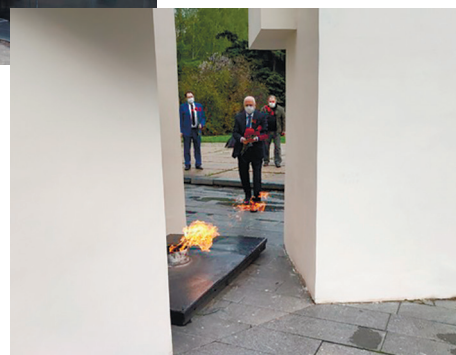




75 лет Великой Победы



В этом году мы отмечаем 75-летие Победы над фашистской Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. 7 мая небольшое количество сотрудников и представителей студенчества физического факультета возложили цветы и венки к Мемориальной стеле студентам и сотрудникам, павшим в боях за Родину, к монументу Вечного огня и обелиску на территории Московского университета. Декан факультета профессор Н.Н. Сысоев выразил искреннюю благодарность ветеранам и труженикам тыла и пожелал им здоровья, долголетия, мира и благополучия.



Невозможно переоценить вклад сотрудников и учащихся Московского университета в Победу над немецко-фашистскими захватчиками. С начала войны сотрудники физического факультета полностью перестроили свои научные планы, подчинив их нуждам фронта. В кратчайшие сроки был выполнен ряд работ, имевших большое оборонное значение. Перечислим лишь наиболее важные из них.

Сотрудники кафедры оптики (В.Ф. Смирнов, А.И. Акимов и др.) под руководством доцента Ф.А. Королева разработали спектральную аппаратуру для экспрессного спектрального анализа металлов и сплавов, использованную при выпуске самолётов, танков и автомашин. В.Ф. Смирнов за эти работы был удостоен Сталинской премии (1946). В 1942–1944 г. Ф.А. Королев принял активное участие в исследованиях кумулятивного (направленного) взрыва. Результаты работы были использованы на фронте для борьбы с танками и самоходными орудиями.

СОДЕРЖАНИЕ

1	НОВОСТИ НАУКИ
26	ПРЕМИИ / НАГРАДЫ
27	КОНКУРСЫ / НАГРАДЫ
30	УЧЕНЫЕ ФИЗФАКА МГУ

На кафедре магнетизма под руководством профессора Н.С. Акулова были созданы дефектоскопы (М.В. Дехтяр, Д.И. Волков), позволявшие обнаружить скрытые внутренние дефекты в деталях машин, и приборы для контроля качества термообработки продукции машиностроительных заводов. В 1943–1944 гг. М.В. Дехтяр сконструировал и внедрил в производство термоэлектрический прибор для сортировки стали, предназначенной для изготовления корпусов бронебойных снарядов. Профессор Е.И. Кондорский и доцент М.А. Грабовский участвовали в разработке средств защиты военно-морских кораблей от магнитного минно-торпедного оружия противника. Серия электромагнитных приборов для авиационной промышленности и производства бронебойных снарядов была разработана Е.И. Кондорским, Р.В. Телесниным, Н.Л. Брюхатовым и их сотрудниками.

На кафедре тепловых и молекулярных явлений под руководством профессора А.С. Предводителя были проведены исследования процессов горения. Полученные результаты использовались в авиационной промышленности, при борьбе с танками и самоходными орудиями. Доцент М.Д. Карасев участвовал в конструировании прибора слепой посадки самолета и прибора, позволявшего предупреждать пилота об опасном режиме работы двигателя. Профессор В.В. Мигулин разрабатывал системы фазовой радионавигации и участвовал в создании радиолокатора для авиации (Сталинская премия, 1946). Профессор Б.В. Ильин проводил работы по химической защите, в частности, по совершенствованию дымозащитных фильтров в противогазах. Под его руководством И.А. Яковлев и В.Ф. Киселев разработали портативный прибор для противогазов.

В годы войны ряд ученых физического факультета были эвакуированы в Казань. Здесь они вели научно-исследовательские работы, имевшие большое оборонное значение. Член-корреспондент АН СССР Г.С. Ландсберг руководил разработкой новых методов эмиссионного спектрального анализа и использовал их для контроля качества плавок легких и цветных сплавов на оборонных заводах. Были разработаны простые и надежные стилоскопы, позволявшие проводить экспрессные анализы не только в заводских, но и в полевых условиях. Г.С. Ландсберг и П.А. Бажулин разработали методы молекулярного спектрального анализа, с помощью которых устанавливался состав трофейных бензинов.

Под руководством профессора В.Л. Левшина были синтезированы кристаллофосфоры, дающие яркую вспышку под действием инфракрасной радиации. Полученные экраны монтировались в типовые полевые и морские бинокли. Эти приборы ночного видения были приняты на вооружение Красной Армией и широко использовались при выводе караванов судов из северных портов. За цикл работ по вспышечным кристаллофосфорам В.Л. Левшин и руководимый им коллектив были отмечены премией АН СССР им. Л.И. Мандельштама (1947), а затем Сталинской премией (1952).

В годы войны под руководством С.И. Вавилова были завершены предвоенные работы по Созданию высоко-

экономичных источников света — люминесцентных ламп, которые были внедрены на Московском электроламповом заводе. За эту работу С.И. Вавилов, В.Л. Левшин, В.А. Фабрикант и их сотрудники были удостоены Сталинской премии (1951).

В Казани С.П. Стрелков создал прибор, с помощью которого можно было изучать процесс обтекания крыла самолета воздушным потоком. Одновременно изучалась возможность проводить испытания самолетов и их отдельных конструкций в аэродинамической трубе малых размеров.

В связи с необходимостью борьбы с акустическими минами под руководством профессора С.Н. Ржевкина были проведены исследования шумов речных судов. Были также изучены шумы самолетов и разработаны методы их глушения. Д.И. Блохинцев и Ю.М. Сухаревский разработали методы обнаружения самолетов по создаваемому ими шуму.

Член-корреспондент АН СССР Д.В. Скобельцын возглавил работы по созданию аппаратуры для акустического обнаружения самолетов. При этом была использована методика, разработанная им ранее для исследования космических лучей. Созданная аппаратура прошла успешные испытания. Кроме того, в лаборатории Скобельцына был создан прибор для контроля клапанов авиационных моторов с помощью рентгеновских лучей (О.Н. Вавилов, В.И. Векслер, Н.А. Добротин), а также прибор для определения толщины стволов стрелкового оружия при помощи гамма-лучей (Н.А. Добротин, И.М. Франк).

Член-корреспондент АН СССР В.В. Шулейкин разработал теорию расчета морских переправ. Составленные им таблицы с успехом использовались при прокладке «Дороги жизни» по льду Ладожского озера. Шулейкин занимался также вопросами штурманского и гидрографического вооружения. Им был сконструирован баронивелир — прибор для определения высоты навигационных знаков и огней на берегах.

Воин-альпинист, будущий профессор А.М. Гусев, участвовавший в водружении знамени Родины над Эльбрусом, в 1944 г. был отозван с фронта в Океанографический институт. Здесь под его руководством была решена одна из сложнейших задач гидроаэромеханики судна, касающаяся его дрейфа, рыскания и управляемости при наличии ветра. Был разработан и построен прибор для нахождения суммарной поправки на действие ветра при определении места корабля в море.

За все время войны с физического факультета ушло свыше 550 человек в Красную Армию, народное ополчение, в коммунистические и истребительные батальоны. Фронтовики воевали в стрелковых войсках, артиллерии, были танкистами, связистами, минометчиками, огнеметчиками, военными переводчиками и медсестрами, служили в авиации и на Военно-морском флоте.

Ветераны сражались на всех 39 фронтах, развернутых во все время ВОВ. Из всех крупных битв едва ли найдется одна, в которой бы не участвовал хотя бы один из ветеранов нашего факультета. Около 400 физфаков-

цев стали фронтовиками; 150 вернулись в университет для продолжения учебы или работы. 128 человек отдали свои жизни, защищая Родину; почти все они погибли в боях на территории Советского Союза, лишь трое — в Польше и Восточной Пруссии. За все военные и послево-

енные годы на физический факультет пришли около 200 участников Великой Отечественной войны — бывших фронтовиков, студентов и аспирантов, — в большинстве своем они стали профессорами и доцентами, докторами и кандидатами наук, преподавателями и учеными.

МГУ стал лучшим российским вузом в предметном рейтинге ARWU по физике



29 июня были опубликованы результаты рейтинга Shanghai Ranking's Global Ranking of Academic Subjects 2020. Московский государственный университет стал лучшим вузом из РФ в предметном рейтинге по физике, войдя в группу 51-75.

С 2009 года компания ShanghaiRanking Consultancy публикует версию Академического рейтинга университетов мира (ARWU) по предметным областям. ВУЗы ранжируются по 54 предметным областям, разделенным на категории: естественные науки, инженерно-технические дисциплины, науки о живой природе, науки об обществе и медицина. В 2020 году в рейтинге участвовало более четырех тысяч университетов мира.

ShanghaiRanking's Global Ranking of Academic Subjects 2020 - Physics

2020

Field: Natural Sciences		Subject: Physics		Methodology		
World Rank	Institution*	Country/Region	National/Regional Rank	Total Score	Score on Q1	
1	Massachusetts Institute of Technology (MIT)		1	390.1	90.1	
2	Stanford University		2	350.6	82.5	
3	The University of Tokyo		1	343.1	94.8	
4	University of California, Berkeley		3	342.6	90.3	
51-75	Moscow State University		1		65.1	
51-75	Northwestern University		22-26		55.8	
51-75	Radboud University Nijmegen		1		48.8	
51-75	The Chinese University of Hong Kong		1		40.3	
51-75	The University of Glasgow		7-8		48.0	
51-75	The University of Texas at Austin		22-26		65.6	
51-75	University of Birmingham		7-8		48.3	

Физический факультет МГУ укрепляет свои позиции в международных рейтингах



4 марта опубликован предметный рейтинг QS World University Rankings by Subject. По направлению «Физика и астрономия» самую высокую позицию в России занял МГУ имени М. В. Ломоносова — он на 33 позиции в списке.

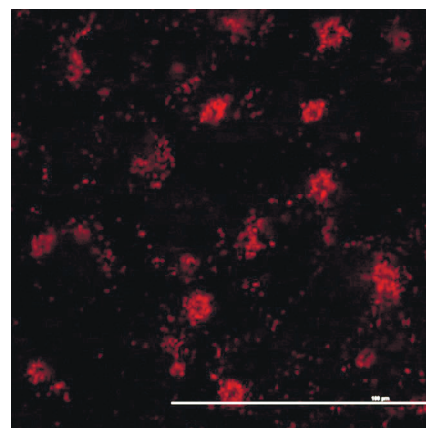
При составлении рейтинга аналитики оценивали академическую репутацию университета, востребованность выпускников, цитирование научных статей и индекс Хирша сотрудников.

По показателю «Востребованность выпускников среди работодателей» физический факультет занял 6 место в мире, уступив университетам Оксфорда, Стэнфорда, Кембриджа, Гарварда и Массачусетскому технологическому институту.

Physics & Astronomy		Refine: By location	
# RANK	UNIVERSITY	OVERALL SCORE	EMPLOYER REPUTATION
2020	Uni Search		
1	Massachusetts Institute of Technology (MIT)	98.9	100
2	Harvard University	97.4	99.9
3	University of Cambridge	96.2	97.9
4	Stanford University	97.5	97.4
5	University of Oxford	95.5	96.9
6	Lomonosov Moscow State University	83.1	92.9
7	California Institute of Technology (Caltech)	93.7	92.8

По уровню излучения клеток в красном спектре можно определить состояние здоровья организма

При изучении источников излучения в тканях человеческого организма ученые МГУ определили, что продукты окисления клеток могут излучать свет в красном спектре в ответ на облучение. Зная все источники излучения и характеристики сигнала, можно более точно определять границы опухолей и степень старения клеток. Исследование поддержано Президентской программой исследовательских проектов Российского научного фонда.



Красная автофлуоресценция клеток, вызванная окислительным стрессом. Изображение получено с помощью конфокальной микроскопии

Для анализа биологических тканей часто используется метод флуоресцентной диагностики. Его суть заключается в том, что на ткань подают свет с определенной длиной волны, а он приводит находящиеся в молекулах-флуорофорах электроны в возбужденное состояние. Однако это состояние неустойчиво, и электроны быстро возвращаются на свой исходный энергетический уровень, а энергия, полученная при этом переходе, превращается в свет (флуоресценцию). В красном спектре собственная флуоресценция тканей и клеток минимальна, но именно она может быть маркером опухолей и старения клеток. Зная, с какой силой и сколько по времени они излучают свет, можно, например, определить границы опухоли. В то же время природа красной флуоресценции остается неизвестной.

Существует гипотеза, что источником флуоресценции могут быть продукты окисления белков, липидов, ДНК и аминокислот. Они образуются под действием свободных радикалов кислорода, которые притягивают к себе электроны молекул в клетках, в результате чего изменяется их структура и состав. Так, в процессе окисления в клетках накапливается, например, липофусцин — так называемый «пигмент старения»: чем больше его в клетке, тем сильнее излучение. Разница в уровне окислительных процессов позволяет определять границы раковой опухоли. Также излучение способно повлиять на результаты анализа старения клеток.

Чтобы доказать, что продукты окисления могут испускать свет в красном спектре после облучения, ученые сначала подвергали водные растворы белков и ДНК фотоокислению, после чего измеряли оптические свойства полученных образцов. Сигнал, исходящий от необлученных образцов, был почти незаметен, в то время как окисленные молекулы флуоресцировали в широком диапазоне длин волн возбуждения, включая красный свет.

