фронтом ударной волны.

1. Серый А., Серая Е. Изобретая инструменты науки будущего. Ускоряющая науку ТРИЗ. М.: Едиториал УРСС, 2016. С. 45.
2. Титов В. М., Тен К. А., Прууэл Э. Р. и др. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 6. С. 6.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук К. А. Тен

УДК 531

Изучение композитных материалов на основе эпоксидной смолы и наночастиц

А. Н. Багрецова

Новосибирский государственный университет

В настоящее время широко распространены композиты на основе эпоксидной смолы. Такие полимеры отличаются хорошей адгезией к наполнителям, имеют высокие электроизоляционные и физико-механические характеристики, обладают химической стойкостью. В настоящей работе в качестве матрицы использовалась эпоксидная смола Crystal 85-5, в качестве наполнителя — фотолюминесцентный порошок двух видов: MHG-4E с размером частиц 5–15 мкм, FB-530Д с размером частиц 25 мкм.

Порошок замешивался с отвердителем, и полученная смесь проходила этап диспергирования ультразвуковым генератором Bandelin Sonopuls HD 3200. Следом за ультразвуковым воздействием в смесь добавлялась эпоксидная смола, и состав повторно обрабатывался ультразвуком. Полученную смесь заливали в силиконовую форму и отверждали в течение суток при комнатной температуре. Испытание на растяжение производились на установке Zwick Roell Allround Z005 по ГОСТ 11262-80. В результате экспериментов получены зависимости модуля упругости и напряжения при разрушении от концентрации наполнителя. Результаты показали, что модуль упругости вырос на 16 % для порошка MHG-4E и на 21 % для порошка FB-530Д, а напряжение при разрушении снизилось на 47,2 и 54,6 % соответственно.

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

УДК 539.2

Молекулярно-динамическое исследование зависимости температуры плавления от характерных размеров наноструктуры

С. С. Ищенко

Новосибирский государственный университет

В настоящее время композиционные материалы играют большую роль в различных разделах машиностроения, в аэрокосмической и авиационной индустрии. Это связано с их прочностными свойствами при малом весе, хорошими усталостными характеристиками, коррозионной стойкостью, сопротивлению тепловому расширению по сравнению с традиционными материалами [1].

Карбид кремния в настоящее время является одним из наиболее перспективных керамических материалов благодаря его свойствам: высокой удельной прочности, высокой теплопроводности и теплозащитным свойствам, жаропрочности, стойкости к абразивному износу, радиационной прочности и т. д. Композиционные материалы на основе карбида кремния также отличаются вышеперечисленными свойствами, что позволяет использовать их в качестве высокотемпературных конструкционных материалов в космической технике и авиации [2].

Цель данной работы — исследование зависимости температуры плавления от характерных размеров наноструктуры на примере карбида кремния в рамках метода молекулярной динамики (ММД).

В основе ММД лежат простые законы Ньютона, позволяющие найти закон движения частиц при различных процессах. Силы межатомного взаимодействия в рамках этого метода представляются как градиент потенциальной энергии всей системы [1, 2]. Численные решения уравнений движения классической механики позволяют находить фазовые траектории всех атомов и получать максимальную информацию о системе. Через усреднение по ансамблю находятся все необходимые характеристики системы.

Численное моделирование проводилось на основе разработанного в ИТПМ СО РАН комплекса программ, основанного на методе молекулярной динамики. В качестве физической системы рассматриваются сферические нанокластеры различного диаметра, вырезанные из идеального образца кубической формы. В результате численных экспериментов были получены зависимости температуры нагрева при разном шаге по времени, определены температуры плавления для каждого размера образца. Построен общий график температуры плавления в зависимости от размера кластера.

1. Utkin A. V., Fomin V. M. Molecular dynamic calculation of the bulk modulus for silicon and silicon carbide // Doklady Phys. 2020. Vol. 65, No. 5. P. 174–177.
2. Vashishta P., Kalia R. K., Nakano A., Rino J. P. Interaction Potential for Silicon Carbide: A Molecular Dynamics Study of Elastic Constants and Vibrational Density of States for Crystalline and Amorphous Silicon Carbide // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 103515: 1–12.

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

УДК 531.7

Выделение волокна в структуре композита 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 применяются 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, составляющих волокно и основной материал матрицы. Часто плотность матрицы и нитей близка, и критерия, основанного только на локальном значении плотности, недостаточно для разделения вокселей. Для решения этой задачи требуются более сложные алгоритмы выделения волокон в исследуемом объеме.

В работе проведено тестирование нескольких алгоритмов выделения армирующих волокон в матрице данных рентгеновской микротомографии. Подходы основаны на учете 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.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Э. Р. Прууэл

УДК 544.03

Исследование свойств заряда тротила с углеродными нанотрубками

А. А. Кузьминых[1], А. П. Ершов[2], А. О. Кашкаров[2],
И. А. Рубцов[2], Н. П. Сатонкина[2]

[1]Новосибирский государственный университет
[2]Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, Новосибирск

В последние годы наблюдается активное применение углеродных нанотрубок в различных областях науки и техники. Уникальные свойства нанотрубок — высокие продольная проводимость, теплопроводность и прочность, а также огромное отношение длины к диаметру — позволяют при добавлении нанотрубок к разным материалам наделять их специфическими свойствами [1]. При добавлении в керамику повышается прочность и появляется заметная проводимость, что используется для снятия статического электричества. Последнее крайне востребовано при обращении со взрывчатыми материалами для обеспечения безопасности и ограничения возможности несанкционированных взрывов.

Ранее была разработана технология смешивания углеродных нанотрубок с конденсированными высокобризантными взрывчатыми веществами [2]. Проведено исследование проводимости полученной смеси [3].

В настоящем докладе предложены результаты исследования скорости детонации и электропроводности заряда тротила с добавлением нанотрубок при разной плотности. Проведено сравнение с электрическими характеристиками для чистого ВВ. Как и ожидалось, добавление нанотрубок к ВВ привело к существенному изменению свойств, таких как чувствительность и электропроводность.

1. Анищик В. М., Борисенко В. Е., Жданюк С. А. и др. Наноматериалы и нанотехнологии / под ред. В. Е. Борисенко, Н. К. Толочко. М., 2008. С. 375.
2. Ершов А. П., Дашапилов Г. Р., Карпов Д. И. и др. Детонация взрывчатого вещества, содержащего наноразмерные включения // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57, № 1. С. 112–119.
3. Rubtsov I. A., Pruuel E. R., Ten K. A. et al. Electric conductivity of high explosives with carbon nanotubes // J. Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. 899. P. 092012.

Научный руководитель — канд. физ-мат. наук Н. П. Сатонкина

УДК 532.527+532.517.4+004.932.4

Изменение радиуса тороидального пузыря при всплывании в воде

Б. И. Маракtаев

Новосибирский государственный университет

Цель данной работы — изучение изменения радиуса тороидального пузыря. Для этого был исследован подъем тороидального пузыря в воде.

Тороидальный пузырь создавался путем инжекции импульсной струи воздуха в воду через сопло вертикально вверх. Эксперименты проведены в прозрачном сосуде из оргстекла высотой 150 см, шириной 50 × 50 см, наполненного водой. Сжатый воздух через регулятор давления подводится к электромагнитному клапану, который управлялся контроллером. В течение короткого промежутка времени контроллер открывает клапан, затем сжатый воздух вытекает через расположенное на расстоянии 6 см от дна камеры сопло, диаметром 4 мм, вертикально вверх в воду, где создается тороидальный пузырь. Для определения объема пузырь улавливался воронкообразным устройством, установленным в верхней части сосуда.

Тороидальные пузыри являются случаем плавучих вихревых колец в жидкости, в которых в качестве плавучего вещества используется газ. Отличительной особенностью тороидальных пузырей является то, что газ под действием центробежной силы концентрируется в окрестности оси ядра вихревого кольца на протяжении всего движения. В результате выявлено, что, несмотря на уменьшение сечения тороидального пузыря в процессе подъема, его радиус в зависимости от пройденного расстояния увеличивается линейно, как и в случае автомодельных вихревых колец.

В результате работы был определен коэффициент расширения пузыря при различных объемах инжектируемого воздуха или чисел Бонда. Оказалось, что коэффициент расширения не зависит от объема. Его среднее значение и дисперсия равны 0,042 ± 0,006.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук В. В. Никулин

УДК 537-77

Спиральный генератор высоковольтных импульсов с профилированными в виде меандра шинами

А. Г. Параскун

Новосибирский государственный университет

Спиральный генератор Фитча и Хауэлла, а также генератор Белкина и Жарковой, предложенные в 1961–1964 гг., являются самыми простым устройствами для получения наносекундных импульсов с напряжением 100–600 кВ, содержащими минимальное количество деталей [1].

Однако низкое волновое сопротивление двухшинной линии плохо согласуется с реальной паразитной индуктивностью замыкающего ее разрядника, что ухудшает КПД устройства. В работе изготавливается и исследуется спиральный генератор с профилированными в виде меандра шинами, предложенный в патенте [2]. В результате профилирования волновое сопротивление длинной двухшинной спиральной линии повышается в три раза.

Параметры изготовленного генератора следующие. Размеры: внешний диаметр спирали, состоящей из двух шин из 11 и 12 витков, — 52 мм, внутренний диаметр — 40,5 мм. Толщина изоляции 150 мкм — три слоя лавсана по 50 мкм. Материал шин — медь 50 мкм. Диаметр генератора по магнитопроводам из феррита ВНП-300 65 мм, длина генератора по изоляции 180 мм. Емкость генератора по входу 19 нФ, выходная емкость 37 пФ. Индуктивность спирали 39 нГн. Измеренный коэффициент трансформации k = = 12,5, что при зарядке двухшинной линии до 10 кВ может дать 125 кВ на выходе генератора. Измеренное время нарастания импульса от нуля до максимального напряжения составляет 60 нс. Длительность по полувысоте — 60 нс. КПД генератора — 30 %.

Решение позволяет создать компактный генератор наносекундных высоковольтных импульсов, что может быть использовано для изготовления портативного рентгеновского аппарата со взрывной эмиссией электронов.

1. Пальчиков Е. И., Рябчун А. М., Красников И. Ю. Модифицированный спиральный генератор высоких напряжений для питания импульсного рентгеновского аппарата // ЖТФ. 2012. Т. 82, вып. 2. С. 136–146.

2. Пальчиков Е. И. Спиральный генератор высоковольтных импульсов. Патентная заявка, приоритет № 2021120420 от 09.07.2021, МПК — H03K 31, H01P 30, H05G 30.

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. Е. И. Пальчиков

УДК 544

Численное моделирование детонационных процессов с учетом уравнений газовой динамики и термодинамики реагирующих смесей

А. С. Туманик

Новосибирский государственный университет

Для построения численных решений задач механики течения существует большое количество различных схем расчета газодинамического течения с разрывами параметров внутри расчетной области. Однако при изучении детонационных процессов в горючих газах необходимо принимать во внимание уравнение состояния, учитывающее формирование равновесного химического состава рассматриваемых компонентов. С помощью модели, реализующей оба условия, можно предсказывать возникновение детонации (горения) в взрывчатых смесях для различных начальных условий, находить параметры установившихся стационарных течений и т. д.

В данной работе в качестве схемы расчета используется схема Годунова [1], в которой потоки между ячейками находятся из решения задачи о распаде произвольного разрыва. Главным преимуществом применения данной схемы является монотонность полученных решений. Для определения химического состава был использован численный алгоритм [2], позволяющий определять параметры равновесного уравнения состояния путем нахождения экстремума термодинамического потенциала (свободной энергии).

Алгоритм был протестирован для большого количества химических соединений с различными начальными данными. Полученные численные значения были сравнены с результатами аналогичных экспериментов.

1. Годунов С. К. Разностный метод расчета ударных волн // Успехи матем. наук. 1957. Т. 12, № 1 (73). С. 176–177.

2. Прууэл Э. Р., Васильев А. А. Уравнение состояния продуктов газовой детонации. Учет формирования конденсированной фазы углерода // Физика горения и взрыва. 2021. Т. 57, № 5. С. 74–85.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Э. Р. Прууэл

УДК 620.3

Оценка реологического поведения проволок из никелида титана

Д. Н. Тупицина, А. В. Ветрова, М. А. Ковалева

Томский государственный университет

В работе было изучено реологическое поведение образцов микропроволоки из никелида титана, используемой в медицинских приложениях [1]. Проволока составом Ti-50 ат. % Ni и толщиной 60 мкм была получена с помощью термомеханической обработки из монолитных слитков с отжигами.

Образцы микропроволок из NiTi толщиной 60 мкм и длиной 100 мм были испытаны при одноосном растяжении до разрушения и циклического растяжения без разрушения в пределах обратимой мартенситной деформации. После растяжения выделены три характерные зоны: первая — упругое поведение аустенита B2 до деформации в пределах 2 %, реологически описываемое линейно-упругой средой Гука с модулем упругости E_a; вторая — превращение аустенита в мартенсит B2→B2+R→B19′ в виде плато, параллельного оси деформации продолжительностью до 6 %, описываемое жесткой средой Мизеса с параметром течения σ_s, равным пределу упругости; третья — упругое деформирование мартенситной фазы вплоть до разрушения при относительном удлинении до 13 %, по аналогии с упругостью аустенитной фазы, описывается линейно-упругой средой Гука с модулем упругости $E_м$. Разрушение при растяжении наступало по квазихрупкому сценарию без признаков нелинейного поведения, свойственному пластической деформации сплавов. При циклическом нагружении разгрузку начинали в конце области плато, при этом диаграмма имела вид гистерезиса и заканчивалась полным восстановлением первоначальной длины проволочного образца. Поведение материала образцов случаях характеризовалось сверхэластичным поведением.