На втором этапе исследования были изучены качественные характеристики флуоресценции продуктов окисления в кератиноцитах — клетках человеческой кожи. На них подавали ультрафиолетовое излучение с длиной волны 254 нанометра. Сразу после этого измене-

ний не наблюдалось, однако интенсивность излучения увеличилась спустя 5-15 часов в зависимости от силы возбуждающего света. Кератиноциты были взяты для исследования, так как верхний слой кожного покрова состоит из них на 90%, и под воздействием ультрафиолетового излучения в коже образуется большое количество свободных радикалов, усиливающих процесс окисления. Флуоресценция клеток, в которых происходит окислительный стресс, может перекрывать фоновый сигнал биологических тканей.

«Концентрация аминокислот, липидов, белков и других компонентов в клетках и тканях человеческого организма выше, чем в использованных нами растворах. Поэтому при анализе биологических тканей сигнал, исходящий от продуктов окисления, будет сильнее. Их флуоресценция может обеспечивать определенный вклад в результирующий сигнал, особенно в красной области спектров, где влияние других собственных флуорофоров мало», — отмечает руководитель проекта по гранту РНФ Евгений Ширшин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ.

Сейчас ученые занимаются изучением причин флуоресценции в гетерогенных смесях флуорофоров, являющихся продуктами окисления. Полученные в этом исследовании данные внесли вклад в изучение природы излучения в красном спектре и могут быть использованы для более точной интерпретации результатов медицинских исследований и определения источников излучения в биологических тканях.

Лабораторные исследования были проведены при поддержке Национального медицинского научно-исследовательского центра онкологии имени Н.Н. Блохина и Сколковского института науки и технологий.

"The Oxidation-Induced Autofluorescence Hypothesis: Red Edge Excitation and Implications for Metabolic Imaging". A.N. Semenov, B.P. Yakimov, A.A. Rubekina, D.A. Gorin, V.P. Drachev, M.P. Zarubin, A.N. Velikanov, Juergen Lademann, V.V. Fadeev, A.V. Priezzhev, M.E. Darvin and E.A. Shirshin. *Molecules*. **25**, Issue 8.

Субмикронный управляемый частотный преобразователь

Исследователи из МГУ в составе международной научной группы разработали устройство на основе кластера из четырёх кремниевых наночастиц для эффективного преобразования инфракрасного лазерного излучения в ультрафиолетовое, а также продемонстрировали возможность управления интенсивностью полученного сигнала с помощью специального пространственного структурирования возбуждающего систему света. Рассматриваемые объекты полностью совместимы с элементной базой интегральной фотоники и микроэлектроники и могут быть легко внедрены в современные мобильные платформы.

Широкий интерес к резонансным нанопотонным структурам в научном сообществе обусловлен необходимостью развития интегральных оптических технологий для решения многих актуальных современных задач, с которыми классическая электроника не способна эффективно справиться. В течение последнего десятилетия учёные во всём мире ведут активную разработку новых фотонных устройств для применения в области цифровых технологий, связанных с крупными дата-центрами, для мобильных сенсорных устройств, а также для аналоговых оптических сопроцессоров. Необходимость в обработке больших массивов данных и миниатюризации существующих устройств с каждым годом повышает интерес к полупроводниковым технологиям, работающим со светом вместо электронов. Научные коллективы со всего мира, занимающиеся нанопотоникой, рассматривают всё более сложные геометрии наносистем, различные материалы и особенности возбуждающего излучения. В МГУ разработками в данной области занимается лаборатория нанооптики и метаматериалов под руководством профессора физического факультета Андрея Федянина, в которой и было выполнено данное исследование.

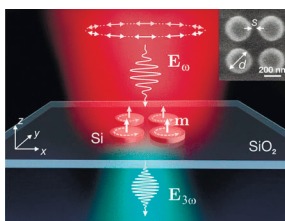


Рис. 1. Схематическое представление возбуждения олигомера кремниевых нанодисков излучением с азимутальной поляризацией для увеличения интенсивности третьей оптической гармоники. На вставке показано изображение образца, полученное на сканирующем электронном микроскопе, квадрокамера *a-Si*; расстояния между нанодисками $s=82\pm 4$ нм, диаметры $d=281\pm 4$ нм.

«В работе продемонстрирована возможность использования одиночных кремниевых нанопотонных структур специально подобранной формы для многократного увеличения генерации света с утроенной частотой, — рассказала первый автор статьи, аспирант кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ, сотрудник лаборатории нанооптики и метаматериалов Мария Кройчук. — В данных объектах при определённом выборе поляризации возбуждающего излучения возможно появление коллективных оптических эффектов, характеризующихся значительным увеличением концентрации электромагнитного поля в объёме структуры. Это, в

свою очередь, приводит к более эффективным нелинейно-оптическим преобразованиям. Возникновение коллективных оптических эффектов за счёт взаимодействия близко расположенных нанообъектов, приводящих к повышению эффективности оптических преобразований, ранее уже исследовалось в работах нашей лаборатории. Однако сейчас впервые удалось эффективно возбуждать моды одиночных структур с размерами порядка 500 нм при нормальном падении излучения со специально подобранной формой лазерного пучка, управляя полученным нелинейным сигналом путём настройки пространственной структуры оптического излучения. Так, при освещении нанокластеров сфокусированными фемтосекундными импульсами с азимутальной поляризацией было получено усиление мощности третьей оптической гармоники более чем на три порядка, что значительно превосходит эквивалентные показатели существующих наноразмерных аналогов. Важно отметить, что была также экспериментально достигнута модуляция сигнала на два порядка при изменении поляризации накачки на линейную».

Сначала учёные разработали геометрию и изготовили устройство в виде массивов отдельно стоящих кластеров из четырёх близко расположенных полупроводниковых наночастиц. Затем структуру исследовали нелинейно-оптическими методами на основе перестраиваемого фемтосекундного лазерного комплекса.

«В нашей предыдущей работе мы уже рассматривали поляризационную зависимость нелинейного отклика сильно взаимодействующих наночастиц, однако мы не стремились увеличивать его интенсивность, используя особенности коллективного отклика нанокластеров, а именно резонансного возбуждения коллективных магнитных мод, — прокомментировал один из авторов статьи, научный сотрудник лаборатории нанооптики и метаматериалов Александр Шорохов. — Важнейшим преимуществом данной работы является использование лазерных пучков более сложной пространственной конфигурации, создающих необходимую нам структуру поля в кластере нанопотонных и, как следствие, более эффективно их возбуждающих».

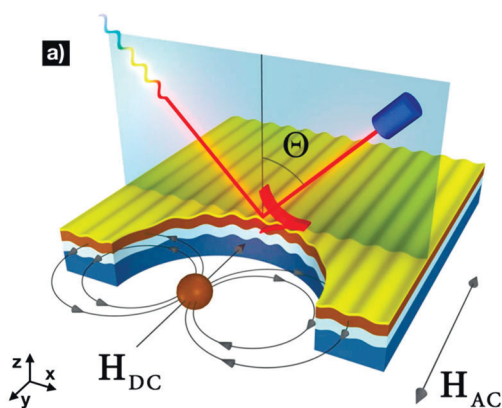
Руководитель научной группы профессор Андрей Федянин уверен, что данное открытие поможет в дальнейшей разработке компактных нанопотонных устройств для эффективного управления светом на интегральной оптической платформе.

ской платформе: «Мы надеемся, что наше исследование приблизит интеграцию компактных, КМОП-совместимых, перестраиваемых источников ультрафиолетового излучения на основе полупроводниковых преобразователей частоты в существующие технологии. Это может быть актуально в том числе для мобильных сенсорных устройств, таких как компактные лаборатории на чипе для устройств носимой электроники».

"Enhanced Nonlinear Light Generation in Oligomers of Silicon Nanoparticles under Vector Beam Illumination". M.K. Kroychuk, A.S. Shorokhov, D.F. Yagudin, D.A. Shilkin, D.A. Smirnova, I. Volkovskaya, M.R. Shcherbakov, G. Shvets, A.A. Fedyanin. *Nano Lett.* 2020, **20**, 5, 3471–3477.

Разработан новый метод детектирования слабых магнитных полей

Физики Московского университета в сотрудничестве с учеными из БФУ им. И. Канта и Toyohashi University of Technology (Япония) разработали новый метод детектирования слабых магнитных полей с использованием элементов нанофотоники.



Сенсоры магнитных полей применяются в совершенно разных областях, таких как хранение информации, геологоразведка, медицина и т.д. Часть областей применения, например, магнитокардиография, требует возможности детектирования очень слабых магнитных полей. На сегодняшний день самыми чувствительными сенсорами магнитного поля являются сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИД), однако они требуют охлаждения до температур порядка 4 К и имеют значительные габариты, что осложняет локализацию области измерения.

Магнитооптические методы измерения магнитных полей применяются достаточно давно, но в основном для измерения сильных и сверхсильных магнитных полей ввиду слабости всех магнитооптических эффектов. Однако, оптические методики измерения имеют значительное преимущество, они дают возможность значительной локализации измерений с области поверхности порядка 100 на 100 микронетров.

Последние 10 лет в нанофотонике активно развивается направление исследования так называемых магнито-плазмонных кристаллов — субволновых наноструктур, обладающих одновременно плазмонной запрещенной зоной и магнитооптическими свойствами. Эксперимен-

ты, проведенные с магнитоплазмонными кристаллами, показали возможность усиления магнитооптических эффектов более чем в 10 раз для определенных длин волн оптического излучения, что позволяет использовать эти эффекты для практических применений.

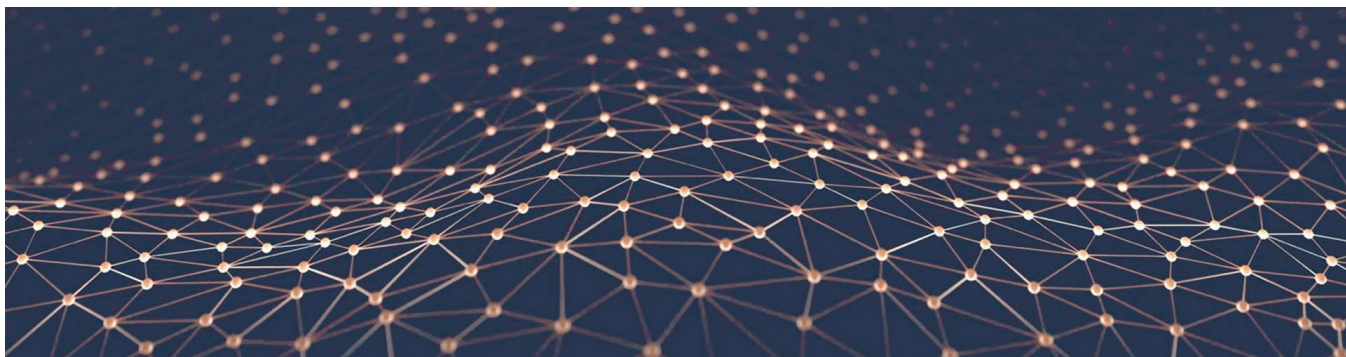
«Идея применить магнитоплазмонные кристаллы с усиленным магнитооптическим эффектом для детектирования магнитных полей родилась еще несколько лет назад. Основной проблемой, которую для этого пришлось решить, это необходимость измерения постоянного магнитного поля, при том что магнитооптический эффект Керра как правило измеряется в переменном магнитном поле. Пока данная методика является proof of principle, а не готовым устройством, она показывает возможность применения магнитооптических методов для детектирования слабых магнитных полей», — рассказал один из авторов статьи, научный сотрудник физического факультета МГУ Андрей Грунин.

В опубликованной работе экспериментально показана возможность достижения чувствительности сенсора порядка 10^{-6} эрстед. Таким образом, предложенная методика занимает промежуточное положение между сенсорами на эффекте Холла и СКВИД по чувствительности и локальности измерения магнитного поля.

«Подходы нанофотоники и магнитофотоники открывают новые возможности для создания сенсорных систем, так как законы распространения света на субволновом масштабе оказываются очень чувствительными к характеристикам среды и внешних полей», — рассказал руководитель лаборатории нанооптики и метаматериалов, профессор физического факультета МГУ Андрей Федянин.

"Magnetic field sensor based on magnetoplasmonic crystal". V.K. Belyaev, V.V. Rodionova, A.A. Grunin, Mitsuteru Inoue & A.A. Fedyanin. *Scientific Reports (Nature Publishing Group)*. (2020) 10:7133 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63535-1>

Кафедра квантовой статистики и теории поля. Статьи в ТОП-25 за первое полугодие 2020 года



"Explicit form for the kernel operator matrix elements in eigenfunction basis of harmonic oscillator". Perepelkin E.E., Sadovnikov B.I., Inozemtseva N.G., Burlakov E.V., *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, **2020**, № 023109, 1–17.

"Wigner function of a quantum system with polynomial potential". Perepelkin E.E., Sadovnikov B.I., Inozemtseva N.G., Burlakov E.V., *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, **2020**, № 053105, 1–18.

В работах получены явные выражения для матричных элементов так называемого оператора-ядра в базисе собственных функций гармонического осциллятора. Матричные элементы выражаются через новые полиномы двух комплексных переменных, которые были рассмотрены в данной работе. В частном случае, полученные полиномы вырождаются в полиномы Лагерра. Диагональные матричные элементы оператора-ядра являются функциями Вигнера гармонического осциллятора, которые не вносят диссипацию в квантовую систему. Недиagonalные элементы содержат частотные колебания, ответственные за диссипацию в квантовых системах. Используя явное представление матричных элементов оператора-ядра, получены явные представления функции Вигнера для произвольной квантовой системы в фазовом пространстве.

Уравнение Моэля для функции Вигнера было получено в предположении, что потенциал является аналитической функцией. Полиномиальная форма потенциала является естественным приближением аналитического потенциала с любой необходимой точностью. Простейшей квантовой системой с полиномиальным потенциалом второго порядка является квантовый гармонический осциллятор. В данной работе для квантовой системы с полиномиальным потенциалом произвольного порядка получены явные выражения для матричных элементов оператора-ядра в базисе собственных функций гармонического осциллятора. Используя явное представление матричных элементов оператора-ядра, строится распределения функции Вигнера в фазовом пространстве для

квантовых систем с полиномиальными потенциалами. Показана связь модифицированного уравнения Власова с уравнением Моэля для функции Вигнера. Приведены примеры эффективных численных алгоритмов для нахождения функций Вигнера с высокой точностью.

Perepelkin E.E., Sadovnikov B.I., Inozemtseva N.G., *Understanding the Schrödinger Equation: Some [Non]Linear Perspectives*, издательство Nova Science Publishers, Inc. (United States), ISBN 978-1-5361-7662-9, 330 pages.

Монография содержит различные подходы к уравнению Шредингера (УШ) как фундаментальному уравнению квантовой механики. В главе 1 предлагается новая педагогическая парадигма, которая позволяет понять квантовую механику как расширение теории вероятностей; её целью является предоставление альтернативных методов для понимания уравнения Шредингера. Глава 2 посвящена выводу УШ из классического гамильтониана по некоторой процедуре вторичного квантования. В главах 3–5 авторы рассматривают нелинейную УШ со многими приложениями: от нелинейных волн в глубокой воде до образования космогонического тела, поверхностных гравитационных волн, сверхпроводимости и нелинейной оптики. Цель главы 6 - установить связь уравнений Шредингера, Маделунга и Гросса-Питаевского. Глава 7 «Парадигма бесконечномерного фазового пространства» описывает глубокую связь между УШ и бесконечной цепочкой уравнений для функций распределения кинематических величин высших порядков (цепочка уравнений Власова). Авторы формулируют принципы, позволяющие объединить и трактовать в единой форме физику классических, статистических и квантово-механических явлений. И, наконец, в главе 8 показано, что УШ можно математически вывести из уравнения Гамильтона, если использовать метаплектическое представление канонических преобразований. Все это делает монографию интересной для широкого круга физиков.

Получение циркония-89 с помощью ускорителей электронов

В настоящее время в Российской Федерации сформирована целая сеть центров ядерной медицины, в том числе и ПЭТ-центров. Однако отмечаются затруднения в доступности радиофармацевтических препаратов. Поэтому исследования новых путей получения перспективных медицинских изотопов является важной и актуальной задачей. Иммуно-ПЭТ — отдельное направление позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), новейшего диагностического метода, позволяющее получать изображения на молекулярном уровне. Поскольку в Иммуно-ПЭТ радиоизотоп присоединяется к моноклональным антителам (монАТ), необходимо, чтобы биологическое время полужизни монАТ совпадало с периодом полураспада изотопа. Антитела обладают временем полужизни в диапазоне от суток до недель. Получение изображений, как правило, обеспечивает максимальные соотношения сигнала к фону через 2–6 суток после введения метки на основе антител пациенту, что требует использования радиоактивных изотопов с более длительным периодом полураспада по сравнению с традиционным методом ПЭТ.

Цирконий-89 обладает идеальными характеристиками для этого метода: он распадается с периодом распада 78,41 ч посредством позитронной эмиссии и захвата электронов в промежуточное состояние ^{89m}Y , которое распадается до стабильного ^{89}Y посредством гамма-излучения (909 кэВ) с периодом полураспада 15,7 с. Низкая средняя энергия испускаемых позитронов (395,5 кэВ) приводит к высокому разрешению изображения, а несоответствие энергий между аннигиляционными гамма-квантами с энергией 511 кэВ и гамма-квантами с энергией 909 кэВ не позволяет последним мешать обнаружению совпадающих гамма-квантов. Кроме того, Zr безопаснее в обращении, дешевле в производстве, более стабилен *in vivo* и значительно эффективнее накапливается в опухолях, чем используемый сейчас ^{124}I .

Традиционно ^{89}Zr получают на циклотронах из иттрия в реакциях $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ и $^{89}\text{Y}(d,2n)^{89}\text{Zr}$. В обоих случаях технология осложняется образованием в реакциях (p,2n) и (d,3n) изотопной примеси изотопа ^{88}Zr (период полураспада 83,4 суток), который распадается на дочерний радиоактивный изотоп ^{88}Y (период полураспада 106 суток).

Наработка радионуклидов на ускорителях электронов намного экономичнее и технологически проще по сравнению с ускорителями нуклонов. Так как для медицинских источников требуется высокая удельная активность и радиохимическая чистота от примесных радионуклидов, то использование фотоядерных реакций с вылетом заряженных частиц позволяет работать с большими массами мишеней (порядка десятков г) и легко отделять нарабатываемый радионуклид от облучаемой матрицы радиохимическими методами, получая медицинский изотоп с высокой степенью чистоты.

Нами было проведено облучение мишеней естественного молибдена и молибдена, обогащенного по изотопу молибден-94, тормозными гамма-квантами с максимальной энергией 55 и 20 МэВ. Результаты и анализ обработки спектров облученных мишеней позво-

ляют заключить о том, что при облучении мишени из природного молибдена тормозными гамма-квантами с максимальной энергией 55 МэВ ^{89}Zr был получен, в основном, из ^{92}Mo в реакциях $^{92}\text{Mo}((\gamma,3n)+(\gamma,p2n))^{89}\text{Nb}-^{89}\text{Zr}$ и из ^{94}Mo в реакции $^{94}\text{Mo}(\gamma,\alpha n)^{89}\text{Zr}$. Были получены экспериментальные выходы изученных реакций. Также была проведена оценка количества примесного ^{88}Zr в облученных мишенях. После перерасчетов с учетом периодов полураспада этих изотопов было получено, что вклад ^{88}Zr в активность мишени облученного природного молибдена составляет менее 10^{-4} от активности ^{89}Zr .

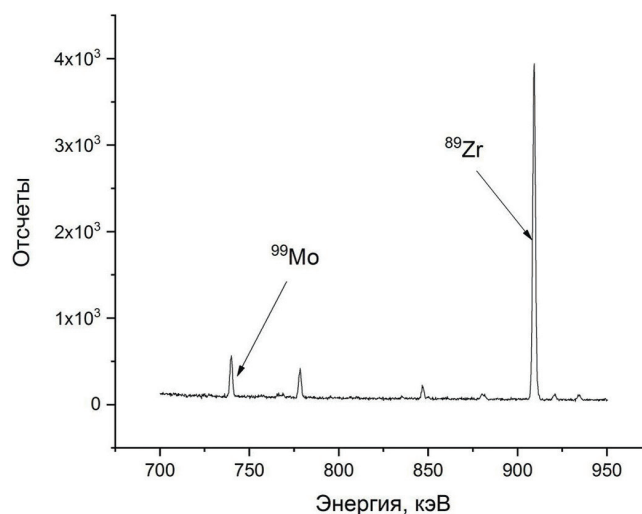


Рис. 1. Фрагмент спектра мишени, обогащенной по молибдену-94, после облучения тормозными гамма-квантами с максимальной энергией 20 МэВ (измерения проводились на полупроводниковом HPGe-спектрометре).

Ожидаемой сложностью наших исследований были низкие сечения (γ, rxn) -реакций, рассчитанные в рамках статистической модели (≤ 1 мбн). Мы предполагали, что это может быть обусловлено влиянием кулоновского барьера, что приводит к смещению максимума функ-

ции возбуждения в область энергий больше 20 МэВ. В результате оказалось, что экспериментальный выход ^{89}Zr на порядок больший, чем ожидалось из расчетных данных, полученных в рамках статистической модели. Наши исследования показали, что для граничных энергий тормозного излучения меньше 20 МэВ фотоядерные реакции с вылетом заряженных частиц проходят через механизм прямых реакций, что приводит к уменьшению порога реакции на 10–20 МэВ, так как в прямых реакциях влиянием кулоновского барьера можно пренебречь. Это хорошо видно на примере реакции $^{94}\text{Mo}(\gamma, \alpha n)^{89}\text{Zr}$. При расчетах процессов с использованием модели составного ядра, ожидаемый порог реакции составлял 24 МэВ, из них 13 МэВ — кулоновский барьер. Однако, в эксперименте с пучком тормозных гамма-квантов с максимальной энергией 20 МэВ мы наблюдаем возбуждение циркония-89, что хорошо видно на рис. 1.

Таким образом при облучении мишени молибдена-94 весом около 10 г и током 0,1 мА в течение одного периода полураспада Zr-89 пучком тормозных гамма-квантов с максимальной энергией 20 МэВ нарабатывается активность $^{89}\text{Zr} \sim 10^{11}$ Бк (активность используемых в ПЭТ-диагностике источников $\sim 10^9$ Бк).

В целом проведенные исследования показали, что изучение фотоядерных реакций с вылетом альфа-частиц при облучении мишени молибдена тормозными гамма-квантами с энергией 20 МэВ представляют значительный практический интерес. Так как в отличие от циклотронов, ускорители электронов являются значительно более распространенными установками, в том числе и в медицинских учреждениях. Однако там они используются только для проведения лучевой терапии. Предлагаемый способ получения Zr-89 может позволить организовать ПЭТ-диагностику на базе существующих онкоцентров с ускорителями с максимальной энергией пучка 20 МэВ.

"Production of zirconium-89 by photonuclear reactions." M.V. Zheltonozhskaya, V.A. Zheltonozhsky, E.N. Lykova et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2020. 470. 38–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2020.03.002>

Исследование влияния номера генерации, длины спейсеров и температуры на структуру и внутримолекулярную динамику расплавов силоксановых дендримеров путем моделирования методом молекулярной динамики

Сотрудники лаборатории физики новых интеллектуальных материалов кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ совместно с сотрудниками Института прикладной математики им. М.В. Келдыша и Института химической физики им. Семенова изучили свойства расплавов двух гомологических рядов силоксановых дендримеров в широком диапазоне генераций и температур

Строение макромолекул играет важную роль в их конформационном поведении и межмолекулярных взаимодействиях, определяющих физические свойства растворов и расплавов полимеров. В частности, разветвленные полимеры ведут себя иначе, чем их линейные аналоги того же химического состава и молекулярной массы. Определение взаимосвязи между молекулярной структурой и свойствами является непростой задачей и становится все более трудным с увеличением архитектурной сложности. В этом отношении регулярность

строения упрощает описание системы. Большое внимание уделяется регулярным сверхразветвленным макромолекулам с древообразным строением, называемым дендримерами (рис. 1(а)). Синтез дендримеров, их конформационное поведение в разбавленных растворах в зависимости от основных структурных характеристик были подробно исследованы теоретически и с помощью компьютерного моделирования. Однако влияние специфической древовидной структуры на межмолекулярные взаимодействия в концентрированных растворах и рас-

плавах до сих пор полностью не понято. Наиболее изученными являются полиамидаминовые дендримеры, имеющие в своем составе полярные группы, которые в значительной степени определяют их поведение. Чтобы отделить чистый эффект от регулярно разветвленной морфологии дендримера, нужно сосредоточиться на молекулах без каких-либо специфических взаимодействий.

Примером таких систем являются полибутилкарбосилановые дендримеры, взаимодействующие посредством обычных ван-дер-ваальсовых сил. Ранее наблюдалось, что расплавы дендримеров более низких генераций (степени ветвления, фактически, молекулярной массы) являются жидкостями, в то время как дендримеры более высоких генераций ведут себя как твердые тела. Этот переход из жидкости в твердое вещество оказался типичен для всех гомологичных рядов. Другим примером идеальных модельных систем, которые являются перспективными для определения влияния структуры дендримеров на их поведение в расплавах, являются силоксановые дендримеры. У них также нет каких-либо групп со специфическим взаимодействием, однако они характеризуются иными механизмами сегментарной подвижности, отличными от таковых в карбосиланах, поэтому их изучение дает возможность различать явления, характерные для дендримерных систем в силу их древовидной структуры и некоторых особенностей, определяемых химическим составом этих молекул.

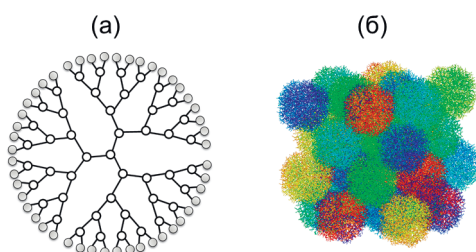


Рис. 1. (а) Схематическое изображение молекулы дендримера. (б) Мгновенный снимок модельного расплава дендримеров.

В данной работе было выполнено полноатомное молекулярно-динамическое моделирование расплавов (рис. 1(б)) двух типов полисилоксановых дендримеров, различающихся длиной спейсеров, в широком интервале температур и генераций. Был проведен сравнительный анализ основных равновесных характеристик этих расплавов. Было показано, что плотность расплава возрастает с увеличением генерации и уменьшается с ростом температуры. Коэффициент теплового расширения расплавов низких генераций увеличивается с ростом температуры, что в конечном итоге указывает на своего рода «испарение» расплавов. Напротив, термическое расширение расплавов замедляется с температурой в случае дендримеров высоких генераций из-за их более плотной молекулярной структуры и большей молекулярной массы.

Кроме того, путем сравнения молекулярной структуры и внутримолекулярной динамики дендримеров в расплаве и в изолированном состоянии было изучено влияние взаимодействия и взаимопроникновения молекул на их конформацию. Оказалось, что межмолекулярные взаимодействия в расплавах практически не изменяют внутреннюю структуру молекул дендримеров. В частности, четко выраженная слоистая структура внутренней части дендримеров была полностью сохранена в расплавах. Форма дендримеров, становящаяся ближе к сферической с увеличением генерации, также практически не зависела от присутствия соседних молекул.

Особое внимание было уделено изучению явления взаимопроникновения. Анализ профилей радиальной плотности показал, что они практически не подвержены влиянию присутствия соседних молекул и довольно хорошо совпадают с таковыми для изолированных дендримеров в вакууме, несмотря на то, что дендримеры могут достаточно эффективно проникать друг в друга. Судя по всему, соседние молекулы в расплавах могут расположить свои ветви таким образом, чтобы не нарушать распределение плотности внутри дендримера.