Работа поддержана Правительством Российской Федерации (предложение № 2020-220-08-6662 по поддержке научно-исследовательских проектов, реализуемых под руководством ведущих ученых в российских учреждениях и российских вузах).

1. Марченко Е. С., Ясенчук Ю. Ф., Гюнтер С. В. и др. Клиническое применение металлотрикотажа из никелида титана на основе количественной оценки реологического подобия мягким биологическим тканям // Вопр. реконструктивной и пластической хирургии. 2022. Т. 25, № 2 (81). С. 68–81.
2. Auricchio F. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model // Int. J. Plasticity. 2001. Vol. 17. P. 971–990.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, доц. Е. С. Марченко

УДК 544.032

Детонационный синтез наночастиц и их изучение в продуктах детонации

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 исследований методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Оксалаты железа и меди равномерно смешивались с порошком штатного тэна, затем изготавливались прессованные заряды. Соединения металлов в ходе термического разложения за детонационным фронтом являлись источниками свободных атомов металлов и их оксидов. Впоследствии из них формировались наночастицы предположительно по диффузионному механизму [1].

После детонации морфология продуктов взрыва и содержащихся в них наночастиц металлов может значительно меняться, например при их соударении о стенки взрывной камеры. Для минимизации влияния условий опытов заряды помещались в ледяные оболочки. Сохраненные продукты детонации зарядов с разным процентным содержанием металлов исследовались на просвечивающем электронном микроскопе.

В результате данной работы были найдены и изучены характеристики с помощью электронного микроскопа наночастицы металлов и их оксидов в сохраненных продуктах. Данное исследование помогает понять процесс образования наночастиц во время взрыва и зависимость их свойств от состава и размеров используемых зарядов.

1. Толочко Б. П., Чернышев А. П., Тен К. А. и др. Физико-химическая модель детонационного синтеза наночастиц из карбоксилатов металлов // Физика металлов и металловедение. 2008. Т. 105, № 2. С. 145–151.

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

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Председатель секции — канд. физ.-мат. наук *Г. А. Фатькин*

Ответственный секретарь секции — *П. Б. Чеблаков*

Экспертный совет подсекции «Радиофизика и ускорители»:
д-р физ.-мат. наук, проф. РАН *К. В. Лотов*, д-р физ.-мат. наук *Н. А. Мезенцев*, д-р техн. наук *В. А. Шкаруба*, канд. техн. наук *С. В. Тарарышкин*, канд. физ.-мат. наук *Д. Е. Беркаев*, канд. техн. наук *Е. В. Козырев*, канд. физ.-мат. наук *В. А. Минаков*, канд. физ.-мат. наук *П. В. Туев*, *И. А. Морозов*, канд. техн. наук *С. В. Хрущев*, *Р. И. Спицын*, *П. Б. Чеблаков*

Экспертный совет подсекции «Автоматизация эксперимента, моделирование и обработка данных»:
д-р физ.-мат. наук, проф. *И. Б. Логашенко*, канд. физ.-мат. наук *П. П. Кроковный*, канд. физ.-мат. наук *Д. Е. Беркаев*, канд. физ.-мат. наук *А. А. Король*, канд. техн. наук *Д. Ю. Болховитянов*, *П. Б. Чеблаков*, *А. В. Герасёв*

INSTRUMENTAL METHODS AND EXPERIMENTAL PHYSICS TECHNIQUE

Section head — Cand. Phys.-Math. Sci. *G. A. Fatkin*

Responsible secretary — *P. B. Cheblakov*

Section scientific committee "Radiophysics and accelerators":
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. RAS *K. V. Lotov*, Dr. Phys.-Math. Sci. *N. A. Mezentsev*,
Dr. Eng. Sci. *V. A. Shkaruba*, Cand. Eng. Sci. *S. V. Tararyshkin*,
Cand. Phys.-Math. Sci. *D. V. Berkaev*, Cand. Eng. Sci. *E. V. Kozyrev,*
Cand. Phys.-Math. Sci. *V. A. Minakov*, Cand. Phys.-Math. Sci. *P. V. Tuev*, *I. A. Morozov,*
Cand. Eng. Sci. *S. V. Khrushchev*, *R. I. Spitsyn*, *P. B. Cheblakov*

Section scientific committee "Experiment automation, modeling, and data processing":
Dr. Phys.-Math. Sci., Prof. *I. B. Logashenko*, Cand. Phys.-Math. Sci. *P. P. Krokovny*,
Cand. Phys.-Math. Sci. *D. E. Berkaev*, Cand. Phys.-Math. Sci. *A. A. Korol*,
Cand. Eng. Sci. *D. Yu. Bolkhovityanov*, *P. B. Cheblakov*, *A. V. Gerasev*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

УДК 537.3

Исследование влияния геомагнитно-индуцированных токов в электрических сетях

Д. П. Григорьев

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

В работе рассматривается такое явление, как геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), что оказывает основное влияние на токопроводящие инженерные сооружения, имеющие удлиненную форму и проложенные вдоль поверхности земли. Основным источником влияния, согласно работе [1], оказались протяженные линии электропередач, расположенные на территории Республики Саха (Якутия). Рассматривается возникновение индуцированных токов, приводятся теоретические примеры максимально возможных значений индуцированных токов по солнечно-земным связям. Раскрываются возможные влияния на энергосистему по примерам, которые случились в ней, где имеются оборудования для измерения токов нулевой последовательности высших гармоник. Оценивается необходимость исследования на территории изучаемого региона.

Для исследования ГИТ выбирается метод мониторинга высших гармоник в электрической сети региона на территории центральных районов Республики Саха (Якутия). В рассмотренных данных взяты все возможные отключения (технологические нарушения), причины которых не установлены. Предположительно, причиной является влияние ГИТ, приведшее к увеличению тока обратной последовательности, из-за которой рабочая точка понижающего трансформатора, класса напряжения 110 кВ, что создало перенасыщение сердечника трансформатора, тем самым вызвав короткое замыкание на обмотках низкого напряжения.

Получена оценка необходимости ведения наблюдения за активностью ГИТ. Кроме того, величина ГИТ сильно зависит от топологии сети, типа трансформатора, ориентации геоэлектрического поля и сопротивлений, которые оказывают сильное влияние на ГИТ, создаваемый геоэлектрическим полем. В результате величина и серьезность ГИТ отличаются от одной системы к другой даже в пределах одного и того же региона. Наконец, из обзора устройств блокировки ГИТ мы можем резюмировать, что эти устройства не гарантируют бесперебойного энергоснабжения.

1. Camporeale E. Space weather in the machine learning era: A multidisciplinary approach // Space Weather. 2018. Vol. 16, no. 1. P. 2–4.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Ю. М. Григорьев

УДК 519.6

Восстановление полиномов из экспонент по интервальным данным

М. А. Звягин

Новосибирский государственный университет

При исследовании плотности земной породы методом мюонной плотнометрии, описанным в [1], возникает задача восстановления зависимости интенсивности потока частиц от глубины. Эта функциональная зависимость в рамках модели из [1] представляет собой выражение вида полинома из экспонент.

Для учета и анализа возникающих при измерении погрешностей было предложено использовать интервальную модель данных.

В работе описывается математическая постановка задачи восстановления функциональной зависимости при накрывающих интервальных данных. Предложена вычислительная технология решения задачи методом максимума совместности [2], сводящаяся к отысканию решения задачи негладкой невыпуклой условной оптимизации.

Реализованы несколько алгоритмов построения зависимости, использующие различные методы решения оптимизационной задачи.

Написан набор тестовых данных для сравнения реализованных алгоритмов.

1. Зюбин В. Е., Петухов А. Д., Розов А. С. Автоматизация измерений мюонным скважинным плотномером // Промышленные АСУ и контроллеры. 2018. № 11. С. 35–41.
2. Шарый С. П. Восстановление функциональных зависимостей по данным с интервальной неопределенностью // Информатика и системы управления. 2022. № 3. С. 130–142.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. С. П. Шарый

УДК 53.082.531

Автоматизированная калибровка системы измерения трехмерной геометрии объекта методами структурированного освещения на основе плоской калибровочной мишени

В. О. Зуев

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

Метод калибровки параллельными сдвигами плоской калибровочной мишени получил широкое применение среди систем измерения трехмерной геометрии объекта на основе структурированного освещения благодаря простоте реализации и возможности обеспечить высокую точность трехмерных измерений. Особенностью данного метода калибровки является необходимость поиска ключевых точек на изображении фотоприемника на каждой итерации калибровки. При этом увеличение количества ключевых точек и калибровочных итераций снижает погрешность измерительного комплекса, но повышает время обработки калибровочных данных оператором.

Цель данной работы — автоматизация калибровки на основе плоской калибровочной мишени системы измерения трехмерной геометрии объекта методами структурированного освещения. Для обеспечения возможности автоматического детектирования ключевых точек и определения их пространственных координат разработан специальный калибровочный паттерн, имеющий периодичную бинарную структуру и уникальный центральный элемент. Узлы калибровочного паттерна задают ключевые точки в пространстве. Для их поиска разработан алгоритм на основе кросс-корреляционного анализа, создающий субпиксельную погрешность детектирования. Структура паттерна обеспечивает его применимость при наклоне относительно горизонтальной оси изображения фотоприемника до 45°.

В результате разработан программный комплекс для автоматизации калибровки плоской калибровочной мишенью системы измерения трехмерной геометрии объекта методами структурированного освещения. На каждой итерации калибровки программный комплекс автоматически детектирует ключевые точки на изображении фотоприемника, восстанавливает их пространственные координаты и аппроксимирует пространственные координаты каждого пикселя фотоприемника. Показана работоспособность разработанных алгоритмов и программного комплекса при работе на аэродинамических стендах.

Научный руководитель — д-р техн. наук С. В. Двойнишников

УДК 53.087

Разработка программного обеспечения для газовых систем детекторов частиц

А. Е. Комарова

Новосибирский государственный университет

Приготовление газовых смесей — важный этап процесса регистрации элементарных частиц. От качества приготовления зависит точность измерений, а следовательно, и качество экспериментальных данных. Комплексные газовые системы, состоящие из множества различных устройств, требуют автоматизации этого процесса. Цель данной работы — разработка программного обеспечения для систем управления газовыми приборами, чтобы в дальнейшем применить их в регистрирующих системах детектора КЕДР.

В ходе работы было изучено устройство газовой подсистемы мюонной системы детектора. Использующиеся в настоящий момент устройства работают по протоколу RS-232. К ним относятся контроллеры потока фирмы Bronkhorst, а также цифровые манометры ДМ5002М, ДМ5002Вн и термометры DS9097. Устройства могут быть расположены на разных компьютерах, в связи с чем для контроля газовой системы необходима сетевая программа управления, объединяющая все компьютеры и все устройства. С другой стороны, чтобы каждая часть системы не зависела от центральной программы управления, на каждом компьютере должна работать автономная программа.

На детекторе имеется реализация системы управления, состоящая из набора программ и блока CFM для одновременного контроля двух потоков. Нашей целью являлось ее обновление. Для этого были решены следующие задачи:

1) для обеспечения единого интерфейса взаимодействия с различными устройствами написан сетевой драйвер, работающий с данными в формате JSON;

2) реализована автономная программа управления устройствами с возможностью обработки аварийных ситуаций;

3) написано консольное приложение для выполнения базовых команд чтения/записи.

В настоящий момент ведется разработка графического приложения управления контроллерами и измерителями потока для проекта TAIGA (республика Бурятия). Приложение имеет два режима работы: локальный и сетевой. В дальнейшем планируется расширение функционала и доработка пользовательского интерфейс. После завершения работы над графическим приложением написанные программы будут использоваться для разработки сетевой программы управления подсистемой приготовления газовой смеси мюонной системы детектора КЕДР.

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

УДК 004.7

Синхронизация массива контроллеров источников питания по протоколу PTP

А. А. Кононов

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

Для обеспечения работы ускорительного комплекса СКИФ требуется синхронизация работы источников питания магнитов с точностью порядка 1 мкс. Каждый источник питания управляется своим контроллером через аналоговый или цифровой интерфейс. Контроллер работает с ОС Linux и имеют подключение к локальной сети Ethernet. Для упрощения системы и повышения ее надежности было решено реализовать синхронизацию работы контроллеров не по выделенным кабельным линиям, а по протоколу PTP (*Precision Time Protocol*), работающему в локальной сети поверх IP.

В ходе работы была проверена достижимая точность синхронизации времени на всех устройствах, в зависимости от наличия аппаратной поддержки PTP на конечных и инфраструктурных сетевых устройствах, в различных комбинациях режимов работы протокола.

Для тактирования подсистем контроллеров с привязкой частоты и фазы к мастер-генератору ускорительного комплекса СКИФ разрабатывается модификация сетевого драйвера ОС Linux для аппаратной платформы контроллеров.

Научный руководитель — канд. техн. наук Д. Ю. Болховитянов

УДК 53.087.45

Быстрый монитор положения и интенсивности пучка СИ для станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ

М. А. Корниевский

Новосибирский государственный технический университет

Для изучения детонационных и ударно-волновых процессов в составе экспериментальных станций на ЦКП СКИФ планируется строительство станции «Быстропротекающие процессы». В ее составе будут работать 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. Поскольку сгустки могут отклоняться от равновесной орбиты, а также различаться по току, то для повышения точности измерений величины сигнала необходим посгустковый монитор положения и интенсивности пучка СИ. Показания этого монитора будут использоваться для корректировки результатов измерений детекторов DIMEX.

Посгустковый монитор положения пучка СИ представляет собой 4 датчика, измеряющие сигнал в окрестностях пучка сверху, снизу справа и слева. При изменении положения пучка меняются соотношения сигнала в соответствующих парах датчиков. При изменении полного потока СИ меняется сумма сигналов всех датчиков. Монитор пучка синхронно с работой детектора DIMEX записывает сигналы со всех датчиков во время эксперимента. После проведения эксперимента результаты, записанные с детектора DIMEX, корректируются в соответствии с сигналами датчиков монитора. Конкретный способ корректировки будет разрабатываться в процессе запуска источника СИ СКИФ.

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. Proceed. 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 004.62+53.087

Разработка архитектуры системы мониторинга состояния детектора СНД

И. Г. Мосейков

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

В Институте ядерной физики (ИЯФ СО РАН) проводятся эксперименты в области физики высоких энергий с помощью сферического нейтрального детектора (СНД). Вся информация, касающаяся установки эксперимента (метаданные, конфигурация, актуальное состояние эксперимента и т. д.), хранится в различном виде и записывается разными способами в отличные друг от друга хранилища. Также важно отметить, что данные привязаны к различным единицам отсчета (ко времени, номеру захода, определенной смене). Мониторинг системы по произвольным критериям и автоматизированное информирование о состоянии необходимых параметров — очень важная задача, решение которой ведет к оптимизации проведения эксперимента. Целью работы является создание пакета инструментов, позволяющего производить анализ текущего состояния эксперимента с последующим наглядным отображением результатов на веб-странице, а также автоматическим и настраиваемым информированием для сотрудников лаборатории в удобном для них виде. Для обеспечения необходимого функционала разрабатываемый пакет будет содержать следующие инструменты: сигнально-аналитический модуль для подсистемы медленного контроля детектора СНД, инструмент для автоматической обработки гистограмм, универсальный сервис информирования.

На данный момент разработаны: сигнально-аналитический модуль и универсальный сервис информирования. Реализация выполнялась с помощью ЯП Python, а также набора дополнительных библиотек и инструментов. Сигнально аналитический модуль предоставляет следующий функционал: получение параметров (напряжения, токи, доступность серверов и т. д.) из различных источников, мониторинг состояния за счет проверки выполнения и наглядного отображения результатов произвольных условий на эти параметры, заданные пользователем. Универсальный сервис информирования позволяет объединить и унифицировать процесс информирования, являясь посредником, предоставляя API для отправки сообщений с возможностью выбора приоритета, конечной точки отправки и отправки с задержкой.

Научный руководитель — К. В. Пугачев

УДК 004.67

Поиск черенковских срабатываний в детекторе черенковских колец ФАРИЧ с использованием нейросети

А. А. Попова

Новосибирский государственный университет

На сегодняшний день основным методом исследования структуры и свойств элементарных частиц является столкновение этих частиц, ускоренных до высоких энергий, и анализ зарегистрированных детекторами данных.

Одним из видов детекторов является детектор черенковских колец на основе фокусирующего аэрогеля. Благодаря излучению Вавилова — Черенкова в радиаторе из аэрогеля диоксида кремния становится возможным определение скорости заряженной частицы по черенковскому углу эмиссии фотонов относительно направления движения частицы, который измеряется по размеру кольца, образуемого зарегистрированными фотонами. Черенковские детекторы, измеряющие скорость частиц, совместно с трековыми детекторами, измеряющими импульс заряженных частиц, позволяют идентифицировать частицы по их массе.

Цель данной работы — создание универсального алгоритма на основе сверточной нейронной сети для регистрации черенковских колец в присутствии множества фоновых срабатываний фотонного детектора. В этой работе используются данные, полученные из моделирования детектора ФАРИЧ на основе фреймворка Geant4. Моделирование описывает радиатор в виде четырехслойного фокусирующего аэрогеля со средним показателем преломления 1,05 и толщиной 35 мм и фотодетектор на основе кремниевых фотоумножителей. В качестве первичной частицы используется заряженный пион с разбросом углов $\theta \in [0, 2\pi/3]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$ относительно нормали к радиатору и скорости $\beta \equiv v/c \in [0{,}957; 0{,}999]$. Обработка данных написана на языке программирование Python3 и использует программную библиотеку для машинного обучения TensorFlow. Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью сверточной нейронной сети, показывает, что такой способ может применяться для поиска черенковских колец и в дальнейшем в качестве дополнительного модуля системы мониторинга.

Научный руководитель — С. А. Кононов

УДК 528.563

Автоматизированная система выставления вертикали в абсолютных баллистических лазерных гравиметрах

А. Ю. Тимртдинов

Институт автоматики и электрометрии СОРАН, Новосибирск
Высший колледж информатики НГУ, Новосибирск

В настоящее время несимметричные баллистические лазерные гравиметры являются наиболее точными и перспективными в задачах определения абсолютного значения ускорения силы тяжести g. На поверхности Земли силовое поле, созданное притяжением земных масс, складывается с силовым полем центробежных сил, возникающим вследствие суточного вращения Земли, и образует гравитационное поле Земли. Сила тяжести характеризуется ускорением g, сообщаемым свободно падающему телу. Эта область быстро развивается, что отражается в заметном количестве публикаций, посвященных данной тематике. Одной из актуальных задач здесь является разработка аппаратуры для измерений абсолютного значения ускорения силы тяжести с относительной погрешностью, не превышающей первые единицы девятого знака.

В работе описан автоматизированный комплекс для выставления вертикали в баллистических лазерных гравиметрах. Основными составляющими гравиметра являются баллистический блок, вакуумная камера, высоко стабилизированный лазерный стандарт частоты, рубидиевый стандарт частоты, интерферометр, блок виброзащиты, микропроцессорный модуль обработки сигналов, две опоры для регулировки угла наклона. Для выставления вертикали используется анализ движения блика рабочего луча, отраженного от передней грани отражателя падающего тела. В качестве приемника луча интерферометра применяется кремниевый четырехэлементный радиально-секторный p-i-n-фотодиод ФДКН-14. Предусмотрен расчет координат пятна, характеризующий качество выставления рабочего луча местной вертикали (отвесной линии). Также система обеспечена протоколом передачи данных между контроллером вертикали AVR Atmega328p и главным контроллером. Управление шаговыми двигателями обеспечивается главным контроллером, на котором установлен драйвер шагового двигателя L6208PD. Комплекс полностью автоматизирован и управляется с компьютера. Применение разработанного комплекса показало его эффективность и позволило получить большой набор экспериментальных данных при проведении исследований.

Научный руководитель — Д. А. Носов

УДК 004.932.1

Разработка методики автоматической сегментации легких экспериментальных животных

Р. Е. Тюстин, О. А. Пашковская

Новосибирский государственный университет

Сегментация является важной частью анализа медицинских изображений для выделения на снимках тканей, органов, патологических изменений. Обработка одного эксперимента (сегментирование области интереса) «вручную» занимает около 20–30 минут. Также точность обработки снимков сильно зависит от индивидуальных особенностей восприятия изображений и клинического опыта персонала. В связи с этим автоматизация сегментации является актуальной задачей, решение которой позволит сократить время обработки КТ-снимков и увеличить точность полученных результатов.

Цель работы — разработка и написание кода программы для автоматической сегментации легких экспериментальных животных, а также отработка работы программы и сравнение с результатами «ручной» обработки.

Изображения компьютерной томографии (КТ) получали с помощью рентгеновской системы SmART+. Окончательные реконструированные данные были преобразованы в формат DICOM с помощью программного обеспечения Pilot. Для разработки программы автоматической сегментации был написан код на языке Python. Проверка работы программы проводилась на основании вычисления средней плотности легких в единицах Хаунсфильда. Полученные после работы программы данные сравнивались с результатами «ручной» обработки.

Алгоритм работы программы: 1) DCM-файл последовательно разбивается на срезы, представляющие собой двумерные массивы из значений коэффициента ослабления вещества; 2) отсекаются данные, сильно отличающиеся от области значений, соответствующих значениям коэффициента Хаунсфильда легких (выбиралась экспериментальным путем, при обработке ряда экспериментов); 3) выделяется эллиптическая область интереса. Значения вне данной области отсекаются; 4) вычисляется среднее значение коэффициента ослабления; 5) изображение конвертируется в формат JPG для визуализации и отслеживания результатов работы программы.

Значения, полученные с помощью предложенного метода обработки, сходятся с результатами «ручной обработки» с погрешностью не более 12,8 %.

Выбранная методика сегментации и реализация программы на данном этапе показала приемлемый результат, однако требуется доработка программы, в частности планируется использовать нейронные сети для уточнения выделения области интереса.

Научный руководитель — О. А. Пашковская

УДК 005.2

Автоматизированная система управления ВЧ-системой ВЭПП-2000

Э. А. Эминов

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

Работа посвящена созданию программного комплекса для управления системами ускорения частиц. Ускорение частиц производится переменным электрическим полем высокой частоты, отсюда и название — ВЧ-система. ВЧ-система — одна из важнейших систем управления коллайдера ВЭПП-2000. Благодаря ее работе пучки заряженных частиц ускоряются до нужной энергии, перепускаются из кольца-накопителя в бустер и далее в коллайдер, а также поддерживается постоянство энергии встречных пучков. Именно поэтому надежность, удобство и стабильность управления ВЧ-системой являются необходимым условием полноценного функционирования коллайдера ВЭПП-2000.

Поскольку система управления ВЧ — одна из подсистем системы управления всего комплекса, то важнейшей задачей является обеспечение согласованности работы ВЧ-системы с другими управляющими подсистемами. В частности, изменение напряжения ВЧ-системы должно происходить синхронно с изменением энергии ведущего магнитного поля. Основными задачами программного комплекса являются предоставление инструментов изменения параметров ВЧ-подсистемы в любом режиме, их контроль, а также автоматизация основных сценариев работы, что позволит дежурному оператору меньше отвлекаться на проверку заданных и фактических параметров работы ВЧ-системы и больше концентрироваться на поведении и изменяющихся параметрах наблюдаемых встречных пучков.

В рамках данной работы был разработан программный комплекс на языках программирования C++ и Python с использованием фреймворков Tango Controls и Taurus, созданных специально для автоматизированного управления ускорительными комплексами (и создания пользовательских интерфейсов) в ускорительной лаборатории ESRF.

Реализованный программный комплекс позволяет осуществлять процесс включения/выключения ВЧ-систем, предоставляет возможность изменения параметров каждого рабочего режима, а также осуществляет переходы между этими режимами как автоматически, от сигнала других подсистем, так и по требованию пользователя. Благодаря ему удалось улучшить стабильность пучков и увеличить коэффициент их перепуска из бустера в коллайдер.

Научные руководители — канд. физ.-мат. наук С. А. Растигеев, Ю. А. Роговский

РАДИОФИЗИКА И УСКОРИТЕЛИ

УДК 53.096

Исследование возможности моделирования теплового воздействия плазмы на дивертор токамака с помощью частотно-импульсного электронного пучка

Н. Абед

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

Проблема эрозии вольфрамовой облицовки вакуумной камеры токамака-реактора, находящейся в непосредственном контакте с термоядерной плазмой, особенно остро стоит в области дивертора токамака. Наибольшую угрозу для элементов облицовки представляют интенсивные импульсные тепловые нагрузки: срывы плазменного шнура и периодические неустойчивости периферийной плазмы (ELM — *Edge Localized Modes* тип 1).

Оценочная величина тепловых нагрузок вследствие ELM типа 1 для международного токамака ИТЭР достигает ~ 0,6 МДж/м^2 при субмиллисекундной длительности процесса. Частота возникновения ELM-событий в ходе рабочего импульса токамака может быть на уровне 10 Гц (при времени жизни плазмы ~ 100 с в одном рабочем импульсе), при этом полное число таких событий за весь жизненный цикл работы установки ИТЭР с термоядерной плазмой может превысить уровень 10^8.

Экспериментальных данных, позволяющих надежно оценить степень эрозии вольфрамовой облицовки токамака-реактора на протяжении всего срока службы, к настоящему моменту не существует.

Таким образом, изучение эрозии вольфрама при циклическом импульсном нагреве на частоте в 10–20 Гц, при совокупном числе импульсов нагрева $\geqslant 10^7$, плотностях энергии ~ 1 МДж/м^2, субмиллисекундной длительности импульса нагрева и размере облучаемой площади около 1 см^2 представляется актуальной задачей.

Для имитации теплового воздействия предполагается использовать частотно-импульсный источник электронного пучка с энергией 15–20 кэВ на основе накаливаемого катода. Пучок должен обеспечивать экспозиционную нагрузку ~100 Дж/см^2 при длительности импульса около 1 мс на поверхности мишени на площади около 1 см^2, работать на частоте 10–20 Гц при полном числе импульсов на мишень до 10^7 без необходимости технического обслуживания.

Научный руководитель — Д. А. Никифоров

УДК 537.534.72

Изготовление и исследование магнитных элементов для каналов транспортировки ионов для FAIR

С. А. Быков

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

В Институте ядерной физики работали над проектом транспортного канала ионов HEBT. HEBT (*High Energy Beam Transport*) — перепускной канал между ускорительными кольцами SIS18, SIS100 и экспериментальными установками.

Целью данной работы является исследование магнитных элементов для перепускного канала HEBT. Рассматривается транспортный канал между SIS18 и SIS100, который состоит из дипольных магнитов, корректоров и квадрупольных линз. Для расчета магнитных элементов в программе COMSOL были созданы упрощенные модели [1].

Для измерения использовались вращающаяся катушка [2] и каретка с массивом датчиков Холла. Измерено и рассчитано магнитное поле магнитных элементов канала от SIS18 до SIS100. Результаты расчетов сравнивались с результатами измерений.