Было показано, что в то время как дендримеры более низких генераций глубоко проникают друг в друга, дендримеры более высоких генераций вытесняют друг друга, так что с увеличением генерации область взаимопроникновения становится локализованной на периферии дендримера (рис. 2). Сравнение относительных радиальных размеров двух отдельных частей дендримеров в расплавах, одна из которых была доступна для атомов чужеродных молекул, а другая была плотно заполнена собственными атомами дендримера и недоступна для соседей, позволила предположить различные механизмы течения расплава дендримеров для низких и высоких генераций.

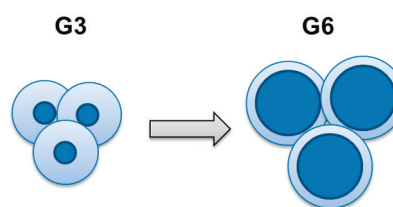


Рис. 2. Схематическое изображение изменения степени взаимопроникновения дендримеров в расплаве с увеличением генерации.

"Effects of generation number, spacer length and temperature on the structure and intramolecular dynamics of siloxane dendrimer melts: molecular dynamics simulations". A.O. Kurbatov, N.K. Balabaev, M.A. Mazo, and E.Y. Kramarenko. *Soft Matter*, 16:3792–3805, (2020).

Оптимальное управление термодинамическими процессами



А.Г. Кушнер, д.ф.-м.н., профессор кафедры физико-математических методов управления физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.



В.В. Лычагин, д.ф.-м.н. главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.



М.Д. Рооп, магистрант 2 курса кафедры физико-математических методов управления физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Проблема оптимального управления термодинамическими процессами представляет интерес еще с XIX века, когда была опубликована классическая работа Карно [Carnot, S., Thurston, H. (ed.) *Reflections on the Motive Power of Fire*. John Wiley & Sons.: New York, 1897], положившая начало изучению оптимальных тепловых машин.

В настоящей работе А.Г. Кушнера, В.В. Лычагина и М.Д. Роопа термодинамика рассматривается как теория измерения случайных векторов, а именно экстенсивных переменных. Это наблюдение приводит к описанию термодинамических состояний как лежандаровых и лагранжевых многообразий.

Подход восходит к классической работе Гиббса [Gibbs, J.W. *A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamic Properties of Substances by Means of Surfaces*. Trans. Conn. Acad. 1873, 1, 382–404]. Объединение первого и второго законов термодинамики привело Гиббса к так называемому «фундаментальному уравнению термодинамики».

С точки зрения современной дифференциальной геометрии, это уравнение представляет собой дифференциальную 1-форму на нечетномерном пространстве, координатами в котором являются экстенсивные и интенсивные переменные, а также энтропия. Эта дифференциальная 1-форма, которая сейчас называется формой Гиббса, не удовлетворяет условию теоремы Фробениуса и поэтому определяет максимально неинтегрируемое, т.е. контактное, распределение, которое называется распределением Гиббса.

Таким образом, контактная геометрия является естественным языком для описания термодинамических процессов и систем. Это, в частности, объясняет популярность применения в термодинамике преобразования

Лежандра, которое является контактным преобразованием, т.е. преобразованием, которое сохраняет распределение Гиббса. Переход от одних термодинамических переменных к другим осуществляется именно при помощи контактных преобразований.

Для лежандровых и лагранжевых многообразий в данной работе введены римановы структуры, и одной из отличительных её особенностей является наблюдение, что эти структуры естественным образом появляются при измерении экстенсивных переменных. А именно, определена квадратичная форма, которая представляет собой дисперсию измерения экстенсивных величин. Такое геометрическое представление термодинамических состояний позволило нам использовать принцип максимума Понтрягина, чтобы найти оптимальный термодинамический процесс, максимизирующий функционал работы. Использование же римановых структур на термодинамических состояниях газов позволило сформулировать задачу оптимального управления.

Еще одним из основных результатов этой статьи является то, что гамильтонова система, соответствующая идеальному газу, оказывается интегрируемой в смысле Лиувилля. С помощью перехода к переменным «действие-угол» её удалось явно проинтегрировать. Кроме того, доказана теорема об управляемости термодинамической системы для идеальных газов. Также рассмотрен случай реальных газов в вириальном приближении.

Основной математический аппарат, используемый в работе - контактная геометрия и теория оптимального управления.

Описанный в работе дифференциально-геометрический подход к термодинамике является новым и позволит применить геометрические методы к описанию и исследованию многих физических процессов. Напри-

мер, для описания фазовых переходов и решения задач управления термодинамическими процессами. В частности, к задачам фильтрации в пористых средах, возникающих при разработке нефтяных месторождений, задачам описания движения сплошных сред и др.

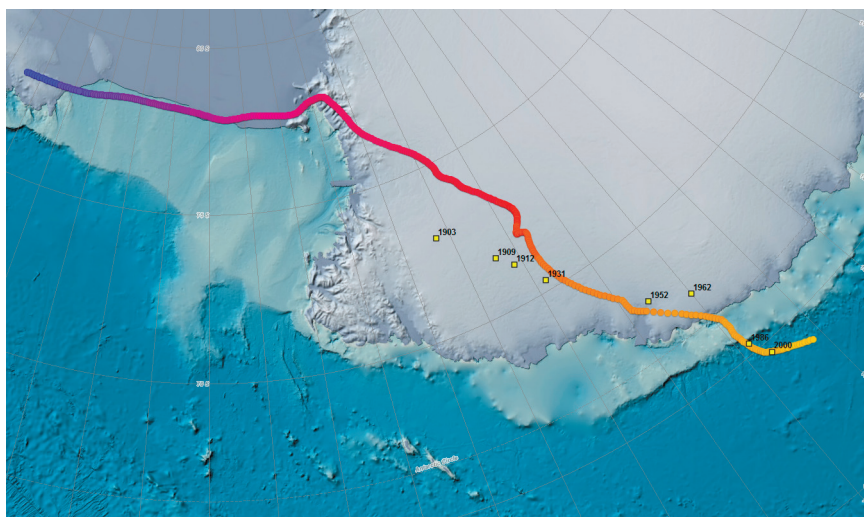
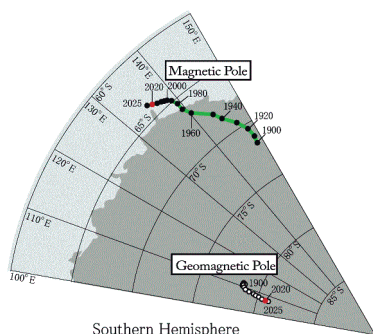
Отметим, что применение контактной геометрии к нелинейным дифференциальным уравнениям описано в монографии соавторов (Кушнер, Лычагин) этой работы [Kushner, A.G.; Lychagin, V.V.; Rubtsov, V.V. *Contact Geometry and Nonlinear Differential Equations*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007.]

Результаты работы были частично использованы в магистерской диссертации М.Д. Роопа «Оптимальное управление термодинамическими процессами в газах» (2020 г., руководитель проф. А.Г. Кушнер)

«Optimal Thermodynamic Processes For Gases». А.Г. Кушнер, В.В. Лычагин и М.Д. Рооп. *Entropy* **2020**, 22, 448. <https://www.mdpi.com/1099-4300/22/4/448> (открытый доступ).

Океанографическое исследовательское судно ВМФ «Адмирал Владимирский» завершило кругосветную экспедицию

Океанографическое исследовательское судно (ОИС) ВМФ «Адмирал Владимирский» 8 июня 2020 года завершило кругосветную экспедицию, посвященную 200-летию открытия русскими морями Антарктиды и 250-летию со дня рождения адмирала Ивана Федоровича Крузенитерна.



Объединённая геофизическая группа в составе МГУ им. М.В. Ломоносова, ФГБУ «ИПГ», ИЗМИРАН, АО «Южморгеология», в которую входил студент-магистрант кафедры физики Земли физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Илья Грушников, выполнила задачу по измерению параметров геомагнитного поля по пути следования. Илья фактически осуществлял научную координацию магнитометрических наблюдений в рейсе.

Как сообщил Илья Грушников, «Магнитная съемка в мировом океане с производилась с помощью забортного морского магнитометра SeaSpry. Когда мы подходили к интересному участку, где нужно провести магнитную

съемку, собиралась команда из капитана, матросов и электриков для вытравливания магнитометра. Капитан давал команду убавить скорость судна до 5–6 узлов, а когда магнитометр вытравлен, судно шло с скоростью 10 узлов, больше нельзя! Иначе есть риск повреждения оборудования. Когда интересный участок заканчивался, мы затаскивали магнитометр обратно на борт».

Определение характеристик магнитного поля Земли в Мировом океане является сложной задачей из-за наведенного магнитного поля корабля, отсутствия в океане магнитовариационных станций, применения буксируемых морских магнитометров.



На последнем этапе геофизической группе удалось провести инструментальное определение координат «Южного» магнитного полюса (ЮМП) вблизи берегов Антарктиды в море Дюрвиля. Работы были проведены в сложных метеоусловиях в начале апреля 2020 г. Несмотря на сильные шторма в Южном океане — ветер более 30 метров в секунду и 7-метровые волны — команда «Адмирала Владимирского» выполнила одну из основных задач экспедиции.



Результаты комплексных исследований магнитного поля Земли будут использованы в дальнейшем в интересах Росгидромета, РАН, Русского географического общества и ВМФ. Инструментальное определение координат «Южного» магнитного полюса является серьезным вкладом российской науки (при безусловной поддержке Военно-морского флота России и Русского географического общества) в мировую копилку достижений.

Подробнее о завершении экспедиции в новостях канала «Санкт-Петербург», в репортаже телеканала «Звезда» и в статье Русского географического общества.

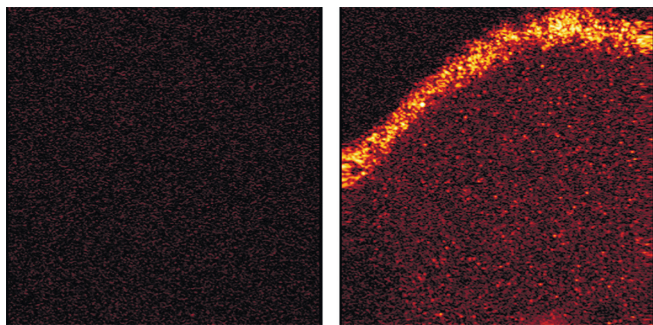
ОИС «Адмирал Владимирский»



Предложена новая технология изготовления кремниевых наночастиц для биомедицинской диагностики

Учеными кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета МГУ совместно с коллегами из Института прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН) разработана новая технология изготовления кремниевых наночастиц и показана перспектива их применения для визуализации структурных неоднородностей методом оптической когерентной томографии при решении задач биомедицинской диагностики.

Интерес к таким исследованиям связан с активным развитием технологий наноструктурирования кремния. Этот материал уже давно используется не только в качестве основы микросхем и солнечных элементов, но и в биомедицинских целях, например, для диагностики тканей и клеток. Правда, в этом случае речь идёт только о нетоксичных и достаточно малых (менее 100 нм) кремниевых частицах. Проблема в том, что традиционные методы формирования наночастиц не обеспечивают соответствия указанным требованиям. Один из наиболее распространённых подходов состоит в механическом измельчении слоёв пористого кремния — материала, представляющего собой кремниевую матрицу наподобие губки с нанометровыми воздушными порами. Однако размол таких структур в большинстве случаев не позволяет получить кремниевые кластеры размером менее 100 нм. Методы коллоидного химического синтеза тоже имеют ограничения из-за большого количества остаточных токсичных примесей в продуктах реакции.



Изображения поверхности агарового геля, полученные методом оптической когерентной томографии: слева прозрачный гель без наночастиц, справа — с внедрёнными кремниевыми наночастицами, полученными методом лазерной абляции пористого кремния в воде. Размер каждого изображения — 3×3 мм.

На этом фоне хорошо зарекомендовала себя импульсная лазерная абляция (удаление вещества с мишени лазерными импульсами) кремния в жидкостях и газах. Варьирование их состава позволяет изготавливать кремниевые наночастицы разного размера, в том числе величиной в единицы и десятки нанометров. При этом удаётся достичь высокой степени химической чистоты

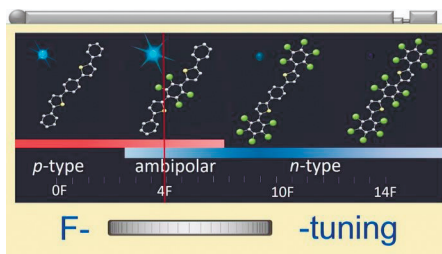
и кристалличности формируемых структур. Существенный недостаток метода — относительно малый массовый выход продуктов абляции, агломерирующих в наночастицы. Нужно либо увеличивать энергию и частоту лазерных импульсов за счёт применения более сложных и дорогих лазеров, либо использовать вместо мишеней монокристаллического кремния иные.

Сотрудники лаборатории фемтосекундной нанофотоники физического факультета МГУ провели исследование, показавшее перспективность применения в качестве мишеней для абляции плёнок пористого кремния, изготавливаемых относительно простым и дешёвым методом электрохимического травления. Использование таких структур позволяет за счёт малой теплопроводности и механической прочности в разы повысить массовый выход кремниевых наночастиц по сравнению с абляцией пластин кристаллического кремния лазерными импульсами с теми же энергетическими характеристиками.

«Изготовленные с помощью этой технологии кремниевые наночастицы мы осадили на поверхность пористого агарового геля, имитирующего биологическую ткань, — рассказал один из авторов статьи, доцент кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета МГУ к.ф.-м.н. Станислав Заботнов. — И в результате показали, что, благодаря присущему им эффективному рассеянию света, можно получать высококонтрастные изображения неоднородностей изначально практически прозрачного агарового геля. А это важный шаг в решении задач биомедицинской диагностики — визуализации биологических и биоподобных тканей».