1. Zickler Th. Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets / ed. by D. Brandt // Proc. CAS-CERN Accelerator School: Magnets. Bruges, 2009. CERN-2010-004.
2. Павленко А. В. Многофункциональные цифровые интеграторы для прецизионных измерений магнитных полей в элементах ускорителей: дис. … канд. техн. наук: 01.04.20. Новосибирск, 2015.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук, доц. И. И. Морозов

УДК 621.389

Разработка специализированного преобразователя заряд-напряжения для бортового спутникового детектора дозы ионизирующего излучения

В. И. Комаров

Новосибирский государственный университет

Одним из факторов, влияющих на срок бесперебойной эксплуатации космического аппарата (КА) на околоземной орбите, является космическая радиация. Для контроля накопленной дозы радиации КА отделом аэрокосмических исследований НГУ был разработан детектор дозы ионизирующего излучения (ДДИИ).

ДДИИ входит в состав бортового диагностического комплекса БДК-2М, предназначенного для контроля и учета дестабилизирующих воздействий факторов космического пространства при натурной эксплуатации. Основная функция ДДИИ — измерение потоков заряженных частиц: электронов с энергиями от 100 кэВ до 5 МэВ, тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) от 1 до 45 МэВ и солнечных космических лучей (СКЛ) с энергиями от 10 до 500 МэВ.

Для регистрации ТЗЧ в ДДИИ используется PIPS-детектор, для регистрации электронов и СКЛ — электронно-протонный телескоп, регистрирующий частицы методом «ΔE–E» [1], для регистрации ΔE — PIPS-детектор. Энергия полного поглощения E регистрируется сцинтилляционным детектором, изготовленном на основе GAGG:Ce. Оптический сигнал считывается с применением микропиксельных лавинных фотодиодов SiPM. Сигналы с детекторов усиливаются с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) [2], и далее усиленный сигнал поступает в блок обработки сигналов.

Основная сложность в разработке блока усиления сигнала — обеспечить высокое соотношение сигнал/шум, поскольку на него влияет множество факторов, таких как температура, токи утечки с детектора, собственные шумы ЗЧУ, шумы питания, наводки и т. д.

Данная работа посвящена разработке летного блока усиления сигналов с кремниевых детекторов SiPM и PIPS, удовлетворяющего низким шумовым характеристикам и обеспечивающего регистрацию частиц с пороговой энергией 50 кэВ.

1. Fennell J. F. et al. Current energetic particle sensors // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2016. Vol. 121, № 9. P. 8840–8858.

2. Акимов Ю. К. (ред.) Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук В. Н. Горев

УДК 533.922

Моделирование кильватерного ускорения электронов в плазменном канале с лазерным импульсом в качестве драйвера

Д. Д. Кутергин

Новосибирский государственный университет

Ускорители заряженных частиц являются незаменимыми инструментами в исследовании окружающего мира. Однако новые открытия в области физики высоких энергий требуют все большего размера установок. В связи с этим особый интерес в последнее время вызывает технология кильватерного ускорения — метод ускорения пучка заряженных частиц в волне, возбужденной в плазме пучком частиц или лазерным импульсом. Использование плазмы позволяет получать поля более гигавольта на метр (рекорд — 200 ГВ/м).

Пока что максимальный набор энергии электронами в плазме (42 ГэВ) не превышает рекорд обычных ускорителей (104,5 ГэВ), однако с появлением новых драйверов ситуация может поменяться. Пример такого драйвера — лазерный импульс Центра исследования экстремального света (ЦИЭС).

Процессы, происходящие в кильватерной волне, нелинейны, а их длительность составляет меньше одной пикосекунды, поэтому для успешного эксперимента необходимо предварительно проводить компьютерное моделирование. Для таких задач в ИЯФ СО РАН был разработан программный комплекс LCODE, позволяющий получить распределение заряда, полей и кильватерного потенциала методом частиц в ячейках.

Целью данной работы является проверка численным моделированием, до какой энергии можно ускорить электронный сгусток (витнесс) в плазме, если в качестве драйвера выступает лазерный импульс ЦИЭС (Саров).

Главная сложность заключается в том, что поиск проводится сразу по нескольким параметрам, а время одного расчета занимает 1000 ч процессорного времени. Поэтому сначала подбирается одна группа параметров, причем энергия электронов оценивается упрощенно (как интеграл напряженности электрического поля по пройденному расстоянию). Затем для электронного сгустка зарядом 50 нКл при помощи череды более коротких расчетов подбираются наиболее оптимальные длина и продольная координата.

Оказалось, что лазерного импульса с энергией 400 Дж достаточно, чтобы получить среднюю энергию сгустка 100 ГэВ. И хотя задача оптимизации параметров поставлена нестрого, ведь приходилось выбирать между меньшим энергоразбросом и большей энергией, удалось получить пучок с энергией 91 ГэВ и энергоразбросом менее 1 %.

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

УДК 537.871.1

Результаты моделирования переходного излучения в пакете CST Studio Suite: подготовка к эксперименту

М. А. Лаппо

Томский политехнический университет

На микротроне ТПУ перед проведением исследований по генерации излучения с винтовым волновым фронтом [1] электронным пучком с энергией 5,7 МэВ от металлических мишеней необходимо провести несколько этапов моделирования. В экспериментах предполагается, что пучок электронов пролетает через спиральную мишень с отверстием и далее пересекает плоский наклонный экран. Для проведения моделирования в пакете CST ранее были построены модели разных мишеней [2].

На данном этапе работы были проведены расчеты генерируемого излучения во временной динамике (от 0 до 2,5 нс) для разных мишеней и получены спектральные и угловые характеристики излучения в ГГц области частот (в диапазоне 5–35 ГГц). Моделирование проведено для следующих четырех схем: круглой мишени с круглым отверстием (кольцевой мишени) в случае нормального пролета пучка, наклонного плоского прямоугольного экрана, системы «кольцевая мишень + наклонный экран», системы «спиральная мишень + наклонный экран».

Можно сделать вывод, что пакет позволяет моделировать процессы генерации переходного излучения и выдает результаты, сопоставимые и совпадающие с теорией в аналогичных случаях. По итогам моделирования в дальнейшем планируется провести более детализированные настройки моделей (расширить частотный диапазон, увеличить количество проб — точек наблюдения излучения, уменьшить шаг сетки во всей области моделирования) и автоматизировать обработку файлов с результатами моделирования, экспортируемых из пакета CST.

Работа выполнена при поддержке ГЗ «Наука» (№ 19.0003.ГЗБ.2023).

1. Бердников Н. С., Шкитов Д. А., Шевелев М. В. Подготовка к эксперименту по исследованию закрученного излучения на микротроне ТПУ // Физ.-техн. проблемы в науке, промышленности и медицине. Сб. тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф., г. Томск, 2022 г. Томск: Ветер, 2022. С. 82–83.
2. Лаппо М. А., Шкитов Д. А. Построение моделей мишеней переходного и черенковского излучений в CST Studio Suite // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики: Материалы 60-й Междунар. науч. студ. конф. 2022 года. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2022. С. 281.

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

УДК 535-34

Варианты вставных устройств источников синхротронного излучения 4-го поколения для реализации методов наноскопии в мягком рентгеновском диапазоне

А. В. Мурзина, Ю. В. Хомяков

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

В настоящее время особый интерес представляет задача прямого прижизненного наблюдения молекулярно-клеточных процессов в динамике с высоким пространственным и временным разрешением. Эта задача может быть решена методами наноскопии в мягком рентгеновском диапазоне, в частности в так называемом окне прозрачности воды (λ = 2,3–4,3 нм) [1] на источнике синхротронного излучения (СИ).

Современные накопители источников СИ 4-го поколения, такие как MAX-IV и строящийся ЦКП «СКИФ», имеют сверхнизкий эмиттанс (~ 100 пм·рад [2, 3]), следствием чего является малый размер источника и высокая степень когерентности генерируемого излучения. В «окне прозрачности воды» применима оптика нормального падения с большой числовой апертурой (~ 0,1) [1]. Используя такую оптику на станциях источников СИ 4-го поколения, можно добиться нанометрового разрешения и малого времени экспозиции исследуемого образца. Кроме того, существует возможность реализации когерентных методов, требующих меньшее число фотонов и позволяющих снизить получаемую биологическим объектом дозу.

Целью данной работы является рассмотрение вариантов вставных устройств для экспериментальной станции второй очереди «Наноскоп» [1] на ЦКП «СКИФ» и станции *SoftiMax* на MAX-IV. Проведено количественное сравнение возможностей вставных устройств при разных режимах работы по следующим параметрам: размеру источника, угловой расходимости, спектральным характеристикам, доле когерентных фотонов. Построена карта плотности мощности и рассчитана интегральная мощность в апертуре фронтенда.

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. Tavares P. F. 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 537-52

Разработка импульсного ксенонового осветителя сверхвысокого давления и измерение его яркостных и временных параметров

А. Г. Параскун

Новосибирский государственный университет

Целью данной работы является разработка, изготовление и исследование ксеноновой лампы вспышки сверхвысокого давления с минимально возможной длительностью вспышки, областью свечения размером 2–5 мм и мощностью излучения в импульсе от 2 до 15 МВт. Лампа необходима, в частности, для проведения синхронной оптической и рентгеновской съемки детонации ВВ в пучке синхротронного излучения с интервалами между кадрами 100–200 нс.

Для решения задачи выбрана ксеноновая лампа ИСШ-400 с внутренним поджигающим электродом. Лампа использовалась не в штатном режиме, так как необходим уровень энергии до 25 Дж. На лампу разряжается малоиндуктивный импульсный конденсатор К75-30 с касторовой изоляцией номиналом 2 мкФ, 5кВ и индуктивностью 25 нГн. Самая короткая вспышка наблюдалась при апериодическом разряде конденсатора. Для этого в разрядную цепь было включено сопротивление, равное волновому. Оно составило 0,1 Ом.

Для исследования зависимости формы вспышки от времени был разработан и изготовлен фотодиодный датчик, время реагирования которого составляет 2 нс. Максимум интенсивности достигается за 1 мкс, далее интенсивность вспышки спадает до полувысоты за 1,2 мкс. Основная энергия вспышки лампы локализована в 1,5 мкс импульса.

Замечено, что быстрая компонента яркости свечения успевает за электрической мощностью тока через лампу, тогда как медленная компонента продолжает затухать дольше, так как происходит рекомбинация плазмы. Время релаксации плазменной дуги в лампе происходит за 3–4 мкс после прекращения протекания тока между электродами.

Макрофотосъемкой получены изофоты распределения яркостей в плазменной дуге. Обнаружено затемненное пространство в канале разряда. Также яркость дуги около одного из электродов оказалась выше, чем около другого, что, возможно, объясняется возникновением на катоде центров взрывной эмиссии.

Научный руководитель — д-р техн. наук, проф. Е. И. Пальчиков

УДК 621.384.6

Изучение метода определения магнитной оси мультипольных элементов ускорителей с помощью оптической визуализации магнитных полей

С. В. Рева

Новосибирский государственный университет

Современные требования к точности изготовления ускорителей очень высоки. Это относится как к изготовлению отдельных магнитных элементов, так и к их выставке в единую систему. Поскольку производство магнитов связанно с различными неточностями изготовления и сборки, а также со случайными ошибками, полагаться на расчетные характеристики нельзя. Для определения реальных параметров созданных магнитных элементов применяются различные методы.

Данная работа посвящена исследованию альтернативного метода измерения распределения магнитных полей в магнитных элементах. Он основан на магнитооптическом эффекте вращения плоскости поляризации света в оптически активных средах, позволяющем визуализировать распределение интенсивности магнитного поля. В работе описаны метод создания активной оптической среды и эксперименты по наблюдению визуализации распределения интенсивностей магнитного поля в постоянном квадруполе и постоянном одинаково-полюсном диполе. Также был разработан алгоритм поиска положения магнитной оси для этих магнитных элементов и написана программа, его реализующая. Для дальнейших исследований был спроектирован и собран прецизионный юстировочный стенд.

Результаты данного исследования показывают перспективность описанного метода и необходимость дальнейшей его разработки.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук, проф. О. И. Мешков

УДК 621.384.6

Разработка сверхпроводящего вигглера для станции 1-3 ЦКП СКИФ

А. А. Седов

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

В настоящий момент ведется строительство нового источника синхротронного излучения поколения 4+ СКИФ. В первой очереди строительства источника предполагается ввести в эксплуатацию 6 станций, среди которых станция 1-3 «Быстропротекающие процессы». На данной станции будут реализованы методики рентгенографии и дифрактометрии с высоким временным разрешением. Для проведения исследований на секции «Динамические процессы» требуется излучение в диапазоне от 20 до 40 кэВ, на секции «Плазма» — до 70 кэВ с максимальным потоком фотонов на один электронный сгусток.

Для удовлетворения всех поставленных требований на станции в качестве вставного устройства будет использован вигглер, оптимизированный на максимальную плотность потока фотонов на оси при энергии фотонов 35 кэВ для пучка электронов с энергией 3 ГэВ. Параметры вигглера соответственно: магнитное поле 2,7 Тл, период 27 мм при величине магнитного зазора 7 мм и количестве основных полюсов 148.

Целью данной работы является разработка и оптимизация параметров магнитной структуры сверхпроводящего вигглера, а также расчеты влияния магнитного поля, которое создает вставное устройство на параметры электронного пучка и его динамику. При помощи программы для моделирования магнитных полей Mermaid и программного пакета Mathcad были проведены расчеты и оптимизация параметров основных и краевых полюсов магнита, а также величины первого и второго интегралов магнитного поля. Для проверки правильности расчетов был изготовлен и протестирован в погружном криостате короткий прототип из 20 катушек. Измерения магнитного поля были проведены с помощью датчиков Холла. В программе Mathcad были выполнены расчеты влияния поля вигглера на параметры и динамику пучка электронов.

Результаты испытания прототипа согласуются с расчетными. На основе данного прототипа будет создан полноразмерный магнит из 74 основных и 2 пар краевых полюсов.

Научный руководитель — д-р физ.-мат. наук Н. А. Мезенцев

УДК 621.3.07

Разработка согласующего устройства с автоподстройкой для ВЧ плазменного эмиттера

А. В. Тюкавкин

Новосибирский государственный университет

Плазменный эмиттер повсеместно используется в физике плазмы для генерации в больших объемах однородной плазмы при низких давлениях газа. Во время работы плазменный эмиттер изменяет свои характеристики, что создает ряд сложностей для проведения экспериментов. Одной из основных проблем является рассогласование системы при изменении входного импеданса эмиттера. Из-за индуктивного характера входного импеданса подключение эмиттера к 50 Ω генератору напрямую приведет к рассогласованию системы, тракт передачи мощности нуждается в доработке и оптимизации.

Целью работы является разработка согласующего устройства с автоподстройкой для ВЧ плазменного эмиттера. Разработка проводилась в три этапа.

На первом этапе был произведен расчет элементов для построения тракта передачи мощности, выбор схемы согласующего устройства, определение параметров конденсаторного экрана. На основе этих данных было разработано и реализовано согласующее устройство, подстройка которого осуществлялась вручную. Для обобщения на случай переменной нагрузки было решено разработать систему автоподстройки.

На втором этапе с помощью согласующего устройства были получены и проанализированы зависимости импеданса цепи от управляющих параметров согласующего устройства.

На третьем этапе разработано и реализовано согласующее устройство с автоподстройкой. Емкость конденсаторов изменяется с использованием шаговых двигателей. Управление осуществляется с помощью аппаратной платформы Arduino Mega 2560 и драйверов шаговых двигателей A4988. Программа управления написана на встроенном ПО Arduino IDE.

Научный руководитель — И. Д. Маслаков

УДК 621.384.6

Определение нелинейных характеристик пучка с помощью пооборотных измерений

Н. А. Чепурной

Новосибирский государственный университет

Современные источники синхротронного излучения должны производить излучение требуемой яркости. Однако неточная выставка магнитов, ошибки в величине подаваемых на магниты токов ведут к значительному снижению яркости. Переключение режимов источника СИ также может сопровождаться ошибками в величине и форме магнитного поля внутри магнитов.

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, местоположения и силу азимутальных возмущений магнитного поля внутри ускорителя. В то время как для диполей и квадруполей существуют другие основанные на измеренных параметрах пучка методы определения ошибок в силе магнитов, для скью-квадруполей 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, особенно это актуально для установок с большим числом корректоров. Кроме того, неточности выставления параметров магнитной структуры могут вызвать увеличение связи горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний, что влечет за собой изменение поперечных размеров пучка и яркости синхротронного излучения.

В задачи данной работы входит вычисление амплитудозависимой расстройки частот и хроматизма из анализа пооборотных колебаний пучка, применение RDT-диагностики для выявления азимутальных возмущений магнитного поля и вычисления коэффициента связи, отношения эмиттансов на коллайдере ВЭПП-4М.

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

УДК 621.384.6

Запрещенные полосы бетатронных частот в коллайдере с круглыми пучками ВЭПП-2000

Д. Э. Чистяков

Новосибирский государственный университет

В основе анализа динамики частиц в циклических ускорителях лежит исследование устойчивости линеаризованной оптической модели магнитной структуры ускорителя с использованием аппарата теории Флоке. В пределах устойчивой зоны для описания движения вводятся элементы этого аппарата: бетатронные частоты ν_x и ν_y и огибающие бетатронных колебаний, а также, на этой основе, понятие об ограничении динамической апертуры в фазовом пространстве бетатронных колебаний.

В магнитной структуре коллайдера ВЭПП-2000 принципиальную роль для создания и контроля круглых встречных пучков играет осесимметричный финальный фокус, реализованный с помощью соленоидов. В результате связь горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний вносит существенный вклад при определении устойчивых зон бетатронного движения. При приближении частот к границе зоны происходят сильные биения огибающих и соответствующее резкое уменьшение динамической апертуры кольца. Таким образом, на плоскости бетатронных частот появляются запрещенные полосы.

Наличие такого рода ограничения напрямую влияет на ключевой параметр коллайдера — светимость, так как они стесняют свободу размещения «рабочей точки» в желаемое место на плоскости бетатронных частот при настройке оптимального режима светимости.

В данной работе был выполнен теоретический расчет запрещенных полос бетатронных частот при различных возмущениях магнитной системы в комбинации с соленоидальной фокусировкой, а также произведен поиск реальных запрещенных зон на действующем коллайдере ВЭПП-2000.

Научный руководитель — Е. А. Переведенцев

УДК 53.087.45

Модуль блокировок и мониторинга системы импульсного питания

Т. А. Чучук

Новосибирский государственный университет

Импульсные источники питания (ИИП) для магнитных элементов ускорительных комплексов [1], предполагающие наличие больших емкостей, заряженных до высоких напряжений, являются опасными элементами с поражающим фактором электрического тока. Данная проблема стоит особенно остро, когда несколько независимых ИИП установлены в едином крейте. Возникает необходимость в создании общего модуля, следящего за безопасностью всех ИИП в стойке. Именно эта цель была поставлена в данной работе.

Согласно техническому заданию ИЯФ СО РАН, в стойке находится 8 источников [2]. Перечислим параметры, за которыми должен следить модуль безопасности:

1) состояние заземлителей — подняты или опущены;
2) двери стойки — открыты или закрыты;
3) датчики температуры в стойке;
4) внешние и внутренние разрешения/запросы на работу — разрешение на зарядку емкостей для каждого источника.

Эти параметры поступают на входные каналы модуля блокировок и мониторинга, и после их обработки модуль отправляет сигналы на выходные каналы:

1) сигнал на силовые реле, включающие/выключающие питание стойки;
2) сигнал заземлителям источников — поднять или опустить;
3) ответ на внешний запрос о начале работы источника;
4) индикация на стойке.

Отметим отдельно, что ИИП работают от служебного источника напряжения 48 В 3 кВт. Параметры, которые выдает данный преобразователь, отображаются на мониторе, расположенном в непосредственной близости от него. Датчики температуры и световая индикация также находятся непосредственно на стойке с источниками. Однако есть необходимость следить за этими параметрами удаленно, например из пультовой ускорителя, т. е. требуется разработать внешний интерфейс для модуля мониторинга, что и было сделано в данной работе. Все эти данные пользователь получает от сервера модуля мониторинга по статическому IP-адресу стойки с источниками.

Плату модуля мониторинга условно можно разделить на две части: все сигналы и блокировки обрабатывает ПЛИС семейства MAX V, а высокоуровневые задачи обработки информации и передачи ее пользователю принимает на себя STM-контроллер.

1. Fatkin G. LIA-20 control system project // 16th ICALEPCS. 2017. P. 1485–1488.
2. Крылов А. А. ГИД-160 — импульсный генератор питания магнитных элементов ускорителей // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. № 5. С. 457–463.

Научный руководитель — А. А. Крылов

УДК 621.384.6

Изучение возможностей плавной перестройки режимов генерации излучения Новосибирского ЛСЭ

Е. С. Эптешев

Новосибирский государственный университет

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) — это приборы, преобразующие энергию ультрарелятивистских электронов в энергию электромагнитного излучения. Для генерации излучения заряженные частицы проводят через знакопеременное повторяющееся магнитное поле, создаваемое специальным магнитом — ондулятором. Одним из отличительных свойств ЛСЭ является возможность генерации мощного лазерного излучения с любой длиной волны из допустимого диапазона, а также ее плавная перестройка.

Новосибирский ЛСЭ, созданный в ИЯФ СО РАН, — это комплекс, состоящий из трех ЛСЭ, установленных на одно-, двух- и четырехдорожечный ускоритель-рекуператор. Выбор рабочего лазера определяется режимом магнитной системы установки.

Длина волны излучения ЛСЭ зависит от энергии электронов, периода и амплитуды магнитного поля ондулятора. При этом перестройка длин волн в рамках небольшого диапазона, определяемого энергией электронного пучка, осуществляется с помощью изменения параметров ондулятора. Переход между диапазонами излучения обычно происходит с помощью загрузки режимов магнитной системы и ускоряющей структуры установки, настроенных в предыдущие рабочие смены. Однако ввиду относительно низкой энергии электронных сгустков повторение настроек ускорителя может не приводить к достижению генерации. Другим способом перестройки диапазонов излучения является плавное изменение энергии электронов в режиме с уже полученной генерацией ЛСЭ. Для этого требуется изменять напряжение ВЧ-резонаторов совместно с полями магнитной структуры установки.

Основной целью данной работы является изучение влияния перестройки напряжения ускоряющей системы на магнитную структуру Новосибирского ЛСЭ ИЯФ СО РАН. Для моделирования движения электронных сгустков на первой очереди Новосибирского ЛСЭ использовались математические библиотеки языка программирования Python и программа Elegant.

Научный руководитель — канд. физ.-мат. наук Я. В. Гетманов

УДК 533.922

Изменение ускоряющего кильватерного поля после разлета протонного драйвера в вакууме

В. М. Ярыгова

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

Кильватерное ускорение использует плазму в качестве ускоряющей структуры, возмущая в ней волну прохождением первичного пучка, называемого драйвером. Этот метод позволяет ускорять электронные сгустки до высоких энергий.

В CERN проводится эксперимент AWAKE, реализующий кильватерное ускорение с длинным протонным пучком в качестве драйвера. Драйвер разделяется на микросгустки, т. е. происходит самомодуляция, после чего поле имеет стабильную амплитуду. Если инжектировать электронный ускоряемый пучок сразу за драйвером, то во время самомодуляции протонного пучка эмиттанс электронного сгустка увеличивается. Поэтому для эффективной инжекции ускоряемого пучка плазменная секция будет разделена на две, с вакуумным промежутком между ними, в котором и будет происходить инжекция.

Точная длина вакуумного промежутка пока не известна, так как будет определяться особенностями конструкции. Поэтому возникла идея изучить, как меняется способность протонного драйвера возбуждать плазменную волну после его разлета в вакууме. Изменение поперечного размера пучка влияет на амплитуду создаваемого им поля. Рассмотрены предельные случаи, удовлетворяющие двум режимам работы ускорителя: $k_p\sigma_r 1$ — предел широкого пучка; $k_p\sigma_r < 0{,}5$ — предел узкого пучка, где σ_r — радиус протонного драйвера, k_p — плазменное волновое число.

Оба предела описаны с помощью линейной теории [1], получены аналитические зависимости, описывающие изменение амплитуды ускоряющего поля после пролета драйвером вакуумного промежутка. Аналитические формулы совпали с результатами численного моделирования с точностью примерно 20 %.

Для предела широкого пучка решение, описываемое линейной теорией, не является единственным. При определенных параметрах задачи поле, создаваемое драйвером, становится больше, достигается режим насыщения. Работа в этом режиме позволит получать наибольшую амплитуду ускоряющего поля.

1. Lu W. et al. Limits of linear plasma wakefield theory for electron or positron beams // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12, № 6. P. 063101.

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

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Chen Junxi 19
Lomov E.....20
Navjeet Kour.....20
Snegirev A. V.....75
Svirsky D. 20
Абдюшев Н. Ю.....76
Абед Н. 53, 288
Аверкиев А. А. 175
Агейков А. В. 263
Адамов К. Н. 54
Айдаков Е. Е.....176
Акимова Е. Б. 77
Акимова М. П. 177
Акинина М. Д.....157
Александрийский В. В. 181
Алябьев А. А. 179
Анофриев В. А. 180
Антипов Т. В. 21
Апостол Ю. С.....121
Апрелов Н. А.....22
Артишевский К. В. 122
Асеев А. С. 55
Асылкаев А. М. 264
Афанаскин Д. С.....123, 136
Ахмадиева А. А.....199
Багрецова А. Н. 266
Баздырев Н. А. 23
Байнаев-Мангилев Н. П. ..159
Балахнин А. В. 78
Батракова А. А. 181
Батькова Я. О.....182
Бетке И. А. 125
Бобков М. Е. 183
Богомолова А. И. 160
Богословцева А. Л. 184
Бойко К. Р. 185
Борискин А. А. 126
Бородулина А. В. 226
Бочкарев В. В. 56
Бочкарев Н. В. 24
Буинов А. С. 80
Булатов А. А. 186
Бурдилов А. А. 127
Бурдин В. Е. 251
Бурмистров В. А. 181
Буянов Д. А. 161
Быков С. А. 289
Бычкова С. А. 25
Валихов В. Д. 215
Ван Юйхань 79
Васильев М. М. 128, 148
Ведькал А. В.....227
Вересов С. А. 108
Веселов А. Д. 108
Ветрова А. В.....273
Вишняков Г. Е. 26
Волоси В. М. 27
Вострецов С. О. 129
Гапич Д. И. 80
Гареев Т. И.....7
Гартман А. Д. 21
Гензе И. Ю.....81
Говоров Н. М. 187
Гогина О. А.....82
Грибанов Д. С.....28
Григорьев Д. П. 277
Губа В. О.....252
Гудыма Т. С. 191
Гурьянов Р. А.....151
Данилов П. А.....131
Данилов Я. А. 189
Дашиева Н. С. 33
Дементьев С. А. 228
Демиденко Н. В.....8
Демина С. В.....190
Дерибина Е. И. 83
Деринг Е. Д. 132
Дик Д. В. 191
Дмитриев Д. В.....93
Доброгост П. В.....84
Добрынина Е. А. 229
Долгирев В. О. 29, 45
Дун Сювэнь 49
Дураков Д. Е.....85
Ерохин А. Д. 9
Ершов А. П. 269
Жебсаин Т. В. 192
Жерибор М. О. 133
Жилицкий В. Е.....86
Журенков Я. А.....57
Зайцев В. А. 157, 162, 166
Захожев К. Е. 87
Звягин М. А. 278
Золотарев Н. А. 193
Зорькина А. И.....134
Зоткин М. А.....196
Зубков Д. А. 253
Зуев В. О. 279
Зур И. А. 84
Иваненко Д. С. 135
Иванов Д. Р. 254
Иванов И. Е. 177
Иванов Р. С. 58
Инь Липин 88
Ищенко С. С. 267
Казанцева Е. А. 77
Калачев И. В. 89
Калинин В. А. 90
Канарская М. А. 163
Караван А. В.....268
Кардаш Д. Ю. 59
Кахидзе Н. И. 203
Кашкаров А. О. 269
Киселева О. С. 91
Клименко Д. А. 60
Князев М. Д. 30
Ковалева М. А. 273
Ковзик В. М. 92
Козенко К. В. 31
Козлова К. С. 32
Колесникова В. А. 33
Колоколов М. И.....230
Колосовский Д. А. 93
Комарова А. Е. 280
Комаров В. И. 290
Комлина С. В. 94
Коновалова В. Д. 62
Кононов А. А.....281
Кормушаков Т. Ю. 63
Корниевский М. А. 282
Косенко А. В. 164
Кох К. А. 50