“Structural and optical properties of nanoparticles formed by laser ablation of porous silicon in liquids: Perspectives in biophotonics”. S.V. Zaboltnov, D.A. Kurakina, F.V. Kashaev, A.V. Skobelkina, A.V. Kolchin, T.P. Kaminskaya, A.V. Khilov, P.D. Agrba, E.A. Sergeeva, P.K. Kashkarov, M.Yu. Kirillin, L.A. Golovan // Quantum Electronics, № 1, 50, 69–75 (2020)

Добавление фтора в состав органических полупроводников делает их эффективными материалами для светотранзисторов



Сотрудники физического факультета выяснили, что фторирование органических полупроводников способствует их амби-полярной проводимости и эффективному светоизлучению. Полученные результаты можно использовать для дизайна новых органических полупроводников для нового поколения ярких гибких экранов и лазеров. Исследование поддержано грантом Российского научного фонда.

Экраны наших мобильных телефонов и телевизоров сделаны из органических светодиодов (OLED). Но борьба за улучшение качества, стоимости, компактности и гибкости техники продолжает идти. Сейчас возлагают надежды на органические светоизлучающие транзисторы — светотранзисторы. Эти устройства соединяют в себе функции управления электрическим током (транзистора) и излучения света с помощью светодиода. Поэтому важно найти оптимальные полупроводниковые материалы, способные выполнять обе задачи. Но у органических полупроводников есть проблема сбалансированного транспорта электронов и дырок, при встрече которых появляется свет — результат излучательной рекомбинации. Затрудняет сбалансированный транспорт сложность одновременной эффективной инжекции в полупроводник как электронов так и дырок. Если уровень энергии высшей занятой молекулярной орбитали (потолка валентной зоны) слишком низкий, а низшей свободной орбитали (дна зоны проводимости) — слишком высокий, то заряды с электродов не могут быть эффективно инжектированы в полупроводник с доступных металлических электродов. Добавление в его состав атомов фтора может менять уровни энергии, поскольку атомы фтора способны оттягивать к себе электроны других атомов.

В своем исследовании сотрудники физического факультета МГУ совместно с химиками-синтетиками из Института синтетических полимерных материалов РАН изучили свойства тиюфен-фениленовых со-олигомеров — цепочек из колец тиюфена и фенилена, в которые добавили фтор. Тиюфен — пятичленный цикл с двойными углеродными связями и серой, а фенилен — бензол, у которого два углерода напротив не имеют водорода и потому могут образовывать химические связи в олигомерной цепи. Именно эти вещества выбрали для проведения исследований, т.к. они обладают высоким уровнем светоизлучения и поддерживают транспорт носителей заряда обоих знаков — электронов и дырок.

Были синтезированы и исследованы четыре олигомера, состоящие из тиюфеновых и фениленовых фрагментов. В результате были получены олигомеры, содержащие один, два или три фрагмента со фтором, и для сравнения исследовали олигомер без добавления фтора.

Для того чтобы оценить влияние фтора на структуру, из синтезированных соединений были выращены кристаллы, и их структура была расшифрована при помощи рентгеновских лучей. Показано, что фторирование молекул сильно меняют их кристаллическую упаковку. Обнаружено, что при частичном фторировании молекулы более благоприятно располагаются относительно друг друга в кристалле, что обеспечивает более эффективный транспорт зарядов.

Чтобы определить, как фторирование влияет на перенос заряда и светоизлучение, была измерена подвижность носителей заряда. Для этого измеряли зависимость тока от напряжения в разных режимах работы транзистора. Оказалось, что фтор увеличивает подвижность электронов. Олигомеры, содержащие один или два фторированных фениленовых фрагмента, показали наиболее сбалансированный транспорт зарядов. Одна из причин этого улучшения в том, что фторирование уменьшило энергию высшей занятой молекулярной орбитали и приблизило ее к работе выхода электрода. В результате инжекция электронов в полупроводник стала более эффективной.

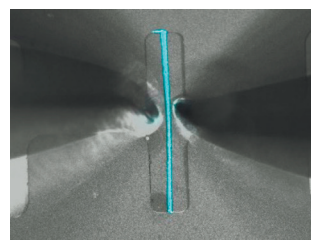


Фото светотранзистора во время работы.

Результаты работы могут быть использованы для получения других олигомеров с необходимыми свойствами. Умение контролировать эффективность излучения света и проводимость веществ упростит процесс создания новых опико-электронных приборов, органических транзисторов и лазеров.

“Fluorinated Thiophene-Phenylene Co-Oligomers for Optoelectronic Devices Sosorev A. Y., Trukhanov V. A., Maslennikov D. R., Borshchev O. V., Polyakov R. A., Skorotetsky M. S., Surin N. M., Kazantsev M. S., Dominskiy D. I., Tafeenko V. A., Ponomarenko S. A., Paraschuk D. Y.”, ACS Appl. Mater. Interfaces, v.12, №8, 9507-9519 (2020)

Новый взгляд на эффект Комптона



Доцент Попов Юрий Владимирович, зав. лабораторией НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



Доктор физико-математических наук, начальник сектора НОВФ Лаборатории информационной технологии ОИЯИ, Институт математики и цифровых технологий Монгольской Академии Наук, Улан-Батор.



Доктор физико-математических наук И.П. Волобуев, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом изучается уже более ста лет. Эти исследования, фактически, заложили основы современной экспериментальной атомной и ядерной физики и были отмечены большим числом Нобелевских премий.

В 1922–1923 гг. американский физик Артур Комптон (Compton) с помощью рентгеновского спектрографа исследовал рассеяние рентгеновского излучения на графите и обнаружил явление изменения длины волны рассеянного излучения, причем величина смещения рассеянного спектра в область больших длин волн возрастала при увеличении угла рассеяния. Тогда же Комптон на основе представления о фотоне как о релятивистской частице дал теоретическое описание этого эффекта, получившего название комптоновского рассеяния, для свободных электронов. Одновременно теоретическое описание эффекта Комптона было независимо найдено Петером Дебаем (Debye). В это время среди физиков шла знаменитая дискуссия о природе света, и открытие эффекта Комптона стало одним из самых убедительных аргументов в пользу корпускулярной теории. За это открытие Комптону была присуждена Нобелевская премия по физике за 1927 год.

Вскоре после создания квантовой механики и описания в ее рамках строения атомов американский физик Джесси Дюмон (DuMond) обнаружил, что структура наблюдаемого спектра излучения, рассеянного на атомах бериллия, хорошо воспроизводится теоретически, если использовать квантово-механическое описание связанных электронов в атомах. Он объяснил наблюдаемое при фиксированном угле рассеяния уширение

энергетического спектра импульсным распределением связанных электронов в веществе рассеивателя и на основании результатов своих экспериментов показал, что с помощью комптоновского рассеяния можно исследовать строение атомов рассеивателя.

До последнего времени эксперименты в области комптоновского рассеяния были основаны на методе совпадений для одновременного детектирования испущенного в результате ионизации электрона и рассеянного фотона, который был предложен немецким физиком Вальтером Боте (Bothe) как раз для изучения эффекта Комптона в 1924 году. Этот метод нашел широкое применение в экспериментальной физике, и в 1954 году Боте получил Нобелевскую премию «...за его изобретение метода совпадений и открытия, сделанные с его помощью впоследствии».

Однако применение электрон-фотонного метода совпадений для прецизионных измерений невозможно в силу ряда технических ограничений. В частности, очень малая величина сечения комптоновского рассеяния при типичных небольших телесных углах сбора частиц у большинства детекторов до настоящего времени не давала возможность проводить исследования комптоновского рассеяния на свободных атомах и молекулах.

Для решения этой проблемы был развит новый метод регистрации заряженных рассеянных частиц, получивший название спектроскопия импульса отдачи ионов холодной мишени (COLd Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy, COLTRIMS), который позволяет одновременно измерять импульсы электрона и иона отдачи и тем самым проводить измерения методом совпадений

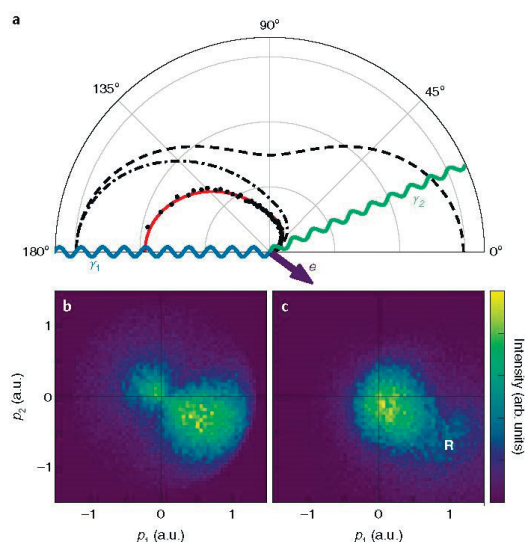


Рис. 1. Схема ионизации при комптоновском рассеянии при $\omega=2.1$ кэВ. **а**, Волнистые линии обозначают входящий и рассеянный фотоны, стрелка обозначает вектор импульса испущенного электрона. Пунктирная линия: дифференциальное сечение Томсона, то есть угловое распределение рассеяния фотонов на свободном электроны. Черные точки: экспериментальное угловое распределение фотонов при ионизации атома гелия комптоновским рассеянием, проинтегрированное по всем углам и энергиям испускаемых электронов ниже 25 эВ. Статистическая ошибка меньше размера точки. Черная штрих-пунктирная линия: аппроксимация A^2 для всех энергий электронов. Сплошная красная линия: аппроксимация A^2 для энергий электронов ниже 25 эВ. Черные линии увеличены в 1.9 раза. **б**, Распределение импульсов электронов, испущенных при комптоновском рассеянии фотонов с энергией 2.1 кэВ на атоме гелия. Система координат такая же, как в **а**, то есть плоскость определяется входящим (горизонтальным) и рассеянным фотоном (верхняя полуплоскость). Вектор передачи импульса направлен в переднюю нижнюю полуплоскость. Данные проинтегрированы по компонентам импульса электрона вне плоскости рассеяния. **в**, Распределение импульса иона гелия для тех же условий, что и в **б**.

с высокой точностью. В частности, с использованием этой техники стало возможно собирать ионы и электроны практически с полного телесного угла $\Omega_{full} = 4\pi$. При этом импульс рассеянного фотона может быть найден из закона сохранения импульса, вследствие чего отпадает необходимость детектирования самого фотона.

Недавно с помощью детектора COLTRIMS на синхротроне Petra III (DESY, Гамбург) международная исследовательская группа, в которую, в рамках со-

трудничества ОИЯИ, МГУ им. М.В. Ломоносова и университета Гете (Франкфурт-на-Майне, Германия), входили авторы настоящей заметки, провела кинематически полное экспериментальное измерение характеристик комптоновского рассеяния на свободных атомах гелия и дала адекватное теоретическое описание полученных результатов. В эксперименте наблюдалось комптоновское рассеяние фотонов с энергией 2.1 кэВ на атомах гелия вблизи порога ионизации [1], то есть такие реакции, в которых переданная энергия оказывается близкой к потенциалу однократной ионизации атома гелия $I_p=24.6$ эВ. Для описания результатов эксперимента авторы настоящей заметки предложили теоретическую модель, которая позволила рассмотреть целый ряд пробных функций начальных и конечных состояний и оценить возможность этого нового метода проводить прецизионную спектроскопию (угловую и энергетическую) внешних оболочек атома (молекулы). Расчеты проводились на суперкомпьютере «Говорун» ОИЯИ, и полученные результаты в значительной степени совпали с экспериментом (см. рис. 1 из работы [1]). В то же время эксперименты различили наборы пробных функций, что показало возможность использования комптоновской ионизации наряду с известными спектроскопическими методами, такими как $(e,2e)$, (p,pe) и др.

Эти экспериментальные и теоретические результаты, опубликованные недавно в журнале *Nature physics*, раскрыли новые возможности комптоновской ионизации атома при передаче энергии, близкой к порогу однократной ионизации, как эффективного метода спектроскопии внешних оболочек атомов и молекул. Все это стало возможным благодаря прецизионным измерениям очень маленьких дифференциальных сечений методом COLTRIMS и теоретических расчетов этих сечений на суперкомпьютере «Говорун» ОИЯИ. В результате попытки классиков науки использовать эффект Комптона, открытый почти сто лет назад, для целей спектроскопии квантовых объектов с использованием несовершенной тогда техники, получили сегодня новый импульс.

[1] M. Kircher, et al., *Nature Physics* **16**, (2020). <https://www.nature.com/articles/s41567-020-0880-2>

Возможность использования терагерцового излучения в квантовых технологиях

Физики МГУ описали электромагнитное излучение оптического и терагерцового диапазона частот, рождающееся в процессе параметрического рассеяния света. Также они показали возможность управления характеристиками квантовых оптико-терагерцовых полей с использованием прибора (нелинейного интерферометра), действие которого основано на явлении интерференции волновых функций фотонов во времени и пространстве. Ранее терагерцовое излучение, используемое в диагностике и системах безопасности, практически не рассматривалось с точки зрения квантовых технологий. Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда.

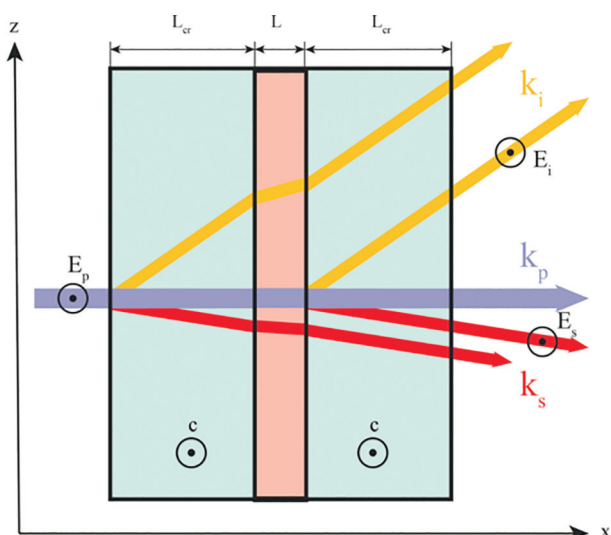
Терагерцовое излучение — это электромагнитные волны, частота которых лежит между инфракрасным и сверхвысокочастотным (СВЧ) диапазонами. В отличие от рентгеновского, такое излучение неионизирующее, поэтому не наносит вреда тканям организма и применяется в медицинской диагностике и системах безопасности, а также используется при контроле качества оборудования и реставрации произведений искусства.