Крутский Ю. Л. 191
Крысенко Д. С. 34
Кузнецова А. А. 64
Кузнецова Л. С. 95
Кузнецов Т. А. 255
Кузьмина К. С. 165
Кузьмина П. О. 65
Кузьминых А. А. 269
Кукенов О. И. 96, 110
Куликова А. В. 97
Кульбакин И. С. 198
Кундашкин А. Д. 123, 136
Купцова А. О. 36
Куршаков В. А. 66
Кутергин Д. Д. 291
Кушнарев Б. О. 91
Кырова Е. Д. 98
Лаврехин Д. В. 99
Лавронов К. Д. 138
Лактионова А. В. 231
Лаппо М. А. 292
Лирмак А. Ю. 166
Литвинов И. А. 232
Литвинцева К. А. 194
Локтюшин О. Ю. 10
Лотов И. К. 67
Лукин С. Э. 195
Лукьянов А. А. 139
Лукьянов Ан. А. 140
Лунев Н. А. 141
Лунин А. О. 196
Лутченко И. И. 142
Луценко Д. Б. 37
Майдэбура Я. Е. 100, 197
Макаренко А. Е. 198
Макарова Н. А. 39
Макаров К. А. 199
Максимов М. А. 101
Маракtаев Б. И. 270
Марчий Г. В. 200
Матрохина А. Н. 181
Махмудиан М. М. 102
Мезенцев С. И. 143
Мельник А. В. 144
Микаева А. С. 103
Микерин С. Л. 50
Мирошкина В. Д. 201
Михайлов А. В. 153
Михайлова У. В. 11
Морозова П. А. 182, 202
Мосейков И. Г. 283
Мубараков Р. Г. 203
Мункуева Ж. Э. 40
Муравьев И. М. 151
Муратов В. И. 104
Мурашко С. Н. 41
Мурзина А. В. 293
Назаров Р. С. 101
Насонов Д. М. 233
Науменко П. Р. 68
Некля Ю. А. 105
Ненашева Д. А. 167
Непомнящих В. А. 145
Низенко А. В. 180
Николаев М. С. 12
Николаев Н. А. 50
Никулина Я. А. 106
Новиков А. Д. 42
Новиков И. В. 181
Ноговицына С. Р. 43
Нуриахметов З. Н. 204
Обершт С. Д. 256
Образцов И. В. 257
Олейник В. Л. 91
Омельченко А. Н. 234
Орлов Ю. В. 69
Осик Н. А. 235
Осипов А. А. 146
Охотников Н. В. 70
Павлов А. А. 205
Павлов Г. Р. 206
Палкин Е. В. 142
Параскун А. Г. 271, 294
Пашковская О. А. 286
Пашнина Е. А. 221
Першин Д. Д. 207
Першин И. Д. 258
Петрова А. В. 147
Петрова Ю. С. 91
Петров И. Ю. 208
Пластинина Д. М. 236
Платонов В. В. 210
Подаров Р. А. 237
Полозова П. А. 71
Пономарев С. А. 93
Попова А. А. 284
Прокопьев К. Э. 13
Пустовитов В. Д. 60
Пушкин И. А. 168
Растрыгин Д. С. 29, 45
Рева С. В. 295
Ревякин А. А. 46
Рибенек В. А. 107
Ризк Х. А. 47
Роговешко В. М. 238
Родригес Р. Д. 175
Рубцов И. А. 269
Савина К. Г. 108
Сагитов А. Р. 240
Самохвалов Ф. А. 148
Самсоненко А. А. 241
Сарыпов Д. И. 109
Сатонкина Н. П. 269
Седов А. А. 296
Селиховкин М. А. 201
Семенов Т. И. 211
Семушев С. Н. 212
Серебренникова П. С. 213
Сере С. Э. 48
Серов С. В. 108
Сивцева А. В. 177
Симонян Г. К. 242
Синкина И. Л. 203, 215
Скоробогатов А. Д. 259
Смирнова К. А. 216
Смирнов Н. И. 148, 149, 152
Соколов А. С. 96, 110
Соловова Н. Ю. 111
Сорокин Д. В. 112
Стародубцева Э. С. 169
Старосельцева А. А. 150
Султановская А. С. 217
Сурменева М. А. 225
Суханов М. А. 218
Суюндукова А. Т. 170
Тарулин М. А. 151
Тимртдинов А. Ю. 285
Титовец Я. Д. 148
Туманик А. С. 272
Тупицина Д. Н. 273
Тюкавкин А. В. 297

Тюстин Р. Е. 286
У Цзяи 113
Федотов С. С. 202
Филиппов А. А. 191
Фоменко М. В. 172
Фролов Д. И. 114
Хазем Д. 222
Хамуд Г. 115
Харченко Н. А. 219
Харченко Т. И. 152
Хлебановский Н. А. 274
Хлынова Т. А. 244
Холоденко М. Д. 221
Хомякова К. И. 222
Хомяков Ю. В. 293
Цибулина А. О. 164
Цымбалов А. В. 91
Чепурной Н. А. 298
Черепанов А. В. 245
Черненко А. С. 68
Четвериков А. О. 246
Чжоу Цзяинь 116
Чжу Чжен 223
Чистяков Д. Э. 299
Чучук Т. А. 300
Чэнь Юйцзин 118
Чэн Юйчжу 117
Шаленов А. С. 162
Шаманов Е. Д. 14
Шевченко О. Н. 50
Шеремет Е. С. 175
Шершнев Д. В. 224
Шестакова К. А. 260
Шехтман Л. И. 282
Шиленко А. В. 173
Шлапакова Л. Е. 225
Шупик П. А. 15
Шэнь Сычжоу 174
Щербина Д. С. 72
Эминов Э. А. 287
Эптешев Е. С. 301
Юровских Е. А. 153
Яо Сунъинь 247
Ярыгова В. М. 302

СОДЕРЖАНИЕ

АЭРОФИЗИКА

Гареев Т. И. Нанесение наноструктурированного покрытия с использованием МГД-ускорителя 7
Демиденко Н. В. Расчеты двухпараметрических профилей скорости пограничного слоя для трехмерных течений 8
Ерохин А. Д. Численное моделирование расслоения аорты 9
Локтюшин О. Ю. Программная реализация алгоритма расчета параметров дрейфа самолетных следов с применением данных радиозондового зондирования и реанализа ERA5 10
Михайлова У. В. Явление гистерезиса при взаимодействии косых гидравлических прыжков на мелкой воде 11
Николаев М. С. Прямое численное моделирование нестационарных вихрей Гёртлера в сжимаемом пограничном слое на вогнутой пластине 12
Прокопьев К. Э. Исследование проницаемости и сорбционной емкости полых микросферических частиц из силикатных материалов по отношению к водороду 13
Шаманов Е. Д. Численное исследование влияния радиуса кривизны вогнутой пластины на устойчивость сжимаемого ламинарного пограничного слоя 14
Шупик П. А. Определение механических характеристик гетерогенного материала при трехточечном изгибе 15

ФОТОНИКА И КВАНТОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Chen Junxi. Solving the Travelling Salesman Problem using a Quantum Computer 19
Navjeet Kour, Svirsky D., Lomov E. Reducing laser phase noise for enhanced fidelity in Rydberg gates 20
Антипов Т. В., Гартман А. Д. Оптическая связь межслоевых экситонов в тонких пленках с резонансными кремниевыми наноструктурами 21
Апрелов Н. А. Создание импульсного волоконного лазера для спектроскопии поглощения аммиака методом дисперсионного преобразования Фурье 22
Баздырев Н. А. Формирование и исследование бесселевых пучков в среднем ИК-диапазоне 23
Бочкарев Н. В. Исследование пространственно-временной динамики при распространении импульсного лазерного излучения в семисердцевинном волокне в линейном режиме 24
Бычкова С. А. Оптические свойства полуорганического кристалла GUHP, перспективного для генерации терагерцового излучения 25
Вишняков Г. Е. Двухволновой импульсный лазер с квазисинхронной накачкой 26

Волоси В. М. Экспериментальное и численное исследование параметров диссипативных ВКР-солитонов, генерируемых во внешнем волоконном резонаторе с накачкой от эрбиевого лазера с синхронизацией мод 27
Грибанов Д. С. Импульсная терагерцовая спектроскопия диэлектрических материалов и слоя фотовозбужденных носителей зарядов....28
Долгирев В. О., Растрыгин Д. С. Преобразование амплитудных характеристик световых пучков электрически управляемыми трехслойными неоднородными голографическими дифракционными структурами с ФПМ-ЖК 29
Князев М. Д. Математическое описание процесса квантовых измерений в компьютерном симуляторе *Quantum Flytrap* 30
Козенко К. В. Модуляция отстройки частоты лазера с помощью акустооптического модулятора в двухпроходной схеме....31
Козлова К. С. Исследование резонансов Ханле в атомах рубидия для применений в магнитометрии....32
Колесникова В. А., Дашиева Н. С. Анализ эффективности выращивания тепличного базилика с помощью компьютерного зрения....33
Крысенко Д. С. Лазерное охлаждение ионов иттербия-171 в полихроматическом поле без применения магнитного поля 34
Купцова А. О. Исследование процесса усиления в мощном криогенно-охлаждаемом лазерном усилителе....36
Луценко Д. Б. Развитие методов компенсации спектрально-углового чирпа импульсов параметрически усиленной холостой волны....37
Макарова Н. А. Разработка методов внесения значительных вариаций радиуса цилиндрического микрорезонатора 39
Мункуева Ж. Э. Фемтосекундная лазерная запись отражательных структур с различной поперечной геометрией в многомодовых оптических волокнах 40
Мурашко С. Н. Лазерно-индуцированная флуоресценция оксида фосфора 41
Новиков А. Д. Изменение формы цилиндрического микрорезонатора из-за диссипации энергии излучения МШГ 42
Ноговицына С. Р. Моделирование массива линз для голографии 43
Растрыгин Д. С., Долгирев В. О. Мультиплексированные чирпированные голографические ФПМ дифракционные структуры....45
Ревякин А. А. Особенности синтеза цифровых голограмм для контроля параметров ввода излучения в многосердцевинные оптические волокна 46
Ризк Х. А. Волоконный интерферометр Маха — Цендера на основе вставки из утоненного волокна для измерения показателя преломления....47
Сере С. Э. Создание стабилизированного источника излучения для квантового гравиметра....48
Дун Сювэнь. Измерение времен спиновой релаксации и фазовой когерентности в ансамблях отрицательно заряженных азотно-вакансионных центров в искусственных алмазах....49

Шевченко О. Н., Николаев Н. А., Микерин С. Л., Кох К. А. Детектирование терагерцовых волн в кристаллах $GaSe_{(1-x)}Sx$ на телекоммуникационной длине волны 50

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Абед Н. Исследование возможности моделирования теплового воздействия плазмы на дивертор токамака с помощью частотно-импульсного электронного пучка....53
Адамов К. Н. Моделирование теплового режима высокочастотного драйвера и цезиевой распределительной галереи мощного поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов водорода 54
Асеев А. С. Восстановление коэффициента диффузии и скорости пинчевания частиц при ЭЦР-нагреве на Т-10 из решения обратных задач 55
Бочкарев В. В. Спектроскопия плазмы на установке ГОЛ-NB 56
Журенков Я. А. К неустойчивости стационарных решений системы уравнений Власова — Максвелла в трехмерной постановке 57
Иванов Р. С. Магнитные измерения на установке КОТ 58
Кардаш Д. Ю. Устойчивость поверхностных дрейфовых волн в диамагнитной ловушке 59
Клименко Д. А., Пустовитов В. Д. Влияние резистивной стенки токамака на магнитные измерения 60
Коновалова В. Д. Получение холодных нейтронов на ускорительном источнике нейтронов 62
Кормушаков Т. Ю. Мгновенная гамма-спектрометрия для БНЗТ....63
Кузнецова А. А. Плазмохимический синтез оксидных композиций для уран-ториевого дисперсионного ядерного топлива 64
Кузьмина П. О. Измерение характеристик пучка атомов водорода низкой энергии и высокой мощности....65
Куршаков В. А. Роль электронов в создании диамагнитного тока в плазме с высоким β 66
Лотов И. К. Ускорение электронов в плазменной волне с драйвером ЦИЭС....67
Науменко П. Р., Черненко А. С. Проект антенны для ИЦР-нагрева плазмы на Т-15МД 68
Орлов Ю. В. Терагерцовый интерферометр Майкельсона для диагностики плазмы на установке ГОЛ-NB 69
Охотников Н. В. Оптимизация градиента плотности плазмы во второй секции эксперимента AWAKE 70
Полозова П. А. Управление потенциалом плазмы в осесимметричной многопробочной ловушке ГОЛ-NB 71
Щербина Д. С. Моделирование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций для толерантного REMIX-топлива 72

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Snegirev A. V. Temperature corrections to resistance of HgTe semimetal quantum well....75
Абдюшев Н. Ю. Кинетика сверхструктурных переходов на поверхности Si(111) при адсорбции Sn....76
Акимова Е. Б., Казанцева Е. А. Влияние длительности процесса микродугового оксидирования на формирование фазовой структуры кальций-фосфатных покрытий....77
Балахнин А. В. *Ab initio* моделирование оптических свойств гетероструктуры графен/MoS_2....78
Ван Юйхань. Эффективность сбора заряда рентгеновскими сенсорами, изготовленными из теллурида кадмия....79
Гапич Д. И., Буинов А. С. Тензорезистивный эффект и электронный транспорт в полимерных композитах на основе хитозана и малослойного графена....80
Гензе И. Ю. Влияние отжига при различных условиях на параметры Ti/InAlAs и Pt/InAlAs барьеров Шоттки....81
Гогина О. А. Влияние ионного облучения на люминесцентные свойства гексагонального нитрида бора....82
Дерибина Е. И. Увеличение плотности массива квантовых точек GaAs/AlGaAs и их оптические свойства....83
Доброгост П. В., Зур И. А. Программный комплекс CATABASIS для моделирования физических свойств наноразмерных углеродных пленок методом молекулярной динамики....84
Дураков Д. Е. Реакция сверхизоляторного состояния в пленках NbTiN на прямоугольные импульсы напряжения....85
Жилицкий В. Е. Формирование заряженных вакансий в анионной подрешетке AlAs....86
Захожев К. Е. Ван-дер-ваальсовый гетероэпитаксиальный рост $SnSe_2$ на поверхности Si(111)....87
Инь Липин. Мемристоры на основе двуслойных структур из пленок нестехиометрических германосиликатных стекол....88
Калачев И. В. Спектроскопия комбинационного рассеяния света и фотолюминесценция нанопроволок GaAs....89
Калинин В. А. Плазмон-усиленное КРС графеном....90
Киселева О. С., Кушнарев Б. О., Олейник В. Л., Петрова Ю. С., Цымбалов А. В. Солнечно-слепые гетероструктуры Ga_2O_3/GaAs: Cr, чувствительные к УФ-излучению....91
Ковзик В. М. Первопринципное моделирование электронной структуры вакансий кислорода в легированном оксиде гафния....92
Колосовский Д. А., Пономарев С. А., Дмитриев Д. В. Формирование InAs при отжиге подложки InP(001) в потоке мышьяка....93
Комлина С. В. Исследование структуры и дефектов графена при переносе на поверхности различного рельефа....94

Кузнецова Л. С. Исследование шероховатости пленок теллурида кадмия методами эллипсометрии и профилометрии 95
Кукенов О. И., Соколов А. С. Начальная стадия формирования квантовых точек Ge на подложке Si(100) при молекулярно-лучевой эпитаксии 96
Куликова А. В. Электронное спиновое эхо фотовозбужденных композитов органических полупроводников 97
Кырова Е. Д. Эпитаксиальный рост топологического изолятора $Bi_ySb_{2-y}Te_{3-x}Se_x$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии 98
Лаврехин Д. В. Разработка рентгендифракционного эталона для малых углов 99
Майдэбура Я. Е. Рост квантовых точек GaN при изменении стехиометрических условий на поверхности слоя GaN 100
Максимов М. А., Назаров Р. С. Отражение от экситонов в широкой квантовой яме гетероструктур InGaAs/GaAs 101
Махмудиан М. М. Спиновая структура и магнитные свойства двумерного вигнеровского кластера в модели Изинга и Гейзенберга 102
Микаева А. С. Особенности электронной структуры поверхности (111) PbSnTe вблизи точки инверсии зон 103
Муратов В. И. Синтез двумерных слоев кремния, интеркалированных кальцием, на подложках CaF_2/Si(111) 104
Некля Ю. А. Анализ энергетических характеристик процесса безвакуумного электродугового синтеза борида молибдена 105
Никулина Я. А. Гетероструктуры с квантовыми ямами на подложках GaAs ориентации (110) 106
Рибенек В. А. Исследования явления резистивного переключения и памяти в светодиодах на основе InGaN/GaN после импульсного воздействия 107
Савина К. Г., Вересов С. А., Веселов А. Д., Серов С. В. О кристаллизации в четырехкомпонентной наносистеме Au-Cu-Pd-Pt 108
Сарыпов Д. И. Баллистический магнетотранспорт в многоканальных квантовых точечных контактах траншейного типа 109
Соколов А. С., Кукенов О. И. Зависимость сверхструктурных переходов от температуры подложки при эпитаксиальном росте Ge на Si(111) 110
Соловова Н. Ю. Электронная структура тонких пленок Bi на поверхности InAs(111)A(2 × 2) 111
Сорокин Д. В. Датчик на основе графена для измерения динамики движения воды 112
У Цзяи. Моделирование начальной стадии гетероэпитаксии германия на структурированных подложках кремния 113
Фролов Д. И. Магнитные свойства и электронный транспорт в слоистых кобальтатах $YBaCo_{3,5}Al_{0,5}O_{7+x}$ 114
Хамуд Г. Исследование пленок нитрида алюминия на различных подложках 115
Чжоу Цзяинь. Морфология и спектры отражения слоев из частиц теллура 116
Чэн Юйчжу. Кристаллизация германия и многослойных структур Ge/Si с применением ультракоротких импульсов инфракрасных лазеров 117

Чэнь Юйцзин. Эволюция потенциального рельефа поверхности в процессе гетероэпитаксии германия на структурированных подложках кремния 118

ТЕПЛОФИЗИКА

Апостол Ю. С. Численное моделирование волн на обдуваемой газом горизонтальной пленке жидкости.....121
Артишевский К. В. Молекулярное моделирование смачиваемости поверхностей.....122
Афанаскин Д. С., Кундашкин А. Д. Моделирование активного управления потоком для подавления прецессирующего вихревого ядра в модельной камере сгорания.....123
Бетке И. А. Изменение гидрофильности и гидрофобности материалов при нанесении графена.....125
Борискин А. А. Пересжатая детонация как инициатор цилиндрически расходящихся волн.....126
Бурдилов А. А. Оптимизация тепловых потоков оптических фильтров и 1-го кристалла монохроматора в станции 1-5 ЦКП «СКИФ» 127
Васильев М. М. Исследование динамики взаимодействия падающей капли с текстурированной лазером поверхностью 128
Вострецов С. О. Исследование массообмена при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа 129
Данилов П. А. Экспериментальное исследование распыла двухкомпонентной жидкости в форсунке центробежного типа.....131
Деринг Е. Д. Исследование процесса взаимодействия атомов аргона с фоновыми частицами в сверхзвуковом кластированном потоке 132
Жерибор М. О. Исследование форсунки дизельного риформера численным методом 133
Зорькина А. И. Исследование динамики роста одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации 134
Иваненко Д. С. Численное моделирование лазерной аморфизации поверхности металлического сплава.....135
Кундашкин А. Д., Афанаскин Д. С. Численное моделирование активного управления потоком в модельной камере сгорания.....136
Лавронов К. Д. Изменение формы конусного пламени под действием поперечного электрического поля 138
Лукьянов А. А. Исследование процесса реламинаризации исходно развитого турбулентного течения с использованием пассивного метода управления потоком 139
Лукьянов Ан. А. Численное исследование тепло-гидравлических характеристик неподвижного снаряда Тейлора 140
Лунев Н. А. Кинетика кристаллизации пленок нестехиометрического оксида кремния, индуцированной золотом 141

Лутченко И. И., Палкин Е. В. Управление течением в модельной гидротурбине Френсиса с помощью радиально-щелевой инжекции 142
Мезенцев С. И. Исследование теплообмена в потоке в регенеративном теплообменнике 143
Мельник А. В. Использование гидрофобных мембран для сепарации воды и различных нефтепродуктов 144
Непомнящих В. А. Определение стехиометрического коэффициента тонких пленок α-SiO_x 145
Осипов А. А. Исследование устойчивости наножидкостей на основе углеродных наночастиц и наночастиц SiO_2 методом спектрального анализа 146
Петрова А. В. Осаждение гидрофобных фторполимерных покрытий на обработанную плазмой поверхность нержавеющей стали 147
Самохвалов Ф. А., Васильев М. М., Смирнов Н. И., Титовец Я. Д. Лазерная золото-индуцированная кристаллизация тонких пленок нестехиометрического оксида и аморфного кремния 148
Смирнов Н. И. Динамика испарения капель при испарении с бифильной поверхности в постоянном электрическом поле 149
Старосельцева А. А. Влияние ударных волн на фронт горения растительных горючих материалов 150
Тарулин М. А., Гурьянов Р. А., Муравьев И. М. Сжигание пропан-бутановой смеси в распылительном горелочном устройстве 151
Харченко Т. И., Смирнов Н. И. Синтез тонких пленок оксида германия методом наносекундной импульсной лазерной абляции германия в фоновом кислороде 152
Юровских Е. А., Михайлов А. В. Влияние набегающего потока нагретой жидкости на поле температуры в тонкой стенке 153

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Биомедицинская физика

Акинина М. Д., Зайцев В. А. Морфофункциональные особенности вестибулярного лабиринта крысы 157
Байнаев-Мангилев Н. П. Изучение влияния экзогенного оксида азота на нейрональную активность с помощью фотоактивных доноров NO 159
Богомолова А. И. Влияние ультрафиолетового излучения на формирование наночастиц на основе альбумина 160
Буянов Д. А. Измерение абсолютного значения интенсивности падающего света разработанного спектрометра ближней инфракрасной спектроскопии 161

Зайцев В. А., Шаленов А. С. Влияние астигматизма на результаты тестирования вестибуло-окулярного рефлекса....162
Канарская М. А. Контроль геометрии и молекулярности РНК-комплексов с использованием коротких олигонуклеотидов....163
Косенко А. В., Цибулина А. О. Сравнительный анализ алгоритмов нечеткого вывода в оценке гемостатического потенциала....164
Кузьмина К. С. Изучение биораспределения бора после внутриопухолевого введения борсодержащих наночастиц методом АЭС ИСП....165
Лирмак А. Ю., Зайцев В. А. Моделирование течения биологической жидкости в полукружных каналах внутреннего уха человека....166
Ненашева Д. А. Кинетическая модель взаимодействия хиломикронов с липопротеинлипазой....167
Пушкин И. А. Исследование ХПЯ в зависимости от концентрации изомеров диад напроксен-триптофан....168
Стародубцева Э. С. Исследование активации тромбоцитов под действием локализованного стимула....169
Суюндукова А. Т. Оценка гемодинамической значимости тандемных стенозов в бифуркациях коронарных сосудов методом локальной гемодинамики....170
Фоменко М. В. Исследование применимости окулярных тканей приматов для изучения офтальмологических заболеваний человека....172
Шиленко А. В. Анализ клинического применения методов гипофракционирования и этапной радиохирургии для лечения метастазов в головном мозге....173
Шэнь Сычжоу. Разработка аналитической модели формы нативного эритроцита....174

Физические методы исследования функциональных материалов и наносистем

Аверкиев А. А., Родригес Р. Д., Шеремет Е. С. Основные механизмы плазмонных фотореакций....175
Айдаков Е. Е. Особенности фотоэлектронных спектров кобальта и оксидов кобальта....176
Акимова М. П., Иванов И. Е., Сивцева А. В. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия наноалмазов, модифицированных путем термического окисления на воздухе....177
Алябьев А. А. Изучение взрывной эмиссии углеродных материалов....179
Анофриев В. А., Низенко А. В. Модернизация программного комплекса для определения фрактальной размерности....180
Батракова А. А., Александрийский В. В., Бурмистров В. А., Матрохина А. Н., Новиков И. В. Исследование нематической фазы жидких кристаллов, индуцированных бис(камфоролиден)октаметилендиамином....181