Однако в терагерцовом диапазоне частот до сих пор не проводились исследования процессов, которые способствуют появлению излучения в квантовых состояниях. Одним из таких процессов является параметрическое рассеяние света. В ходе этого оптического явления один фотон с высокой энергией преобразуется в бифотонную (состоящую из двух частиц) пару так называемых запутанных фотонов. Квантовые состояния этих частиц статически зависят друг от друга (коррелируют друг с другом), оставаясь взаимосвязанными даже на большом расстоянии. Таким образом, воздействуя на один фотон, можно обнаружить изменение состояния и его партнера. Эта технология широко применяется в квантовом шифровании, а также при создании квантовых компьютеров и сенсоров. Обычно частоты двух фотонов, образовавшихся при параметрическом рассеянии света, находятся в одном диапазоне. Однако физики из МГУ изучили случай, когда взаимодействовать между собой в паре и быть статистически зависимыми друг от друга могут видимый фотон и фотон, частота которого почти в тысячу раз меньше. Эта частота лежит в терагерцовом диапазоне, соответственно и сам фотон — терагерцовый, а первый фотон из пары — оптический. Ученым удалось описать уравнения поведение фотонов в этой паре и получить решение, учитывающее такие факторы, как тепловые шумы, угловая расходимость и поглощение волн внутри кристалла, в котором и создается бифотонное поле. Кроме того, исследователи выбрали наиболее подходящие условия, при которых удобнее всего наблюдать квантовое бифотонное состояние оптического и терагерцового фотонов.



В своей следующей статье авторы дополнили теорию экспериментальными данными, показав на практике возможность управления спектральными и пространственными свойствами оптико-терагерцовых полей с использованием нелинейного интерферометра Маха-Цендера. Принцип его работы заключается в явлении квантовой когерентности, то есть коррелированности частиц системы. Она возникает при «перепутывании» холостых фотонов (не идущих на детектор), которое проявляется в появлении интерференционной картины в распределении видимых фотонов.

«Подобные интерферометры могут быть использованы для исследования свойств различных материалов в терагерцовом диапазоне частот. Ключевой момент метода заключается в том, что информацию о дисперсионных свойствах проще извлечь из измерений в оптическом канале, так как между оптическими и терагерцовыми фотонами существует сильная корреляция. Рассматриваемый интерферометр — перспективный источник терагерцовых полей с новыми характеристиками, а интерференционные эффекты могут быть полезны для разработки сенсоров в терагерцовом частотном диапазоне», — рассказала Галия Китаева, один из авторов статьи, руководитель проекта по гранту РНФ, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ.



"Nonlinear interference in the strongly nondegenerate regime and Schmidt mode analysis". Kirill A. Kuznetsov, Ekaterina I. Malkova, Roman V. Zakharov, Olga V. Tikhonova, and Galiya Kh. Kitaeva. *Phys. Rev. A* **101**, 053843 – Published 18 May 2020

Разработан новый метод создания универсальных перепрограммируемых интерферометров

Ученые Центра квантовых технологий физического факультета МГУ разработали новый способ создания универсальных перепрограммируемых интерферометров — оптических устройств, которые могут выполнять произвольные линейные преобразования между большим числом каналов.

Интерферометры позволяют осуществлять линейные оптические преобразования, принимая сигнал от излучения, в которое кодируют обрабатываемую информацию, преобразуя его и передавая, например, в другую часть вычислительной системы. Таким образом, данные устройства играют большую роль в процессах обработки, получения и передачи информации самого разного уровня, будь то телекоммуникационные сети, системы машинного обучения или квантовые вычислители.

Важным условием для практических применений интерферометров является возможность изменять их конфигурацию (то есть перепрограммировать), так как это позволяет использовать один интерферометр для широкого класса задач.

Современные методы создания перепрограммируемых интерферометров, основанные, как правило, на реализациях в виде интегральных оптических схем, чувствительны к ошибкам, возникающим на этапе изготовления. С увеличением числа каналов, между которыми необходимо реализовать преобразования, такие ошибки становятся все более серьезным препятствием в корректной реализации систем, в которых используются интерферометры. Но благодаря использованию альтернативной архитектуры интерферометра, предложенной учеными ЦКТ МГУ, влияние ошибок, вызванных неидеальными технологиями изготовления, может быть беспрецедентно снижено.

Важно, что в результате применения нового метода становится возможным почти произвольный выбор «строительных блоков», из которых состоят схемы интерферометров. Это существенно отличает предлагаемый метод от используемых до настоящего времени, ведь они используют только один вполне определенный блок и любое отклонение от этого блока приводит к ошибкам. Предложенная же архитектура не ограничена конкретной топологией размещения элементов, что позволяет использовать разные технологии изготовления оптических схем.

Авторы отмечают, что, хотя работа содержит также результаты фундаментальной значимости, особую важность она имеет именно для прикладных разработок. Универсальные перепрограммируемые интерферометры незаменимы в классических системах обработки информации, например, в оптических нейронных сетях и телекоммуникационных системах. Но еще большую

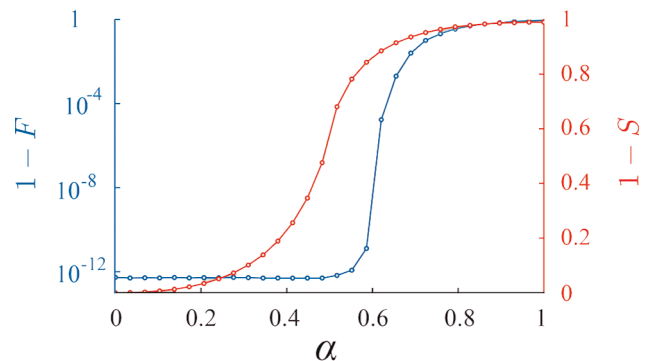


Рис. 1. Синяя кривая — зависимость ошибки преобразования многоканального интерферометра $1-F$, изготовленного предложенным методом, в зависимости от параметра α , который характеризует ошибку, вызванную неидеальной технологией изготовления схемы. Ошибка всего преобразования $1-F$ остаётся постоянной (на уровне неточности численного расчёта) вплоть до определённого порогового значения параметра α , по достижении которого интерферометр теряет свою универсальность. Красная кривая — зависимость различия блоков ($1-S$), составляющих схему, от параметра α . Порогового поведения не наблюдается — кривая растёт монотонно.

роль подобные устройства играют в области квантовых симуляций, вычислений и квантовой коммуникации, где они служат для преобразования квантовых состояний оптических полей.

«Полученные результаты внесут значимый вклад в развитие оптических квантовых вычислений — одной из наиболее перспективных экспериментальных платформ прикладной квантовой информации», — полагает один из авторов статьи научный сотрудник ЦКТ МГУ Михаил Сайгин.

Работа является теоретической. Результаты получены благодаря использованию аналитических подходов и численных методов глобальной оптимизации. В исследовании принимали участие научные сотрудники Центра квантовых технологий физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова к.ф.-м.н. Михаил Сайгин, Илья Кондратьев, Иван Дьяконов, к.ф.-м.н. Станислав Страупе и д.ф.-м.н., профессор Сергей Кулик. Соавтором работы выступил сотрудник МФТИ, Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Института ядерных исследований РАН к.ф.-м.н. С.А. Миронов.

«Robust Architecture for Programmable Universal Unitaries». M.Yu. Saygin, I.V. Kondratyev, I.V. Dyakonov, S.A. Mironov, S.S. Straupe, and S.P. Kulik. Phys. Rev. Lett. **124**, 010501, 2020.

Сотрудники кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества предложили измерять форму жидкости по-новому

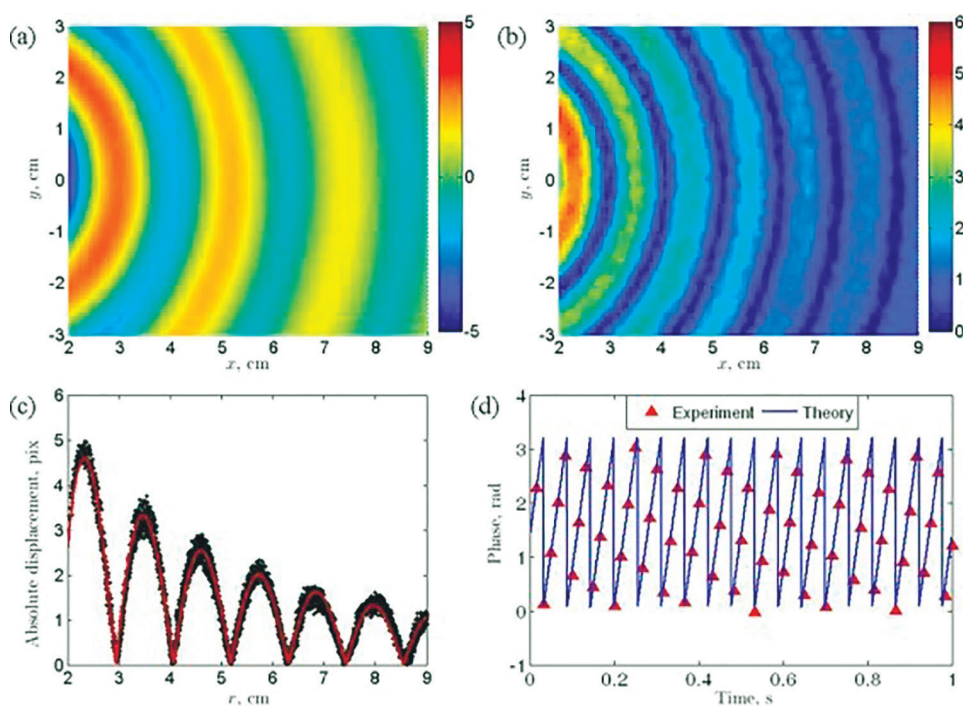
Ученые физического факультета предложили новый вариант теневого фонового метода для измерения рельефа поверхности жидкости. Это поможет лучше исследовать волны в тонких пленках, которые применяются в системах охлаждения ядерных реакторов, процессоров суперкомпьютеров, а также в нефтепереработке, фармацевтической и пищевой промышленности.

Новый метод, предложенный учёными, основан на компьютерном сравнении двух изображений фонового экрана, полученных при съемке его отражения от поверхности жидкости — при наличии возмущений и в их отсутствие. Искривление поверхности приводит к искажению изображения, так же, как и при образовании лунной дорожки на поверхности моря. Видимое смещение элементов изображения пропорционально локальному углу наклона поверхности, что позволяет рассчитать мгновенную карту рельефа поверхности. «Чрезвычайно простая экспериментальная установка состоит лишь из фотоаппарата, подсвеченного фонового экрана, и сосуда с исследуемой жидкостью. Метод имеет очень высокую чувствительность и позволяет измерять возмущения поверхности с амплитудой порядка нескольких микрон, причем, в отличие от ранее предложенных методов, измерения можно проводить и в непрозрачных жидкостях», — рассказал старший научный сотрудник отделения экспериментальной и теоретической физики физического факультета МГУ Николай Винниченко.

Гравитационно-капиллярные волны, которые исследовали физики МГУ, встречаются фактически везде, где есть течение жид-

кости со свободной поверхностью. Практические приложения тонких пленок, в основном, теплофизические и химические: охлаждение пленками жидкости сильно нагретых поверхностей (стенки камер сгорания ракетных двигателей на жидком топливе, стенки ядерных реакторов, процессоры в некоторых суперкомпьютерах) и очистка жидкости путем разделения на испаряющуюся и неиспаряющуюся части (нефтепереработка, опреснение воды, фармацевтическая и пищевая промышленность).

«Кроме того, гравитационно-капиллярные волны на пленках возникают при нанесении покрытий. Еще Генри Форд говорил, что автомобиль может быть любого цвета, при



Д.ф.-м.н., профессор
Александр Викторович Уваров



Ассистент
Юлия Юрьевна Плаксина



Старший научный сотрудник
Николай Аркадьевич Винниченко

условии, что он черный — краски других цветов сохли медленнее, и из-за течения в пленке окраска получалась неравномерной. В геофизике волны обычно имеют существенно большую амплитуду и их можно измерить другими способами, например, просто фотографируя подкрашенную жидкость сбоку», — объяснил Николай Винниченко.

С помощью нового метода учёные провели измерения формы поверхности при распространении гравитационно-капиллярных волн, определили зависимость коэффициента затухания волн от частоты, и измерили изменения формы поверхности различных жидкостей при взаимодействии с конвективной струей от расположенного под поверхностью линейного источника тепла. Всплывающая на поверхность нагретая жидкость имеет не только меньшую плотность, но и меньший коэффициент поверхностного натяжения, поэтому могут присутствовать два механизма конвекции: термогравитационный, связанный с изменением плотности, и тер-

мокапиллярный, связанный с изменением коэффициента поверхностного натяжения. Термогравитационная конвекция приводит к вспучиванию нагретого участка поверхности, а термокапиллярная конвекция уносит часть жидкости с него в стороны. Поэтому измерения рельефа поверхности позволяют судить о соотношении влияния двух типов конвекции. «В нашей работе впервые было проведено сравнение мгновенных распределений рельефа поверхности и полей температуры поверхности, измеренных с помощью тепловизора в задаче Рэлея-Бенара», — добавил ученый.

Алексей Пуштаев



Материал подготовлен в рамках проекта Наука – МГУ.

"Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented Schlieren technique". Nikolay A.Vinnichenko, Alexey V. Pushtaev, Yulia Yu. Plaksina, Alexander V. Uvarov. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **114**, 1 June 2020, 110051

Физики МГУ разработали новый вид поляриметрии – фантомную поляриметрию

Аспиранты и сотрудники кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ разработали новый вид поляриметрии, который может способствовать созданию принципиально новых, более эффективных способов диагностики биологических тканей.



Д.ф.-м.н., профессор
Анатолий Степанович Чиркин

Поляриметрия — метод исследования сред, основанный на изменении поляризационного состояния света, освещающего объект. Перенесение в поляриметрию принципа фантомных изображений дополняет классический подход новыми возможностями — в частности, позволяет устранить все оптические элементы из канала наблюдения. «Фантомная поляриметрия может стать основой, например, для создания принципиально новых, более эффективных методов бесконтактной диагностики биологических тканей как *in vitro*, так и *in vivo*, то есть может быть использована не только для научных исследований, но и в практической медицине», — рассказал доцент кафедры общей физики и волновых процессов Сергей Магницкий.

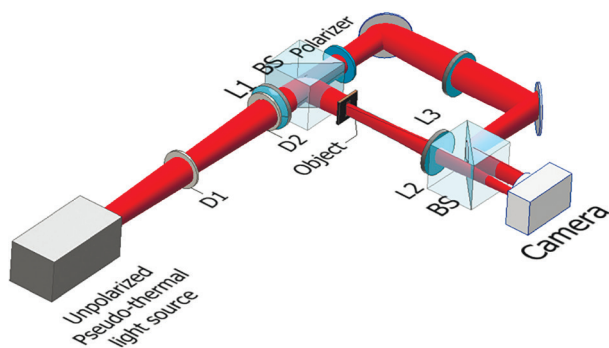


Схема экспериментальной установки, реализующей фантомную поляризацию в неполяризованном квазитепловом излучении.

Учёные показали, что фантомная поляриметрия позволяет восстановить пространственное распределение азимута и величину линейного дихроизма таких объектов.

Для поляризационной дискриминации объекта используется неполяризованное, пространственно некогерентное излучение. Часть этого излучения направляется на объект и регистрируется детектором по всей апертуре пучка, не дающего, однако, информации о состоянии поляризации объекта. Другая часть излучения, не проходящая через объект, поступает в так называемое восстанавливающее плечо, где проходит через поляризатор (поляризационный светоделитель) и регистрируется сканируемым в поперечном направлении «точечным» детектором (детекторами).



Доцент кафедры общей физики и волновых процессов Сергей Магницкий

Разработанная методика позволяет освободить плечо объекта от всех дополнительных оптических элементов, в том числе поляризаторов. Информацию о поляризационных свойствах объекта извлекают из измерения взаимной корреляционной функции тока детектора объектного плеча и тока восстанавливающего плеча для двух ортогональных направлений, перпендикулярных направлению распространения излучения.

«В эксперименте источником неполяризованного некогерентного излучения служила суперпозиция двух ортогонально поляризованных, пространственно некогерентных квазитепловых пучков, которые формировались при прохождении двух лазерных пучков через вращающиеся матовые диски, — объяснил профессор, д.ф.-м.н. Анатолий Чиркин. — Последние получали в результате разделения излучения He-Ne-лазера с длиной волны $\lambda = 0,628$ мкм на поляризационном светоделителе. Суперпозиционный пучок имел радиус корреляции около 56 мкм и степень деполаризации не хуже 92%».

Этот неполяризованный пучок разделяли на два с помощью обычного светоделителя. Один пучок направляли в канал изображения, где размещался объект с распределенным линейным дихроизмом. Все прошедшее через объект излучение фокусировалось на интегрирующий точечный детектор, который измерял полную мощность прошедшего через объект излучения, не формируя изображение объекта. В канале восстановления некогерентное излучение разделялось на два ортогонально поляризованных пучка, пространственный профиль которых регистрировался многопиксельным детектором.

Поляризационное фантомное изображение восстанавливалось из пространственной корреляции сигналов, получаемых от точечного и многопиксельного детекторов.

Развитый метод можно перенести на объекты с круговым дихроизмом, а также реализовать в варианте вычислительных фантомных изображений — например, с использованием пространственного модулятора света — или квантовой фантомной поляриметрии на основе поляризационно-запутанных фотонов. Интересным представляется перенесение фантомного принципа на другие спектральные диапазоны, в частности терагерцовый.

Данная работа является продолжением исследований, опубликованных в журнале *Laser Physics Letters* (2018 г.).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-02-00849 и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (19-2-6-211-1)

"Ghost polarimetry with unpolarized pseudo-thermal light." Sergey Magnitskiy, Dmitriy Agapov, and Anatoly Chirkin. *Optics Letters*. 45, Issue 13, 3641–3644 (2020)

РТ-симметрия терагерцовой фотопроводимости в гетероструктурах на основе топологических изоляторов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Сотрудники лаборатории полупроводникового материаловедения кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета совместно с немецкими коллегами показали, что в гетероструктурах на основе топологических изоляторов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ наблюдается необычная РТ-симметричная терагерцовая фотопроводимость при приложении магнитного поля в фарадеевской геометрии. Появление эффекта противоречит симметричным соображениям. Показано, что такое нарушение симметрии обусловлено взаимодействием электронной системы топологического изолятора с внешним фактором, природа которого пока неясна.



Профессор Д.Р. Хохлов

Физика неэрмитовых систем является предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований в последнее время. Неэрмитовы системы не являются замкнутыми, что приводит к возможности появления целого ряда эффектов, к которым, относится РТ(parity-time)-симметрия. Как правило, РТ-симметрия проявляется в оптических экспериментах. В то же время, насколько нам известно, о проявлениях РТ-симметрии в фотоэлектрических эффектах ранее не сообщалось. В настоящей работе сообщается об обнаружении РТ-симметричной терагерцовой фотопроводимости в структурах на основе полупроводниковых твердых растворов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, находящихся в топологической фазе.

Фотопроводимость в магнитных полях до 3 Тл исследовались при $T = 4.2$ К в условиях воздействия импульсным лазерным излучением с длиной волны от 90 до 496 мкм. Длительность импульса составляла ~ 100 нс. Магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости образца параллельно потоку падающего излучения, т.е. была реализована фарадеевская геометрия эксперимента.

Было показано, что сигнал фотопроводимости в исследуемых пленках оказывается асимметричным по магнитному полю. Данную ситуацию можно рассматривать как нарушение Т-симметрии. Эффект является совершенно необычным для материалов, в которых отсутствует встроенный магнитный момент. Кроме того, фотопроводимость оказывается несимметричной для двух зеркально расположенных пар потенциальных контактов, что можно трактовать как нарушение Р-симметрии. В то же время фотоотклик не изменяется при одновременной инверсии магнитного поля и замене пары потенциальных контактов на зеркально расположенную, демонстрируя РТ-инвариантность (см. рис. 1а). Важно подчеркнуть, что вышеуказанные эффекты нарушения симметрии наблюдаются только в неравновесной ситуации. Равновесные характеристики, такие как магнитосопротивление, симметричны по магнитному полю и не отличаются для зеркальных пар потенциальных контактов.



Доцент А.В. Галеева



Аспирант А.С. Казаков

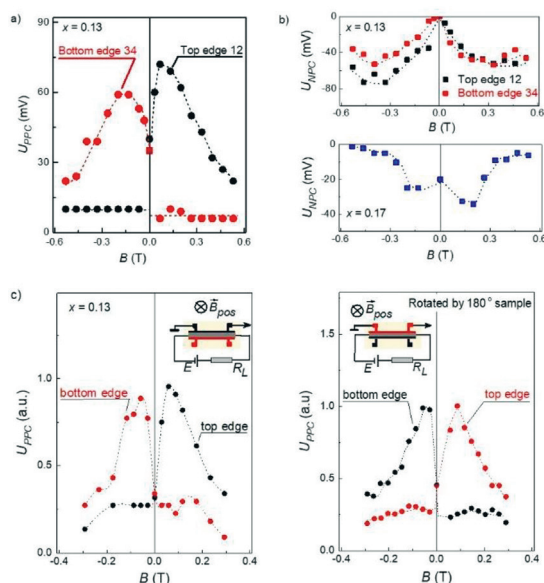


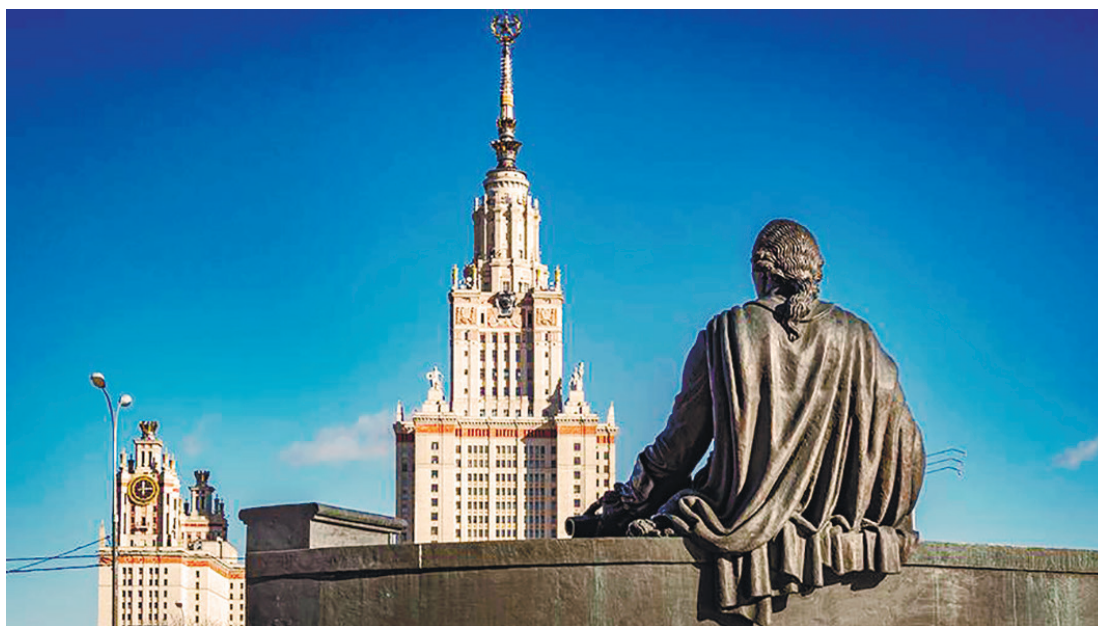
Рис 1. Зависимость амплитуды фотопроводимости от магнитного поля. (a) Амплитуда положительной фотопроводимости U_{PPC} , измеренная для верхнего (контакты 1-2) и нижнего (контакты 3-4) краев образца топологической фазы с $x = 0.13$. (b) Амплитуда отрицательной компоненты фотопроводимости U_{NPC} , полученная для верхнего и нижнего краев образца с $x = 0.13$ (верхняя панель) и топологически тривиального образца с $x = 0.17$ (нижняя панель). Частота ТГц излучения $f = 1.07$ ТГц, температура образца $T = 4.2$ К. (c) Амплитуда положительной компоненты фотопроводимости U_{PPC} , нормированная на максимальное значение, полученная до (левая панель) и после (правая панель) поворота на 180 градусов вокруг оси магнитного поля. В ходе этой операции верхний и нижний края образца физически меняются местами. Физические края показаны цветом, их положения (сверху или снизу) указаны возле каждой кривой. Образец находится в топологической фазе ($x = 0.13$). На вставках изображена электрическая измерительная схема и положение соответствующих краев образца.

Мл.н.с. А.И. Артамкин



Появление такого эффекта противоречит видимой симметрии задачи, которая инвариантна относительно вращения образца на 180 градусов вокруг оси магнитного поля. Было показано, что причиной, нарушающей симметрию, не могут быть ни небольшие отклонения экспериментальной геометрии от идеальной фарадеевской, ни факторы, обусловленные анизотропией образца любой природы (см. рис. 1c). Следовательно, за появление эффекта ответственно взаимодействие электронной системы топологического изолятора с неким внешним фактором. Установление природы этого внешнего фактора является предметом дальнейших исследований.

"Apparent PT-symmetric terahertz photoconductivity in the topological phase of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ -based structures". A.V. Galeeva, A.S. Kazakov, A.I. Artamkin, L.I. Ryabova, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, M.I. Bannikov, S.N. Danilov, D.R. Khokhlov. *Scientific Reports*, **10**, 2377 (2020). DOI: 10.1038/s41598-020-59280-0



Анатолий Михайлович Черепашук награжден орденом Александра Невского



Указом Президента Российской Федерации № 380 от 8 июня 2020 года за «заслуги в научно-педагогической деятельности, подготовке высококвалифицированных специалистов и многолетнюю добросовестную работу» орденом Александра Невского награжден заведующий кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ, заведующий отделом звездной астрофизики ГАИШ, выдающийся российский астрофизик Анатолий Михайлович Черепашук.

Глубокоуважаемый Анатолий Михайлович, сердечно поздравляем с высшей государственной наградой!

Заведующему кафедрой физики частиц и космологии, академику РАН Валерию Рубакову присудили Гамбургскую премию по теоретической физике



Заведующему кафедрой физики частиц и космологии, профессору физического факультета, академику РАН Валерию Рубакову присудили Гамбургскую премию по теоретической физике за работы по теории происхождения Вселенной.

"В последние годы исследовательские группы по всему миру смогли получить важные сведения о происхождении Вселенной. И зачастую они опирались на работы Валерия Рубакова. За свои исследования российский физик получает в этом году Гамбургскую премию по теоретической физике", – говорится на сайте премии.

Сердечно поздравляем!

Конкурс имени академика Р.В. Хохлова на лучшую студенческую научную работу 2020 года

Традиции физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, восходящие в том числе и к 60-80гг. прошлого века — периоду расцвета отечественной науки и активному развитию новых идей в лазерной физике и нелинейной оптике, нелинейной акустике, теоретической физике, гравитационно-волновой астрономии и релятивистской астрофизике, биофизике и др., связаны с поиском новых талантов и поддержкой молодых ученых. В русле сохранения и приумножения традиций одной из ключевых задач в работе Ученого совета и руководства факультета является проведение ежегодного конкурса имени академика Рема Викторовича Хохлова на лучшую студенческую научную работу. Р.В. Хохлов являл собой личность, сочетающую черты выдающего ученого, организатора науки и воспитателя с высокими моральными критериями. Эти его качества, естественно, вызывали интерес и привлекали талантливых студентов и аспирантов на кафедру волновых процессов и в его научную группу. Будучи ректором МГУ имени М.В. Ломоносова, известным ученым мирового уровня, труды которого отмечены высокими государственными наградами, он один из первых оценил роль междисциплинарных исследований в развитии современной науки и учебного процесса. Многие его студенты и аспиранты в последствие сами стали известными профессорами и лидерами в ряде новых направлений современной науки не только в нашей стране, но и далеко за ее пределами.



Профессор Р. В. Хохлов и будущий Нобелевский лауреат профессор Н. Бломберген (1966 г.) с коллегами (профессор С. А. Ахманов и профессор Л. С. Корниченко) и учениками

Конкурс имени академика Р.В. Хохлова на лучшую студенческую научную работу насчитывает почти 40-летнюю историю и проводится в рамках Положения, в котором заложены принципы определения лучших теоретических и экспериментальных исследований, оформленных в виде дипломов выпускников бакалавриата и диссертаций выпускников магистратуры и специалитета. В рамках Конкурса рассмотрение магистерских и бакалаврских работ проводится отдельно. На Конкурс 2020 года было выдвинуто 70 научных работ. Бакалавры представили 34 дипломные работы на Конкурс, магистры и специалисты — 36 диссертаций и дипломов. В состав жюри, насчитывающий 36 ученых высшей квалификации, включены представители всех отделений физического факультета. Особенностью проведения нынешнего Конкурса явился дистанционный двухэтапный формат отбора лучших студенческих работ. Обсуждение и принятие квалификационных решений осуществлялось в дистанционном онлайн режиме. Выявилась определенная специфика в проведении конкурсных процедур. Особенностью такой работы, с одной стороны, явилась необходимость устойчивой интернет-коммуникации между членами жюри. С другой стороны, традиционное обсуждение и анализ значительного числа научных работ по широкому спектру научных задач, представленных кафедрами на Конкурс, потребовало высокой концентрации внимания при ограниченном личном контакте членов жюри в условиях функционирования в виртуальном пространстве. В значительной степени эффективность процесса обсуждения зависела и от «мобилизационного ресурса» эксперта. В целом приобретен положительный опыт работы жюри в новых реалиях нашей факультетской жизни. Состоялось два заседания жюри. На первом заседании в результате тайного голосования были определены 15 студентов магистратуры — финалистов конкурса и 10 студентов бакалавров, работы которых заняли 1, 2 и 3 места. На втором заседании Конкурса, которое проходило 26 июня, финалисты магистры и специалисты — соискатели высших наград представляли доклады на онлайн конференции. По итогам выступлений финалистов Конкурса в результате тайного голосования и подсчета баллов были определены победители и лауреаты конкурса среди студентов магистратуры и специалитета.

Почетными дипломами были награждены следующие студенты бакалавры:

Премия 1 степени

1. **Распутный Андрей Владиславович** кафедра квантовой электроники
2. **Котельникова Любовь Михайловна** кафедра акустики
3. **Масляницына Анастасия Игоревна** кафедра общей физики и волновых процессов

Премия 2 степени

4. **Ганцева Анна Рифатовна** кафедра биофизики

5. **Дюков Владислав Алексеевич** кафедра общей физики и волновых процессов
6. **Неделько Никита Сергеевич** кафедра физики частиц и космологии

Премия 3 степени

7. **Петров Игнат Андреевич** кафедра теоретической физики
8. **Неило Алексей Александрович** кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники
9. **Федюнин Федор Дмитриевич** кафедра оптики, спектроскопии и физики наносистем
10. **Качалова Дарья Ильинична** кафедра общей ядерной физики

Почетными грамотами были награждены следующие студенты магистры и специалисты:

1. **Пенсионеров Иван Андреевич** кафедра физики космоса
2. **Хлопунов Михаил Юрьевич** кафедра теоретической физики
3. **Ельянов Артём Евгеньевич** кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
4. **Слепцова Юлия Васильевна** кафедра физики Земли
5. **Власенко Даниил Михайлович** кафедра астрофизики и звездной астрономии
6. **Богданов Станислав Дмитриевич** кафедра фотоники и физики микроволн

Почетными дипломами были награждены следующие студенты магистры:

Премия 1 степени

1. **Петров Павел Константинович** кафедра физики частиц и космологии

Премия 2 степени

2. **Асташенков Михаил Олегович** кафедра квантовой теории и физики высоких энергий
3. **Горлова Диана Алексеевна** кафедра общей физики и волновых процессов
4. **Цветков Дмитрий Максимович** кафедра общей физики

Премия 3 степени

5. **Пономарчук Екатерина Максимовна** кафедра акустики

6. **Захаров Роман Викторович** кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники

7. **Леньшина Наталья Дмитриевна** кафедра квантовой статистики и теории поля

8. **Егорова Виктория Михайловна** кафедра физики моря и вод суши

9. **Поспелов Никита Андреевич** кафедра биологии

Председатель жюри Конкурса, профессор В.М.Гордиенко

Как были созданы подводные самонаводящиеся противолодочные ракеты

Настоящие заметки посвящены истории создания подводных противолодочных самонаводящихся ракет и участию в этом процессе физического факультета МГУ и его выпускников. Взятые на вооружение эти ракеты существенно повысили оборонную мощь нашей Родины, а сотрудники физического факультета МГУ внесли значительный вклад в повышение мощи нашей армии.

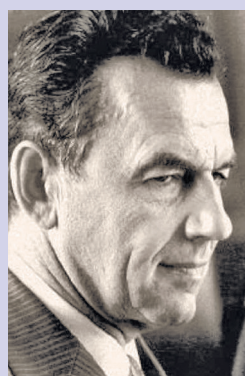
Как известно, летом 1945 г. в США была испытана на полигоне первая атомная бомба. А уже 6 и 9 августа она была применена в войне против Японии. При этом были полностью уничтожены города Хиросима и Нагасаки. Менее чем через месяц Япония капитулировала, а человечество ясно осознало, что использование атомного оружия в войне ставит под сомнение само существование цивилизации.

В то время остро стояла проблема доставки атомного оружия. Ракеты имели радиус действия до 1000 км, и использование их в войне с СССР было невозможно. Наши противники рассматривали несколько путей решения этой проблемы.

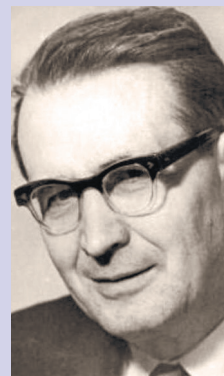
(i) Повысить радиус действия ракет — сделать их межконтинентальными.

(ii) Создать подводные лодки с атомными двигателями и оснастить их имеющимися ракетами с атомными зарядами, имея в виду, что благодаря энергетическому потенциалу атомных подводных лодок (ПЛ) высокая скорость делала их неуязвимыми для самонаводящихся торпед нашего ВМФ; ПЛ могли бы тогда осуществлять боевое дежурство вблизи наших берегов. Оснащение глубинных бомб атомными зарядами и их применение против ПЛ могло привести к атомной войне, что было совершенно неприемлемым.

(iii) Создать межконтинентальные бомбардировщики с атомными ракетами на борту. Это и было сделано, но оказалось недостаточно эффективным ввиду хорошего состояния ПВО нашей страны.



Р. В. Хохлов



С. П. Стрелков

Слева направо:
Л. К. Зарембо, В. А. Красильников, С. Н. Ржевский



ПРОТИВОЛОДОЧНЫЕ ПОДВОДНЫЕ РАКЕТЫ

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
И ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ
АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ



Научная редакция:
А.В. Минаев, Ю.М. Романовский, О.В. Руденко



Л.А. Шенявский



Д.В. Хаминов



Ю.С. Рендель



О.В. Руденко



Б.М. Гуськов



А.В. Минаев

Решающим для борьбы против ПЛ оказался вопрос о существенном (кратном) повышении скорости подводного оружия, т.е. создание подводных ракет с системой самонаведения, оснащенных боевой частью с обычными взрывчатыми веществами. Их создание исключало бы возможность для атомных ПЛ противника, появившихся уже в середине 1950-х годов, барражировать вблизи наших берегов, и, следовательно, сделало бы территорию СССР недоступной для их ракет.

Собственно, еще в 1952 г. была создана первая подводная несамонаводящаяся ракета РАТ-52, но ее эффективность оказалась недостаточной. Однако, опыт работы с такой ракетой подтвердил соображения об огромном уровне гидроакустического шума, генерируемого реактивной струей в воде. Этот недостаток, с одной стороны, делал невозможным создание системы самонаведения, а, с другой стороны, высокий уровень шума гарантировал пеленгацию ракеты акустической системой ПЛ и, следовательно, возможность ее уклонения от курса ракеты.

Таким образом было ясна необходимость изучения на фундаментальном научном уровне вопроса о генерировании шума реактивного двигателя под водой и найти способ его радикального снижения. Была поставлена фундаментальная физическая задача в области нелинейной акустики, а решение этой задачи позволяло свести проблему на уровень прикладной физики и инженерной практики.

Поставленная задача была решена с участием физиков МГУ. История вопроса изложена в первой главе монографии «Советская военная мощь» (Москва: Издательский дом «Оружие и технологии», 1999), удостоенной Премии Правительства РФ.

Советским ученым и конструкторам удалось решить сложнейшие задачи и создать «бесшумные» скоростные ракеты. В результате иностранные ПЛ ушли от наших берегов и лишились возможности угрожать нам ядерным ударом. Так закладывались основы политики разрядки напряженности 1960-х годов. Затем, правда, появились и у нас, и в США ракеты межконтинентальной дальности (МБР), как со стационарным стартом, так и со стартом с ПЛ. Обе стороны оказались доступными для МБР друг друга. В результате в 1973 г. был подписан бессрочный договор об ограничении систем противоракетной обороны. К глубокому сожалению, США в одностороннем порядке вышли из этого договора в 2003 г. Остается надеяться, что новые руководители России и США смогут найти политическое решение, обеспечивающее мир на долгие десятилетия, или, что еще лучше, — решения, которые сделают атомную войну невозможной.

В работах по созданию подводных противолодочных самонаводящихся ракет принимали участие следующие сотрудники физического факультета: С. П. Стрелков, Р. В. Хохлов, Л. К. Зарембо, В. А. Красильников, С. Н. Ржевкин, А. В. Минаев, Ю. М. Романовский, О. В. Руденко, В. И. Трухин, Б. М. Гуськов, Д. В. Хаминов, А. Е. Орданович, В. И. Шмальгаузен, Ю. С. Рендель, Н. В. Степанова, Л. А. Шенявский, Ф. Ф. Климко, Ю. Г. Оксюкевич и др.

Литературными источниками при написании этих заметок послужили следующие издания:

1. Противолодочные подводные ракеты. Физические проблемы и история создания акустических систем наведения. Литературными источниками при написании этих заметок послужили следующие издания:

1. Противолодочные подводные ракеты. Физические проблемы и история создания акустических систем наведения. Научные редакторы: А.В. Минаев, Ю.М. Романовский, О.В. Руденко. Ответственный редактор: М.А. Коршунов. — М.: Издательство Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. — 208 с. ISBN 978-5-8279-0096-2.

Коллектив авторов: Б.М. Гуськов, А.В. Минаев, А.Е. Орданович, Ю.С. Рендель, Ю.М. Романовский, О.В. Руденко, Н.В. Степанова, С.П. Стрелков, В.И. Трухин, Д.Е. Хамин, Л.А. Шенявский, В.И. Шмальгаузен.

2. Советская военная мощь от Сталина до Горбачева, М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 1999. Редактор и руководитель авторского коллектива А. В. Минаев.

3. Выпускники физфака МГУ им. М.В. Ломоносова 1952 года / Сост. Ю.М. Романовский; ред. Л.Б. Розенфельд. Изд. 2-е, дополненное — М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. ISBN 978-5-8279-0135-8. В основу книги положены материалы о судьбах более чем 200 выпускников физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова 1952 г., которые удалось собрать к началу 2017 г. Многие из них стали академиками и членами-корреспондентами Академии наук, профессорами, ведущими учеными, лауреатами государственных премий. Авторами книги являются сами выпускники, их родные и близкие, друзья и сослуживцы.



Ю. М. Романовский



А. Е. Орданович,
В. И. Шмальгаузен



(Слева направо) Ф. Ф. Климко, Н.В. Степанова,
Ю.М. Романовский и Ю.Г. Оксюкевич

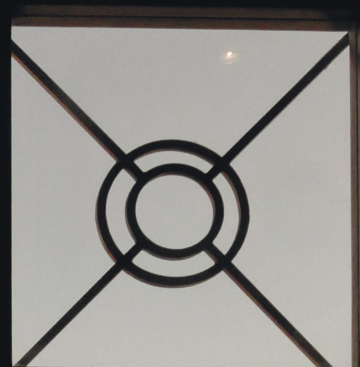


Н.В. Степанова
В.И. Шмальгаузен



В. И. Трухин

Профессор, д.ф.-м.н. Ю.М. Романовский,
кафедра общей физики и волновых процессов
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова



Бюллетень «НОВОСТИ НАУКИ». © 2020 Физический факультет МГУ.
Под ред. Н.Н. Сысоева, В.Н. Задкова, А.А. Федянина, Н.Б. Барановой

Дизайн и верстка: И.А. Силантьева.

Фотограф С.А. Савкин

Пресс-секретарь физического факультета: Пчелина Д.И.
press@phys.msu.ru

Подписано в печать 20.12.20. Тираж 200 экз.

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,
119991, Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «ООО ИмДжи Принт»

ISSN 2500–2384