Батькова Я. О., Морозова П. А. Влияние природы прекурсора на термическую и электрохимическую стабильность аналогов берлинской лазури для калий-ионных аккумуляторов 182
Бобков М. Е. Моделирование размещения катионов в структуре LiNaLSX 183
Богословцева А. Л. Исследование влияния локальной реакционной камеры в магнетронной распылительной системе на качество и характеристики пленок нитрида алюминия 184
Бойко К. Р. Лазерная сварка разнородных алюминиево-литиевых сплавов системы Al-Mg-Li/Al-Cu-Li 185
Булатов А. А. Уточнение структуры серии вольфраматов $La_{14-x}Nd_xW_4O_{33}$ 186
Говоров Н. М. Особенности фотолитографического изготовления рентгеновских преломляющих полимерных линз из эпоксидных фоторезистов с гексофторантимонатом триарилсульфония 187
Данилов Я. А. Изучение фазовых переходов в гетеро-структурированных системах на основе мезопористых металл-органических координационных полимеров (МОКП) и органической соли $[(C_4H_9)_4N]BF_4$ методом дифференциальной сканирующей калориметрии 189
Демина С. В. Термическое поведение и люминесцентные свойства новых красноизлучающих люминофоров на основе твердых растворов $BaBi_2B_2O_7$: Eu^{3+}, Sm^{3+} 190
Дик Д. В., Гудыма Т. С., Крутский Ю. Л., Филиппов А. А. Керамика B_4C-CrB_2, синтезированная с использованием нановолокнистого углерода 191
Жебсаин Т. В. Исследование физических свойств измельченной коры даурской лиственницы, модифицированной гидротермическим методом в интересах получения перспективных теплоизолирующих и сорбирующих материалов 192
Золотарев Н. А. Исследование изменения структуры аморфного углерода при его термической обработке 193
Литвинцева К. А. Исследование окисления метанола на катализаторе V_2O_5/CeO_2 методами *operando* ИК-Фурье спектроскопии и *pseudo in situ* РФЭС 194
Лукин С. Э. Исследование механических характеристик фотолюминесцентных композиционных материалов на основе эпоксидных смол и люминофора 195
Лунин А. О., Зоткин М. А. Исследование диэлектрических свойств полинорборненов с объемными карбоциклическими группами методом диэлектрической спектроскопии 196
Майдэбура Я. Е. Формирование квантовых точек GaN на поверхности Ван-дер-Ваальсовой структуры g-SiN/Si (111) 197
Макаренко А. Е., Кульбакин И. С. Сравнение структуры и свойств сверхпластичных сплавов 40ХНЮ и 67КНБ 198
Макаров К. А., Ахмадиева А. А. Исследование влияния наноразмерных частиц нитрида алюминия на структуру и механические свойства магниевого сплава МЛ12 199

Марчий Г. В. Электрохимический механизм влияния ультратонкого слоя никеля на коррозионную стойкость серебряных оптических покрытий 200
Мирошкина В. Д., Селиховкин М. А. Исследование влияния покрытия TiN на механическое поведение сплава Mg-Ca-Zn 201
Морозова П. А., Федотов С. С. Изучение механизма зарядовой компенсации в Берлинских лазурях — катодных материалах для калий-ионных аккумуляторов 202
Мубараков Р. Г., Синкина И. Л., Кахидзе Н. И. Исследование механических свойств сплава системы Al-Mg-Sc с добавлением частиц TiC 203
Нуриахметов З. Н. Исследование коэффициентов прохождения и отражения пластин композитов на основе ОУНТ в СВЧ-диапазоне 204
Павлов А. А. Определение коэффициентов отражения и пропускания методом матриц переноса 205
Павлов Г. Р. Исследование электронных и оптических свойств нанолент MoS_2 206
Першин Д. Д. Оптимизация решений прямой задачи рентгенографии в криволинейных координатах 207
Петров И. Ю. Характеризация водных дисперсий ОУНТ методами дифференциального осаждения в дисковой центрифуге и динамического рассеяния света 208
Платонов В. В. Разработка цифрового голографического микроскопа для исследования тонкопленочных материалов 210
Семенов Т. И. Параметрическая модель прогнозирования ресурса работы двухслойного металлокерамического термозащитного покрытия 211
Семушев С. Н. Структурные особенности нанесенных на оксид алюминия платино-родиевых катализаторов парциального окисления углеводородов 212
Серебренникова П. С. Разработка подходов к определению элементов тензора тепловой деформации монокристаллов средних сингоний 213
Синкина И. Л., Валихов В. Д. Исследование композиционного материала, полученного методами порошковой металлургии из смеси АСД-0 — базальтовые волокна 215
Смирнова К. А. Магнитоактивные цепочечно-полимерные комплексы Cu(II) с нитроксильными радикалами 216
Султановская А. С. Метод резонансной рентгеновской дифракции для установления заселенностей позиций атомов с близким количеством электронов в соединениях с большим числом кристаллографических позиций на примере легированных гексаферритов М-типа 217
Суханов М. А. Удаление оксида с поверхности InSb в потоке сурьмы 218
Харченко Н. А. Структурная диагностика рутений-содержащих катализаторов $Ru/Ce_{1-x}Zr_xO_2$ для процесса метанирования оксидов углерода 219
Холоденко М. Д., Пашнина Е. А. Формирование доменной структуры при облучении ионным пучком монодоменных областей в кристаллах ниобат бария-стронция 221

Хомякова К. И., Хазем Д. Влияние концентрации легирования зарядового слоя на параметры лавинного фотодиода на основе Ge/Si.....222
Чжу Чжен. Антиотражающие свойства покрытий из частиц германия, выращенных на поверхности кварца.....223
Шершнев Д. В. Моделирование ближнепольного радиационного теплопереноса методом дискретных диполей.....224
Шлапакова Л. Е., Сурменева М. А. Исследование свойств магнитоактивных композитных кондуитов на основе полиоксибутирата и наночастиц магнетита для инженерии нервной ткани.....225

Химическая и биологическая физика

Бородулина А. В. Использование тритильного радикала для исследования спинового кроссовера в комплексе железа.....226
Ведькал А. В. Изучение водных растворов ТГФ методом молекулярной динамики.....227
Дементьев С. А. Исследование комплексов фталоцианинов с человеческим сывороточным альбумином с помощью ЭПР-спектроскопии.....228
Добрынина Е. А. Изучение температурной зависимости упругих свойств гидратированных планарных слоев фосфолипидов методом рассеяния Мандельштама — Бриллюэна.....229
Колоколов М. И. Применение импульсов заданной формы в ЭПР для спиновых пар разного типа.....230
Лактионова А. В. Исследование упругих свойств гидрогелей на основе желатина методом спектроскопии рассеяния Мандельштама — Бриллюэна.....231
Литвинов И. А. Изучение роли ионизируемых групп в каталитическом механизме гликозилазы Fpg.....232
Насонов Д. М. Влияние окислительного повреждения oxoG:A на стабильность ДНК-дуплекса.....233
Омельченко А. Н. Характеризация метаболизма клеток дрожжей методом комбинационного рассеяния света дейтерированных меток.....234
Осик Н. А. Эффект удерживания летучих соединений в метаболомных экстрактах.....235
Пластинина Д. М. Детектирование гидроксильного радикала методом FRS при помощи полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью.....236
Подаров Р. А. Исследование новых спиновых ловушек синглетного кислорода с улучшенными функциональными свойствами методами ЭПР-спектроскопии.....237
Роговешко В. М. Изучение процессов распада синглетного экситона в димерах тетрацена.....238
Сагитов А. Р. Исследования огнестойкости эпоксидной смолы с добавками антипиренов DOPO и графена.....240

Самсоненко А. А. Исследование термически индуцированной релаксации в дирадикалах методом ЭПР-спектроскопии 241
Симонян Г. К. Жидкая фаза воды в невесомости и возможные биологические индикаторы некоторых ее физических свойств 242
Хлынова Т. А. Исследование комплексов катионных порфиринов с аптамером AS1411 методами ЭПР и оптической спектроскопии....244
Черепанов А. В. Экспериментальное и теоретическое изучение химии образования катионов в пламени диметилового эфира....245
Четвериков А. О. Кинетика парной рекомбинации носителей заряда на квази-одномерном молекулярном проводнике в электрическом поле....246
Яо Сунъинь. Исследование генерации синглетного кислорода под действием света....247

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Бурдин В. Е. Изучение характеристик детектора для экспериментов с быстропротекающими процессами на пучке СИ....251
Губа В. О. Вычисление взаимной информации для оптического канала связи с малой дисперсией в рамках модели нелинейного уравнения Шредингера....252
Зубков Д. А. Измерение сечения процесса $e^+e^- \to \mu^+\mu^-$ на энергии 7 ГэВ с детектором КЕДР....253
Иванов Д. Р. Измерение массы нейтрального каона....254
Кузнецов Т. А. Реконструкция нейтрального пиона в жидкоксеноновом калориметре детектора КМД-3....255
Обершт С. Д. Изучение распада $\mathbf{B}^0 \to D^+\eta\,\pi^-$ на детекторе Belle....256
Образцов И. В. Проявление электрического дипольного момента в распадах тау-лептонов, рожденных в электрон-позитронной аннигиляции....257
Першин И. Д. Измерение сечения процесса $e^+e^- \to K^+K^-\pi^0\pi^0$ с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000 в интервале энергий центра масс от 1,5 до 2 ГэВ....258
Скоробогатов А. Д. Измерение сечения рассеяния $e^+e^- \to \eta\gamma$....259
Шестакова К. А. Исследование зависимости эффективности светового сбора на спектросмещающее волокно от поперечного размера сцинтиллятора....260

ФИЗИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

Агейков А. В. Измерение скорости частиц WC-12%Co в расширяющемся канале продуктами газовой детонации....263
Асылкаев А. М. Восстановление распределения массы за фронтом сильной ударной волны в пенопласте....264
Багрецова А. Н. Изучение композитных материалов на основе эпоксидной смолы и наночастиц....266

Ищенко С. С. Молекулярно-динамическое исследование зависимости температуры плавления от характерных размеров наноструктуры 267
Караван А. В. Выделение волокна в структуре композита по данным рентгеновской микротомографии.....268
Кузьминых А. А., Ершов А. П., Кашкаров А. О., Рубцов И. А., Сатонкина Н. П. Исследование свойств заряда тротила с углеродными нанотрубками 269
Маракtаев Б. И. Изменение радиуса тороидального пузыря при всплывании в воде.....270
Параскун А. Г. Спиральный генератор высоковольтных импульсов с профилированными в виде меандра шинами 271
Туманик А. С. Численное моделирование детонационных процессов с учетом уравнений газовой динамики и термодинамики реагирующих смесей.....272
Тупицина Д. Н., Ветрова А. В., Ковалева М. А. Оценка реологического поведения проволок из никелида титана 273
Хлебановский Н. А. Детонационный синтез наночастиц и их изучение в продуктах детонации.....274

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Автоматизация эксперимента, моделирование и обработка данных

Григорьев Д. П. Исследование влияния геомагнитно-индуцированных токов в электрических сетях.....277
Звягин М. А. Восстановление полиномов из экспонент по интервальным данным.....278
Зуев В. О. Автоматизированная калибровка системы измерения трехмерной геометрии объекта методами структурированного освещения на основе плоской калибровочной мишени.....279
Комарова А. Е. Разработка программного обеспечения для газовых систем детекторов частиц 280
Кононов А. А. Синхронизация массива контроллеров источников питания по протоколу PTP 281
Корниевский М. А., Шехтман Л. И. Быстрый монитор положения и интенсивности пучка СИ для станции «Быстропротекающие процессы» ЦКП СКИФ.....282
Мосейков И. Г. Разработка архитектуры системы мониторинга состояния детектора СНД 283
Попова А. А. Поиск черенковских срабатываний в детекторе черенковских колец ФАРИЧ с использованием нейросети.....284

Тимртдинов А. Ю. Автоматизированная система выставления вертикали в абсолютных баллистических лазерных гравиметрах 285
Тюстин Р. Е., Пашковская О. А. Разработка методики автоматической сегментации легких экспериментальных животных....286
Эминов Э. А. Автоматизированная система управления ВЧ-системой ВЭПП-2000 287

Радиофизика и ускорители

Абед Н. Исследование возможности моделирования теплового воздействия плазмы на дивертор токамака с помощью частотно-импульсного электронного пучка 288
Быков С. А. Изготовление и исследование магнитных элементов для каналов транспортировки ионов для FAIR....289
Комаров В. И. Разработка специализированного преобразователя заряд-напряжения для бортового спутникового детектора дозы ионизирующего излучения....290
Кутергин Д. Д. Моделирование кильватерного ускорения электронов в плазменном канале с лазерным импульсом в качестве драйвера 291
Лаппо М. А. Результаты моделирования переходного излучения в пакете CST Studio Suite: подготовка к эксперименту....292
Мурзина А. В., Хомяков Ю. В. Варианты вставных устройств источников синхротронного излучения 4-го поколения для реализации методов наноскопии в мягком рентгеновском диапазоне 293
Параскун А. Г. Разработка импульсного ксенонового осветителя сверхвысокого давления и измерение его яркостных и временных параметров 294
Рева С. В. Изучение метода определения магнитной оси мультипольных элементов ускорителей с помощью оптической визуализации магнитных полей....295
Седов А. А. Разработка сверхпроводящего вигглера для станции 1-3 ЦКП СКИФ....296
Тюкавкин А. В. Разработка согласующего устройства с автоподстройкой для ВЧ плазменного эмиттера 297
Чепурной Н. А. Определение нелинейных характеристик пучка с помощью пооборотных измерений....298
Чистяков Д. Э. Запрещенные полосы бетатронных частот в коллайдере с круглыми пучками ВЭПП-2000 299
Чучук Т. А. Модуль блокировок и мониторинга системы импульсного питания....300
Эптешев Е. С. Изучение возможностей плавной перестройки режимов генерации излучения Новосибирского ЛСЭ....301
Ярыгова В. М. Изменение ускоряющего кильватерного поля после разлета протонного драйвера в вакууме 302
Указатель авторов....303

Научное издание

МНСК-2023

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
61-й Международной научной студенческой конференции

17–26 апреля 2023 г.

Корректор *Д. И. Ковалёва*
Верстка *А. С. Терешкиной*
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 11.09.2023 г.
Формат 60 × 84/8. Уч.-изд. л. 40. Усл. печ. л. 37,2.
Тираж 40 экз. Заказ № 64.
Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

Секция
ФИЗИКА

ISBN 978-5-4437-1442-4

Новосибирский государственный университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА