

УДК 50:52:53

О НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ В ОБЛАСТИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК, ПОЛУЧЕННЫХ В 2020–2021 гг.

© 2022 г. Е. Ю. Кильпио^{1,2,*}, академик РАН И. А. Щербаков^{1,3,**}

Поступило 11.01.2022 г.
После доработки 14.06.2022 г.
Принято к публикации 06.07.2022 г.

Сообщение основано на отчетных материалах, представленных академиком-секретарем Отделения физических наук РАН (ОФН РАН) на Общих собраниях ОФН РАН в апреле 2022 г. и апреле 2021 г. и дает представление о некоторых научных результатах, полученных в области физических наук в 2020–2021 гг. в научных организациях, в отношении которых Российская академия наук осуществляет отдельные полномочия, предусмотренные постановлениями Правительства Российской Федерации от 05.06.2014 г. № 521 и от 24.12.2018 г. № 1652 (институтах РАН). Дается краткая сводная информация о работе научных организаций по разным направлениям физики, для иллюстрации приведены примеры некоторых значимых достижений в виде аннотаций.

Ключевые слова: физика атомов и молекул, конденсированные среды, физическое материаловедение, ядерная физика, физика элементарных частиц, физика плазмы, оптика, лазерная физика, радиофизика, электроника, акустика, астрономия, космические исследования

DOI: 10.31857/S2686740022070069

С 2021 г. действует новая Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.) (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации № 3684-р от 31.12.2020 г.), целью которой определено получение новых знаний об основных закономерностях строения, функционирования и развития человека, общества, природы, необходимых для устойчивого научно-технологического, социально-экономического и культурного развития страны, укрепления ее национальной безопасности и обеспечения научного лидерства в определении мировой научной повестки на долгосрочный период. Организация и координация научных исследований, проводимых в рамках Программы научными организациями и образовательными организациями высшего образования, а также иными субъектами научной и научно-технической деятельно-

сти, осуществляются Российской академией наук в качестве координатора Программы. Новая программа, существенно отличающаяся по своей структуре от ранее действовавшей программы 2013–2020 гг., охватывает все организации разной ведомственной принадлежности, в которых проводятся научные исследования, в ней по-новому сформулированы направления исследований в соответствии с современным состоянием науки.

Раздел “Физические науки” в Программе включает 7 направлений (нумерация соответствует Программе):

- 1.3.1. Физика атомов и молекул,
- 1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение,
- 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц,
- 1.3.4. Физика плазмы,
- 1.3.5. Оптика и лазерная физика,
- 1.3.6. Радиофизика и электроника, акустика,
- 1.3.7. Астрономия и исследования космического пространства.

Год начала предыдущей программы (2013–2020 гг.) совпал с годом реформы РАН, она реализовывалась в трудное для российской науки время, в период нестабильности, когда происходили многочисленные преобразования: смена подведомственности институтов РАН, реформирование ряда институтов (объединения и пр.), из-

¹ Отделение физических наук
Российской академии наук, Москва, Россия

² Крымская астрофизическая обсерватория
Российской академии наук,
п. Научный, Республика Крым, Россия

³ Федеральный исследовательский центр
“Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: lena@gpad.ac.ru

**E-mail: physics@gpad.ac.ru

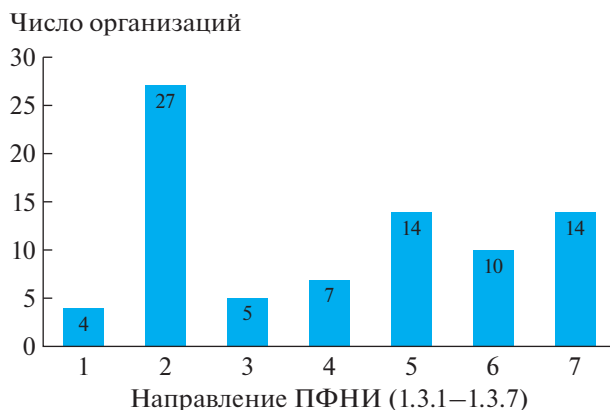


Рис. 1. Число институтов ОФН, работающих по разным направлениям ПФНИ.

менения правил формирования и формы подачи государственных заданий и отчетности по ним, перекосы в сторону наукометрии и пр. Действующая программа реализуется в условиях сначала ковидных, а потом санкционных ограничений. Тем не менее, как и в рамках предыдущей, так и в рамках нынешней программы научным организациям удается получать значимые научные результаты.

Всего в России около 250 организаций различной ведомственной принадлежности ведут исследования в области физических наук. В соответствии с Федеральным законом № 253-ФЗ (с изменениями от 19.07.2018, № 218-ФЗ) Российская академия наук осуществляет научно-методическое руководство подавляющим большинством этих организаций. При этом, в соответствии с Постановлениями Правительства № 521 от 05.06.2021 и № 1652 от 24.12.2018, в отношении ряда организаций Российской академией наук осуществляются специальные полномочия, заключающиеся в участии в формировании директорского корпуса. Все это – бывшие институты РАН, позже перешедшие под управление ФАНО России, а в настоящее время, наряду с вузами, являющиеся подведомственными Минобрнауки России. Некоторые из этих организаций в настоящее время – многопрофильные научные центры, в состав которых в результате реорганизации вошли бывшие физические институты.

Под руководством Отделения физических наук РАН находятся 44 такие организации (см. [1]). Руководство частью из них осуществляется совместно с другими тематическими и/или региональными отделениями. Рисунок 1 иллюстрирует, по каким направлениям работают эти институты.

Формирование научных тем происходит в институтах в соответствии с правилами и традициями каждой конкретной организации, научные те-

мы могут сильно различаться по своему масштабу – в некоторых институтах это работа коллектива более 100 человек, в других – небольшая группа из 5 исследователей. В первом случае это может определяться простотой управления, в последнем, возможно (хотя и не обязательно), в большей степени это определяется числом научных лидеров в коллективе. В принципе, оба подхода имеют право на существование, если не доводить до крайностей. Научные исследования – творческий процесс, и ставить жесткие рамки здесь не нужно.

Ежегодно по запросу ОФН РАН эти организации направляют в Отделение свои важнейшие научные результаты, отобранные учеными советами. В 2021 г. в ОФН РАН поступило 322 таких предложения. По результатам проведенного тщательного анализа поступивших материалов, с привлечением профильных экспертно-аналитических советов ОФН РАН, для представления руководству РАН и научной общественности было отобрано 124 результата, имеющих наибольшую значимость.

Разумеется, и в других организациях, ведущих исследования в области физических наук, есть значительное число важных результатов, которые также рассматриваются и учитываются в итоговых документах РАН, и то, что они не рассматриваются в данном сообщении, никоим образом не снижает значимости научной деятельности и результативности этих организаций. Также, конечно, нельзя не упомянуть, что часть научных результатов, охваченных данной публикацией, получена в коллаборации с другими российскими и зарубежными организациями.

Когда речь идет о научных исследованиях, сказать, какое из них окажется самым востребованным, можно будет лишь по прошествии времени. Можно отметить, что большой интерес сейчас представляют междисциплинарные работы, где физика переплетается с другими науками (например, исследования на стыке физики и медицины). Огромное значение, особенно в последнее время, приобрели исследования, результаты которых могут быть использованы в целях импортозамещения или укрепления обороноспособности страны. При всей практической пользе от решения прикладных задач в обозримом будущем нельзя забывать и о чисто фундаментальных исследованиях, которые, как это отражено и в их названии, закладывают фундамент для будущих технологий. К тому же некоторые из исследований, хотя и кажутся на первый взгляд чисто фундаментальными, на самом деле приобретают практическую значимость уже в обозримом будущем.

Ниже приведены некоторые из результатов, отобранные академиком-секретарем для представления в качестве примеров научных достиже-

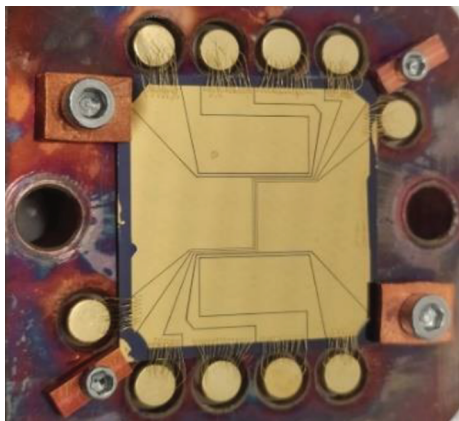


Рис. 2. Фотография первого в России атомного чипа.

ний институтов за 2020–2021 гг. Результаты даны в виде кратких аннотаций, с более подробной информацией о том или ином научном достижении можно ознакомиться в публикациях, ссылки на которые даны в описании каждого результата.

НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.1. ФИЗИКА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

1. Атомный чип в режиме непрерывной работы для задач квантовой метрологии

Учеными Института спектроскопии РАН совместно с коллегами из Московского физико-технического института разработан и экспериментально исследован атомный чип (рис. 2) для лазерного охлаждения и захвата атомов, работающий в непрерывном режиме. В основу создания атомного чипа положено сочетание технологий промышленной микроэлектроники и методов атомной оптики для создания ультрахолодных атомных ансамблей и управления ими. Атомный чип предоставляет возможность локализовать и мани-

пулировать атомами, а также возможность адресации к отдельным атомам (рис. 3). Подробнее с этим результатом можно ознакомиться в работе [2].

НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.2. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

1. Ультрочувствительный магнитный метод для неинвазивного и дистанционного мониторинга биодegradации разнообразных наночастиц с магнитными ядрами в живом организме *in vivo*

Разработан новый магнитоспектральный метод, позволяющий проводить неинвазивные исследования в течение длительного срока по биодegradации медицинских наночастиц, имеющих магнитные ядра, в организме животных *in vivo*. Установлены основные закономерности долговременной (1 год) биодegradации в организме 17 типов наночастиц в зависимости от введенной дозы, гидродинамического размера, типа покрытия поверхности и структуры наночастиц. Показано, что покрытие частиц 39-нм слоем полистирола замедляет время дegradации частиц с 40 дней до 1 года (см. рис. 4). Полученные результаты важны для разработки функциональных наномедицинских препаратов с безопасной и предсказуемой долгосрочной фармакокинетикой и способствуют внедрению разных типов наночастиц в клиническую практику. Разработанные безопасные методы высокочувствительных магнитных измерений помогут заменить применение радиоактивных меток для целого ряда биофизических исследований. Полученное достижение является результатом совместной работы ученых ИОФ РАН, ИБХ РАН, МФТИ, МИФИ, РНИМУ, НТУ “Сириус” [3].

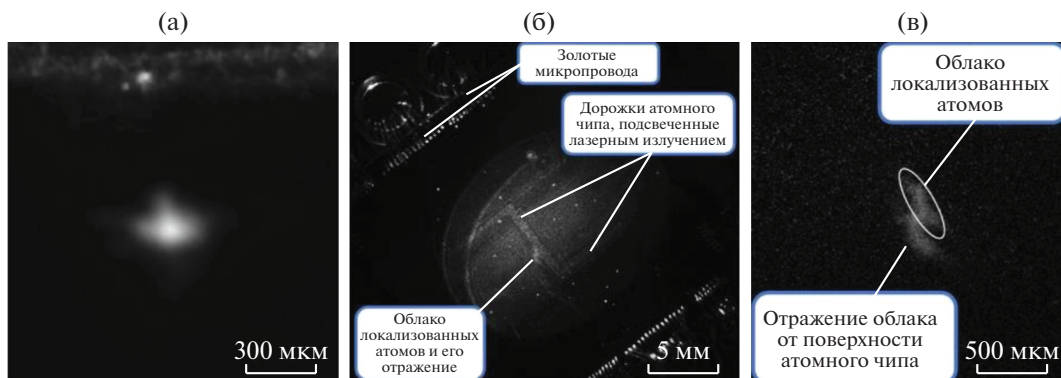


Рис. 3. а – Снимок облака атомов, сделанный вдоль поверхности атомного чипа; б – снимок облака атомов на фоне атомного чипа (снимок сделан перпендикулярно поверхности атомного чипа); в – то же самое за вычетом фоновой засветки.

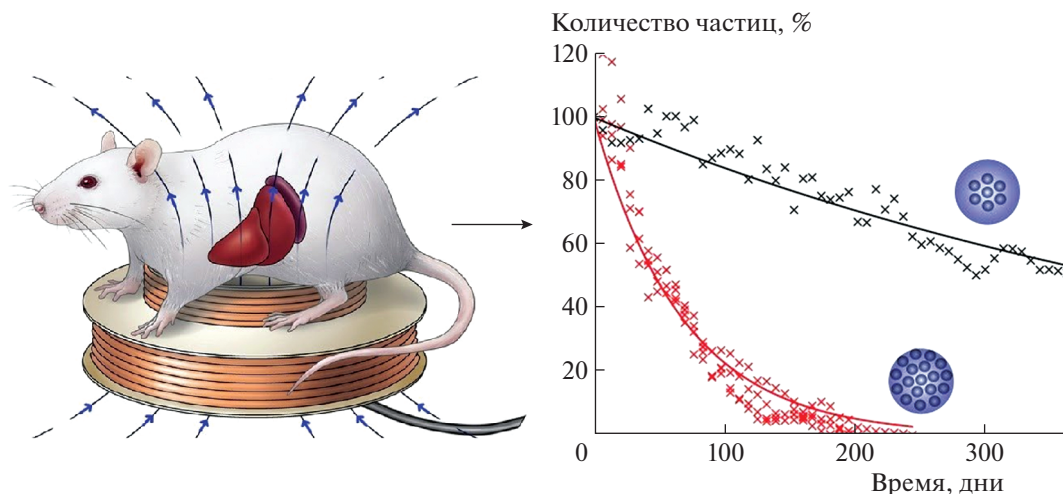


Рис. 4

2. Аптасенсор на основе SERS для быстрого количественного определения SARS-CoV-2

В широкой кооперации, включающей ученых из МГУ, Сеченовского университета, ИФТТ РАН, НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, ИФАВ РАН, ФНЦИРИП им. М.П. Чумакова, разработан экспресс-метод детектирования коронавируса SARS-CoV-2, основанный на схеме метода прямой сборки оптического сенсора с использованием коллоидных наночастиц серебра, усиливающих сигнал рамановского рассеяния (рис. 5). Показано, что при увеличении концентрации белковых молекулярных структур наночастицы серебра образуют с ними “комплексы” и формируют неоднородности электрического поля. За счет взаимодействия с меченым аптамером вируса SARS-CoV-2 создается локально-увеличенную плотность раманов-

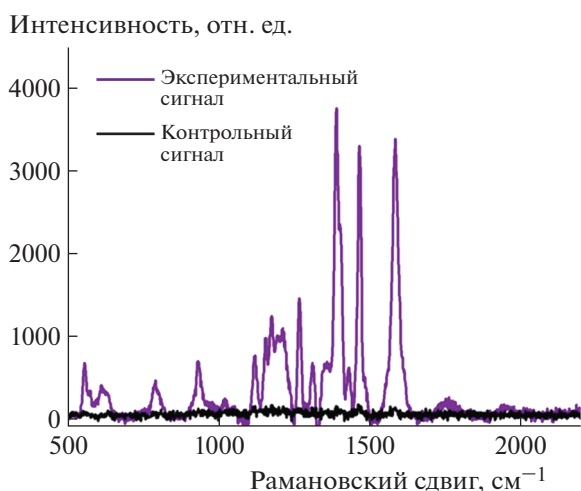


Рис. 5. Показан спектр рамановского рассеяния, измеренный при наличии вируса в системе, и контрольный сигнал.

ской метки. Материалом исследования является слюна, которую подвергают облучению лазером и регистрируют спектр рассеяния [4].

3. Металлический слой атомной толщины, встроенный в кремний

Учеными ИАПУ ДВО РАН впервые в мире была сформирована структура дельта-типа, в которой слой металла, встроенный в полупроводниковую кремниевую матрицу, имел моноатомную толщину (рис. 6). Детальную информацию об этом можно найти в [5].

4. Упорядоченные структуры из частиц в смектических нанопленках в условиях микрогравитации

Проведен анализ данных космического эксперимента (на Международной космической станции) по изучению нанопленок смектических жид-

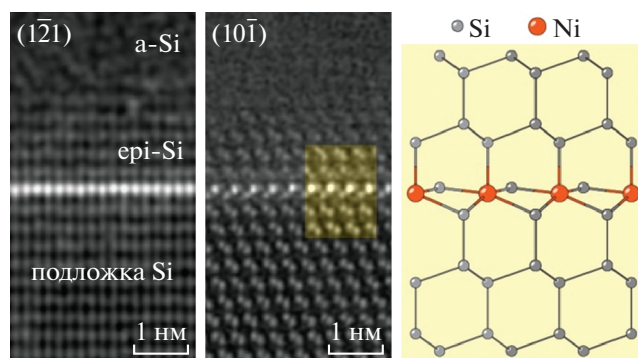


Рис. 6. Микроскопические изображения поперечного среза сформированной структуры дельта-типа с моноатомным слоем NiSi_2 и ее атомное строение, где атомы Si и Ni показаны серыми и оранжевыми кружками соответственно.

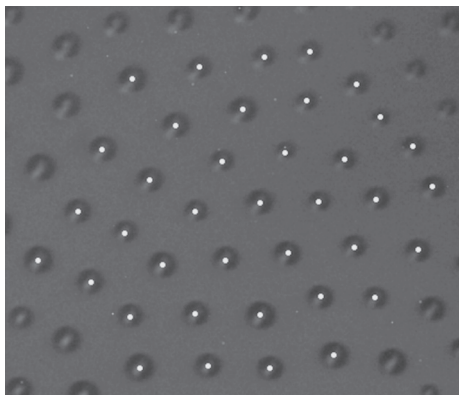


Рис. 7. Структура с гексагональным упорядочением, образованная каплями изотропной жидкости в нанопленке смектического жидкого кристалла. Белыми точками на фото отмечены центры капель. Условия микрогравитации позволили получить нанопленки больших размеров и толщиной от нескольких молекулярных слоев до сотен слоев. Горизонтальный размер фотографии 230 мкм.

ких кристаллов, приготовленных в форме сферического пузыря в условиях микрогравитации. Обнаружено, что капли образуют гексагональную структуру с равновесным межчастичным расстоянием, в несколько раз превышающим размеры капель (рис. 7). Механизм, приводящий к образованию двумерно упорядоченной структуры, может быть связан с деформацией слоевой структуры каплями. Обнаружено нетривиальное динамическое поведение частиц с периодическим разрушением и восстановлением гексагонального упорядочения. Работа выполнена коллективом сотрудников

ИФТТ РАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау в сотрудничестве с коллегами из Германии и США [6].

5. Создание анода литий-ионного аккумулятора на основе нанопористого германия, сформированного имплантацией ионами серебра

В КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, методом низкоэнергетической высокодозовой имплантации ионами серебра подложки монокристаллического германия с последующим отжигом импульсами некогерентного света, сформированы губчатые слои нанопористого германия, состоящие из переплетающихся нанонитей (рис. 8). Полученные нанопористые слои, используемые в качестве анода литий-ионного аккумулятора, в процессе его многократной зарядки/разрядки ионами лития в электролите демонстрируют высокую кулоновскую эффективность ($>97\%$) после первого цикла и сохранение 79.5% своей емкости после 1000 циклов. Электрохимические исследования показывают сохранение длительной работоспособности созданного электрода без его механических разрушений. Результаты этих исследований опубликованы в [7–9].

6. Высокотемпературная сверхпроводимость в гидридах при температуре -20°C

Сотрудниками Сколковского института науки и технологии теоретически предсказана, а экспериментаторами из ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” и ФИАН экспериментально обнаружена сверхпроводимость с критическими температурами вблизи комнатной, при давлениях более миллиона атмосфер. Методом лазерного син-

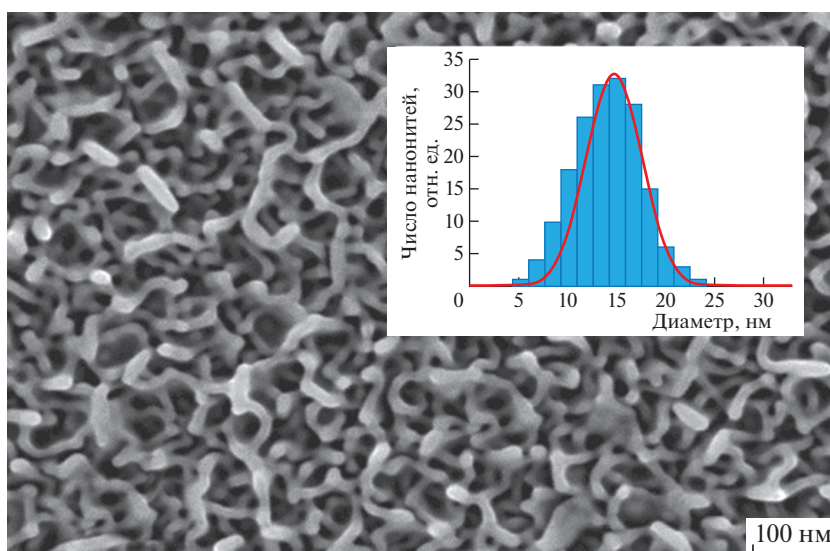


Рис. 8. Изображение, полученное на сканирующем электронном микроскопе, поверхности нанопористого германия и гистограмма распределения диаметров нанонитей по размерам.

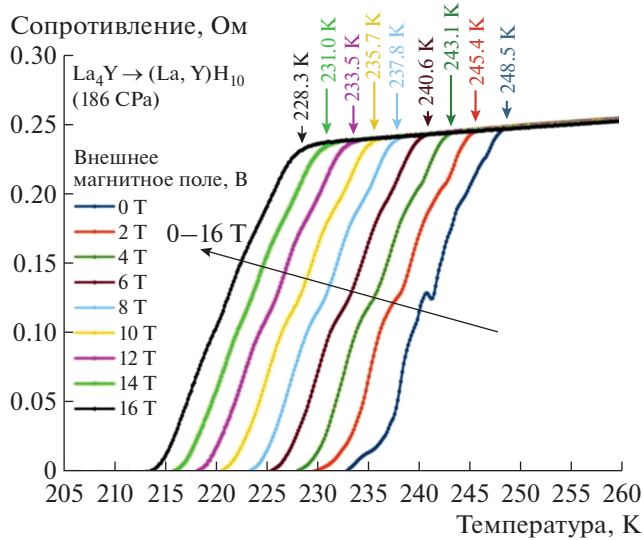


Рис. 9. Температурная зависимость сопротивления в различных магнитных полях.

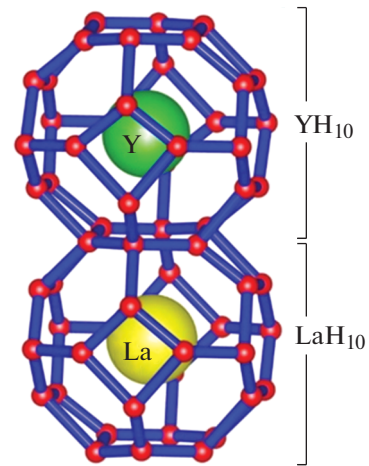


Рис. 10. Фрагмент кристаллической структуры $(La, Y)H_{10}$.

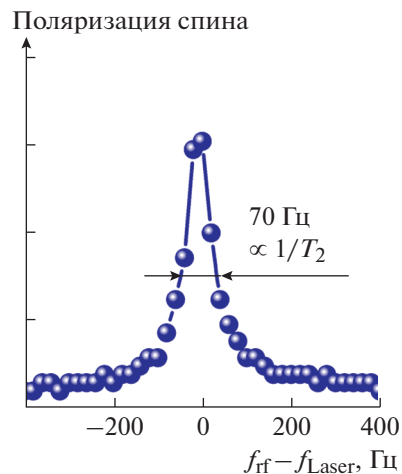
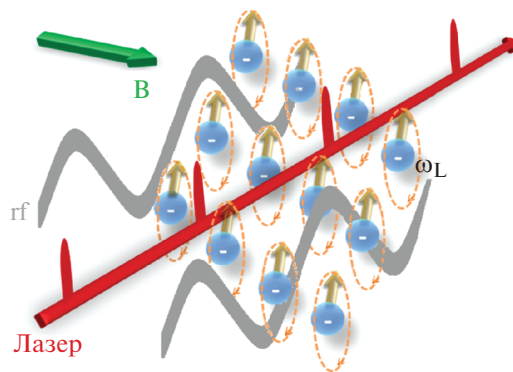


Рис. 11. Схема и спектр стимулированного резонансного спинового усиления.

теза получены образцы полигидридов. В них обнаружена и исследована сверхпроводимость с критическими температурами 253 К ($LaYH_{10}$) и 224 К (YH_6) (см. рис. 9, 10). Измерены критические магнитные поля: 115–168Т (YH_6), 135Т ($LaYH_{10}$) и критические токи: ~ 3.5 кА/мм² (YH_6) и ~ 20 кА/мм² ($LaYH_{10}$). Результаты опубликованы в [10, 11].

7. Новый рекорд в ширине электронного спинового резонанса

Сотрудниками ФИАН разработан метод стимулированного резонансного спинового усиления (рис. 11). Для этого к электронной спиновой системе прикладываются радиочастотное маг-

нитное поле и периодическое лазерное излучение, так что частота лазерных импульсов и частота радиочастотного поля совпадают с частотой ларморовской спиновой прецессии. В кристалле YAG с редкоземельными ионами Se^{3+} измерен рекордно узкий спиновый резонанс шириной в несколько десятков Гц, соответствующий времени спиновой когерентности $T_2 \sim 9$ мс [12].

8. Параметрическое возбуждение магнонов в композитном резонаторе объемных акустических волн и их детектирование с помощью обратного спинового эффекта Холла

В Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

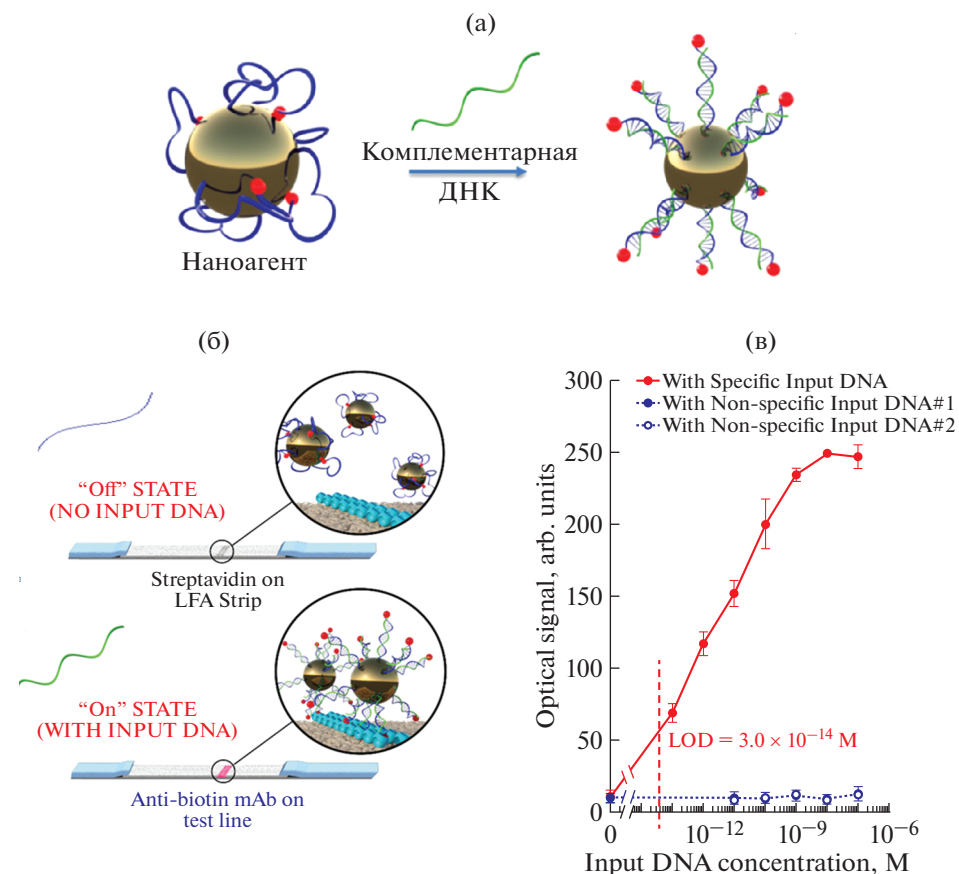


Рис. 12. Принцип активации наноагента (золотая частица с одноцепочечными РНК с биотином) при гибридизации комплементарной молекулой ДНК (а). Иммунохроматографические тест-полоски со стрептавидином или антибиотинными антителами и наноагентами в присутствии некоплементарной и комплементарной ДНК (б), а также калибровочный график для указанных молекул ДНК в объеме пробы 20 мкл (в).

(в сотрудничестве с МФТИ) экспериментально продемонстрированы электрическое возбуждение и детектирование параметрических спиновых волн и спиновых токов в резонаторах объемных акустических волн, содержащих ферромагнитные пленки железоиттриевого граната (YIG) в контакте с пленкой Pt. Подробнее с результатами проведенных исследований можно ознакомиться в статьях [13, 14].

9. Ультрочувствительные измерения концентраций молекул ДНК

В Федеральном исследовательском центре “Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук” (ИОФ РАН) совместно с МФТИ получены результаты разработки нового ультрочувствительного способа прямого (без амплификации или усиления реакции) измерения концентрации молекул РНК/ДНК на основе комбинации наночастиц золота и одноцепочечных молекул ДНК (рис. 12). Достигнута рекордная чувствительность вплоть до концентрации

ДНК 30 фМ в чрезвычайно малом объеме (20 мкл) и быстро (15 мин) простым иммунохроматографическом анализе, который можно проводить даже в полевых условиях. Достигнутый предел обнаружения находится на уровне 3×10^5 молекул ДНК в капле крови, что перспективно для разработки новых средств диагностики заболеваний. Информация об этих исследованиях опубликована в работе [15].

10. Создание стойкой алмазной и кремниевой оптики для мощных источников излучения терагерцевого (ТГц) диапазона

В ИОФ РАН разработаны гибкие и высокоэффективные методы прецизионного лазерного профилирования поверхности кремниевых пластин, а также последующей репликации созданного рельефа на поверхность поликристаллического алмаза в процессе CVD-синтеза. Данная технология была использована для создания кремниевых и алмазных фокусирующих элементов, дизайн которых был разработан в Самарском

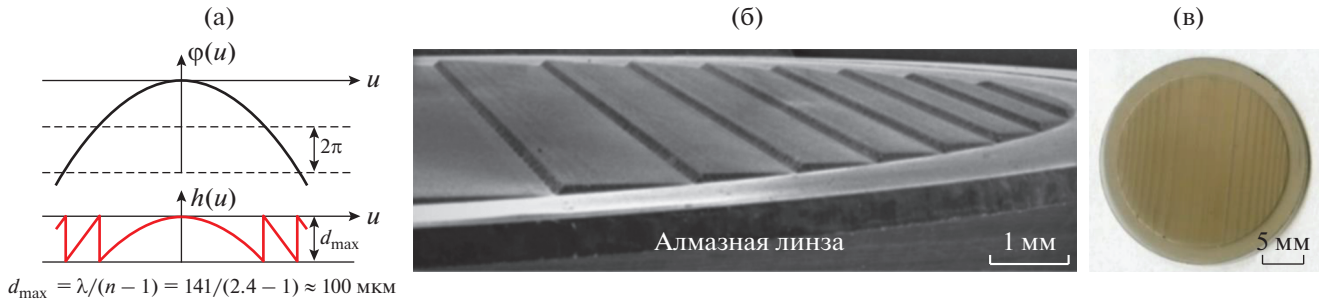


Рис. 13. а – Редуцированный профиль дифракционного элемента (внизу) эквивалентен профилю поверхности традиционной преломляющей линзы (вверху); б – поверхность алмазной цилиндрической дифракционной линзы (длина волны – 141 мкм); в – общий вид алмазной линзы.

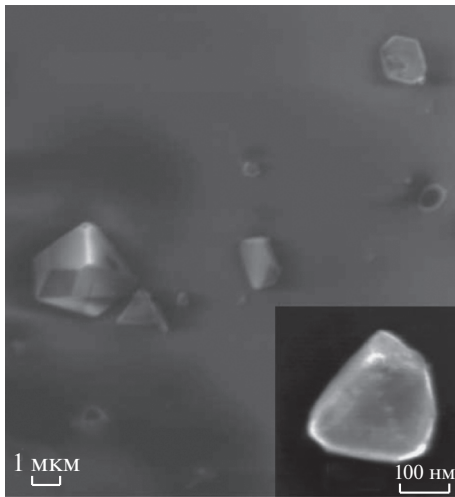


Рис. 14. Изображение алмазных кристаллитов, синтезированных из адамантана, в растровом электронном микроскопе.

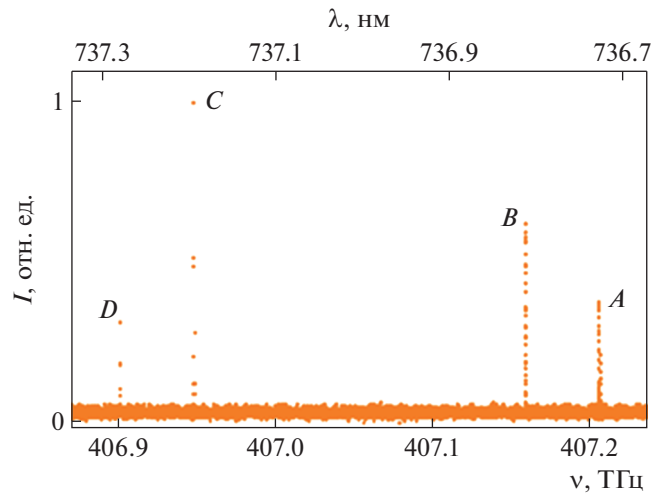


Рис. 15. Спектр резонансного возбуждения SiV-люминесцирующей алмазной частицы размером около 200 нм при температуре 2.3 К.

университете (рис. 13). Тестирование инновационной оптики, проведенное в Институте ядерной физики им Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, на самом мощном в мире источнике ТГц-излучения, подтвердило низкие потери и высокую эффективность фокусировки, близкую к 100%. Результаты этих исследований были опубликованы в работах [16, 17].

11. Обнаружение рекордно узких линий люминесценции одиночных центров “кремний-вакансия” (SiV) в наноалмазах, синтезированных из адамантана

В результате исследований, проведенных совместно учеными ИОФ РАН, ИФВД РАН, ФТИ Иоффе и Института науки о свете Макса Планка (Германия), опубликованных в работе [18], установлено, что наноалмазы, синтезированные из адамантана (рис. 14), демонстрируют самую узкую ширину линии SiV-центров при криогенных

температурах. Оказалось, что ширина одиночной линии люминесценции имеет рекордно малое значение 94 МГц, т.е. определяется исключительно временем жизни возбужденного состояния SiV-центра (рис. 15). Это ставит “адамантановые” наноалмазы в ряд наиболее перспективных материалов для квантовых нанотехнологий.

12. Ультравысокотемпературные оксид-молибденовые композиты

Коллектив Института физики твердого тела Российской академии наук разработал структуру оксид-молибденовых композитов (рис. 16) для применения в авиационных двигателях с целью сокращения расхода топлива и существенного сокращения вредных выбросов в атмосферу. Эффект достигается за счет повышения рабочей температуры лопатки турбины с рабочей температурой свыше 1300°C.

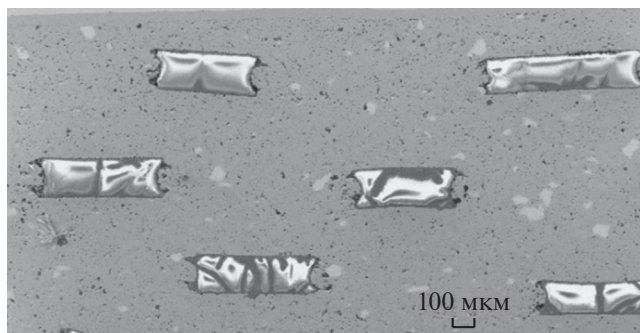


Рис. 16. Вариант структуры оксид-молибденового композита.

Создан задел для разработки промышленной технологии композитов. Более детальную информацию о выполненных исследованиях можно найти в работе [19].

НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.3. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Первые кандидаты на события от астрофизических нейтрино высоких энергий на глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD

Введен в эксплуатацию Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD в составе восьми кластеров (2304 оптических модулей), ставший крупнейшим нейтринным телескопом Северного полушария (рис. 17). При анализе ранее полученных данных выделены первые 10 кандидатов на события, инициированные нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Детектор Baikal-GVD включен в международные системы многоканальных оповещений, с целью поиска и последующего изучения транзи-



Рис. 17. Байкал, 13 марта 2021 г. Торжественный запуск крупнейшего в Северном полушарии глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.

ентных астрофизических источников методами многоволновой и многоканальной астрономии. Получены первые результаты поиска событий от нейтрино на детекторе Baikal-GVD, ассоциированных с оповещениями антарктического детектора IceCube (рис. 18). Проект реализуется широкой коллаборацией, включающей, в частности, ИЯИ РАН и ОИЯИ. С этими результатами можно ознакомиться в [20, 21].

НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.4. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

1. Протонный инжектор нового поколения для современных ускорительных источников нейтронов

В ИПФ РАН разработан и успешно испытан уникальный источник протонных (и дейтронных) пучков непрерывного действия GISMO

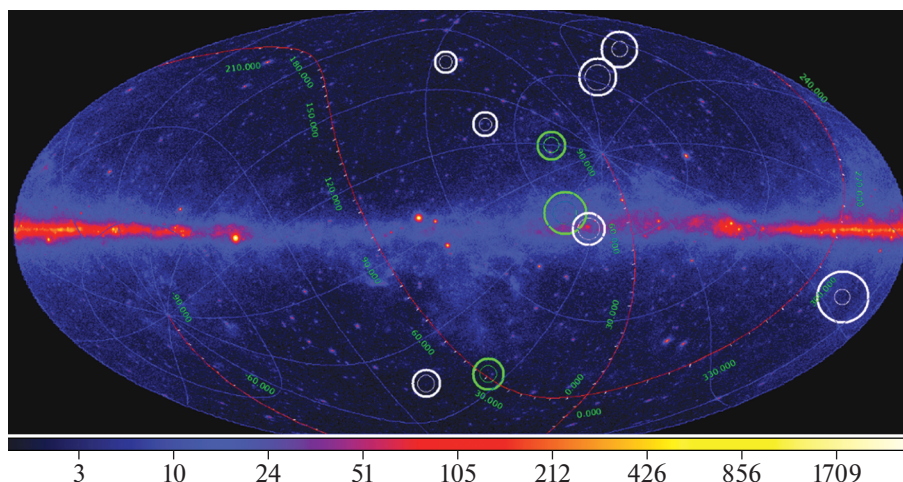


Рис. 18. Положение гамма-источников и первых десяти кандидатов на астрофизические нейтринные события Baikal-GVD на небесной сфере. Координатная сетка на рисунке соответствует экваториальной системе координат. Внутренняя и внешняя окружности вокруг событий соответствуют вероятности регистрации 50 и 90%.

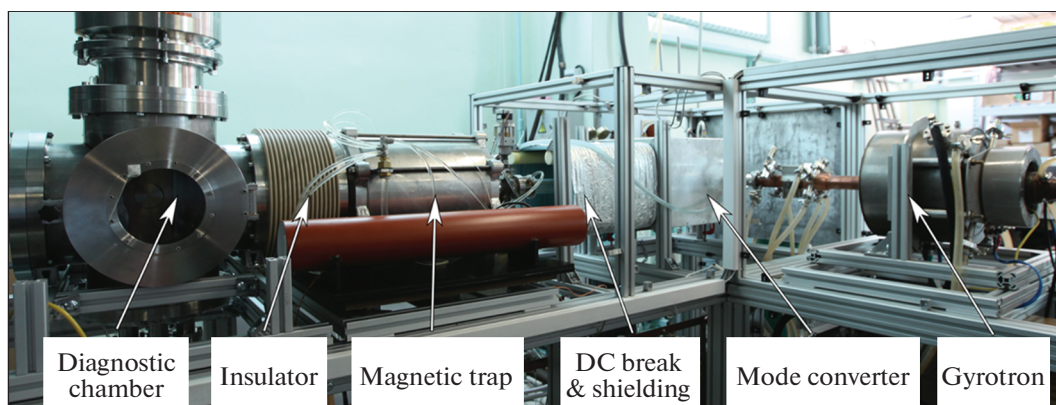


Рис. 19. Фотография протонного инжектора GISMO.

(рис. 19). Основой источника служит разряд, поддерживаемый в магнитной ловушке микроволновым излучением гиротрона (частота 28 ГГц, мощность до 10 кВт) в условиях электронно-циклотронного резонанса, что обеспечивает рекордно высокий для ЭЦР ионных источников удельный энерговклад (до 200 Вт/см³) и позволяет создавать плазму с плотностью до 10¹³ см⁻³. Получены потоки плазмы из ловушки с плотностью до 1.5 А/см² [22].

Созданный ионный источник не имеет аналогов по качеству и составу генерируемых пучков, что открывает новые перспективы для создания уникальных нейтронных источников разного масштаба, от мощных компактных D-D нейтронных генераторов до самых мощных источников испарительного типа (spallation sources).

2. Термоизоляция плазмы сферического токамака Глобус-М2 в условиях сильного магнитного поля

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе на сферическом токамаке Глобус-М2 были проведены эксперименты по нагреву плазмы с помощью инъекции нейтрального пучка. Выполнены систематические исследования термоизоляции плазмы в условиях сильного (для сферических токамаков) тороидального магнитного поля установки $B_T = 0.8$ Тл. Эксперименты позволили расширить международную базу данных и предложить параметрическую зависимость для описания и предсказания времени τ_E в сферическом токамаке [23–25].

3. Инжекторы сфокусированных пучков быстрых атомов повышенной энергии для нагрева плазмы

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработана серия инжекторов сфокусированных пучков быстрых атомов водорода и дейтерия повышенной энергии для нагрева плазмы в установках с магнитным удержанием. Мощность нейтрального пучка достигает 1 МВт, энер-

гия быстрых атомов составляет 50–80 кэВ, длительность импульса – до 2 с.

Сформированные ионные пучки имеют малую интегральную угловую расходимость на уровне 11–17 мрад, в результате чего сфокусированные пучки быстрых атомов могут свободно проходить через узкие входные порты существующих термоядерных установок.

Инжекторы успешно используются на токамаках TCV (Лозанна), Compass-U (Прага) и ST-40 (Оксфорд) для нагрева плазмы и экспериментов по удержанию быстрых ионов (рис. 20) [26, 27].

4. В экспериментах на установке СМОЛА доказана эффективность нового метода удержания термоядерной плазмы в винтовом магнитном поле. Достигнуто подавление продольного потока в соответствии с теоретическими предсказаниями, эффективное пробочное отношение превысило 10

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН исследуется удержание термоядерной плазмы в осесимметричном магнитном поле. Важной задачей является снижение потерь частиц и энергии вдоль силовых линий. На установке СМОЛА исследуется винтовое удержание – новый метод подавления продольных потерь плазмы (рис. 21). Концепция основана на передаче импульса захваченным ионам при вращении плазмы в винтовом магнитном поле. В экспериментах 2021 г. при высокой скорости вращения и глубине гофрировки достигнуто значительное подавление продольного потока плазмы, истекающего из области с винтовым полем [28–31].

5. Произведен физический запуск многопробочной ловушки ГОЛ-NB в полной проектной конфигурации

В ИЯФ СО РАН достигнуты проектные технические параметры многопробочной ловушки для

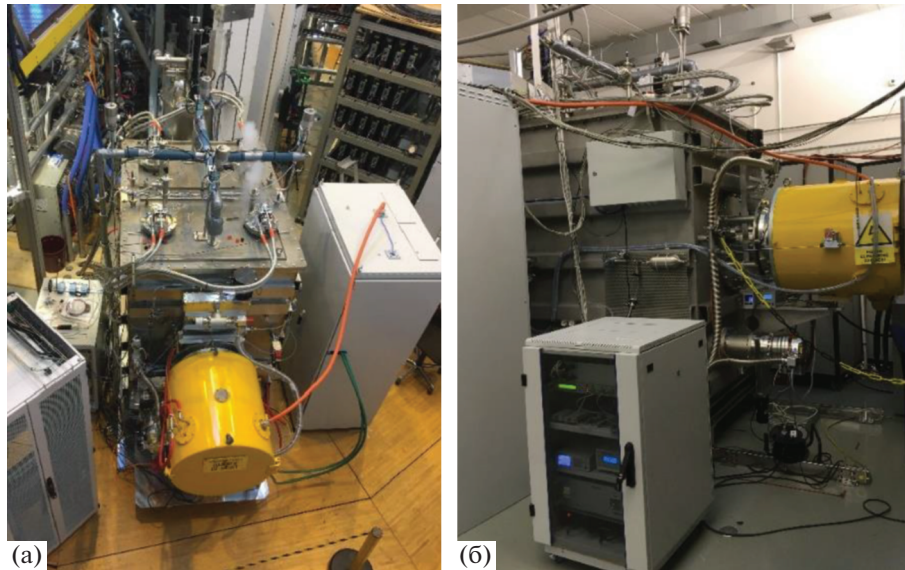


Рис. 20. Фотографии инжекторов на токамаках TCV (а) и Compass-U (б).

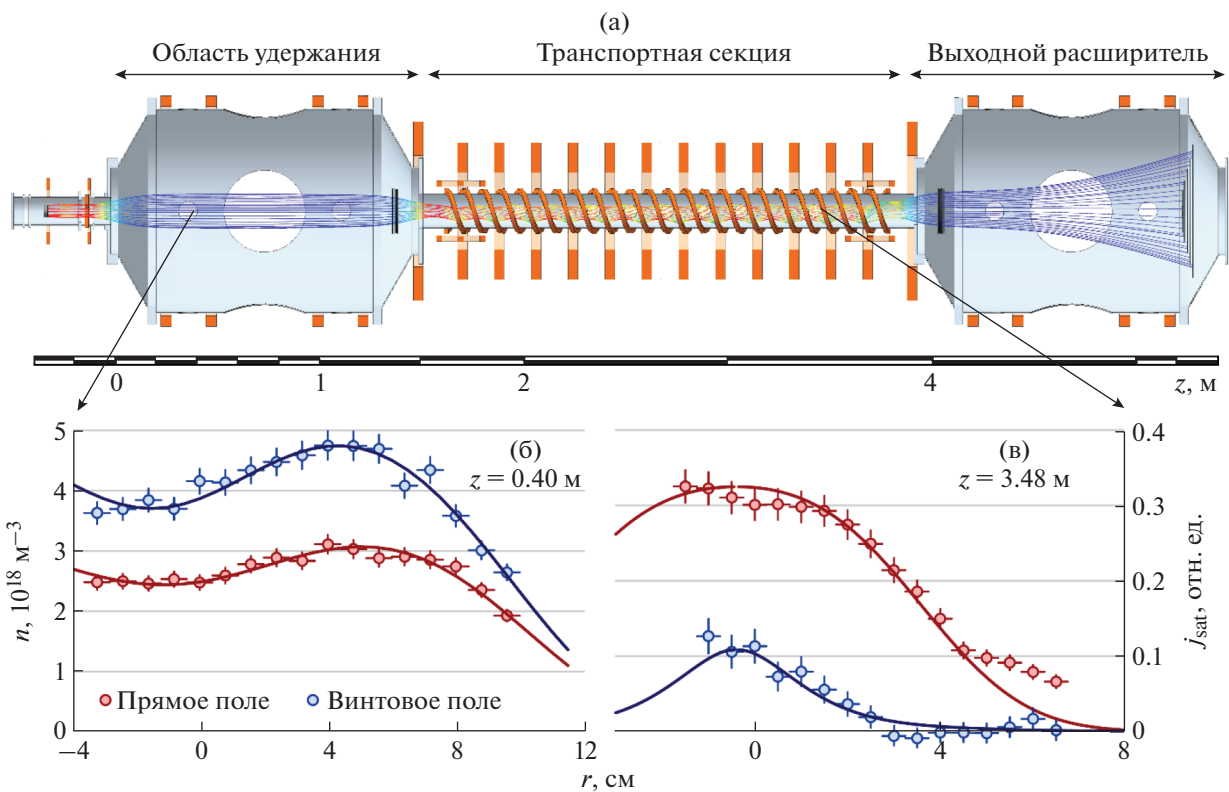


Рис. 21. а – Установка СМОЛА; б – радиальное распределение плотности плазмы в области удержания; в – радиальное распределение плотности потока плазмы, истекающей из транспортной секции с винтовым полем. Точки – экспериментальные данные, сплошные линии – теоретический расчет. Видно накопление плазмы в области удержания и подавление потока плазмы в транспортной секции.

удержания высокотемпературной плазмы ГОЛ-NB (рис. 22), которая в настоящее время является единственной установкой такого типа. Начаты регулярные эксперименты по программе исслед-

дования физики нагрева и удержания плазмы в многопробочной магнитной ловушке. На первом этапе работ получено устойчивое заполнение центральной ловушки ГОЛ-NB низкотемпера-

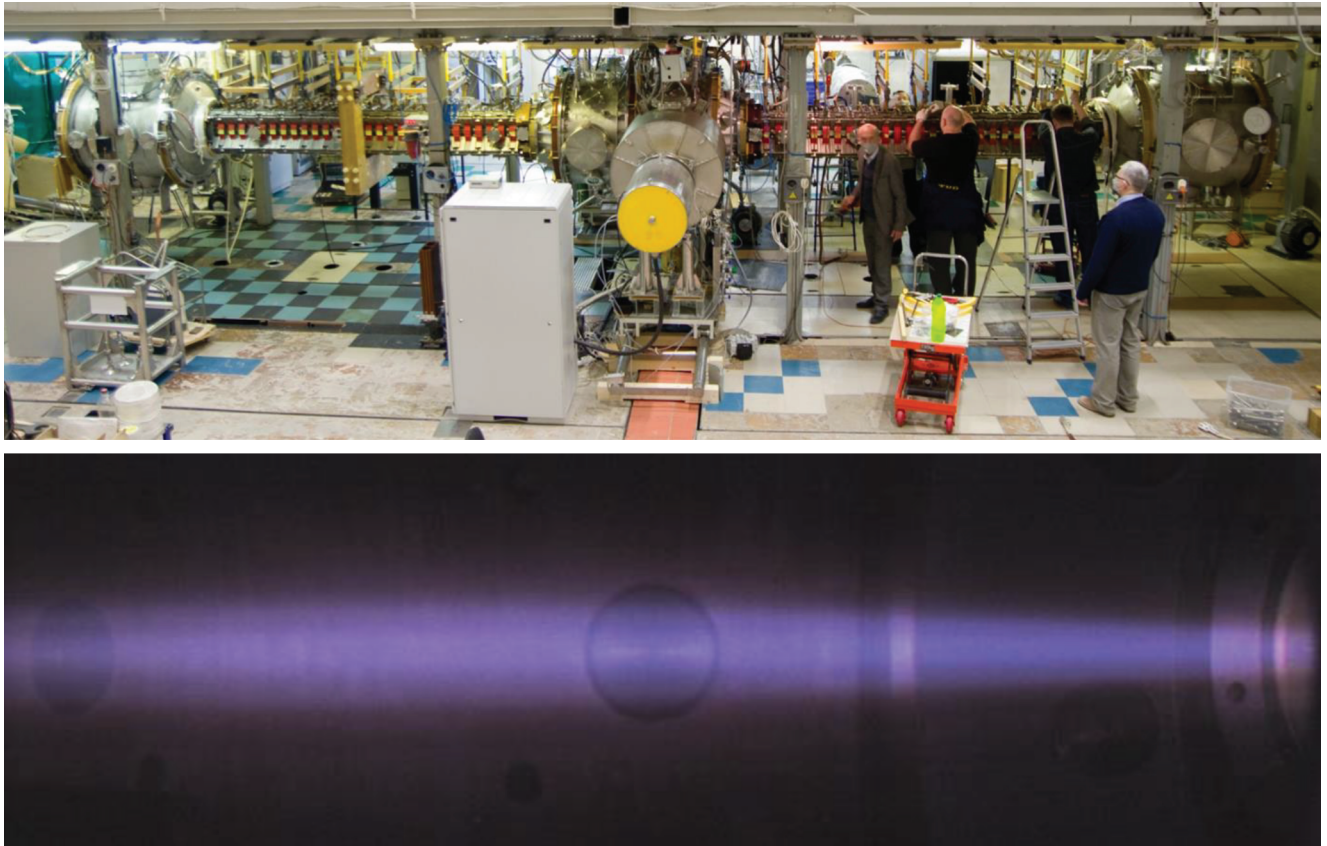


Рис. 22. Общий вид многопробочной ловушки ГОЛ-НВ во время монтажа (вверху) и фотография свечения низкотемпературной стартовой водородной плазмы в центральной ловушке ГОЛ-НВ (внизу).

турной стартовой плазмой, которая будет впоследствии нагреваться методом инъекции пучков ускоренных атомов водорода с энергией 25 кэВ [32–34].

6. Экспериментально исследована динамика деформации пластин из вольфрама при воздействии на них мощных термических ударов, ожидаемых в диверторе ИТЭР

В ИЯФ СО РАН на установке БЕТА исследована динамика деформаций поверхности вольфрама во время мощных импульсных тепловых нагрузок с интенсивностью ниже порога плавления, характерных для дивертора экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (рис. 23). Эти данные вместе с одновременно измеренной динамикой температуры и пространственным профилем нагрева будут служить экспериментальной основой для численного расчета остаточных механических напряжений в образце. Подробнее с результатами можно ознакомиться в работе [35].

НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.5. ОПТИКА И ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

1. Новые твердотельные лазерные активные материалы для объемных и волоконных источников когерентного излучения среднего инфракрасного диапазона на основе активированных редкоземельными ионами халькогенидных стекол

В ИОФ РАН совместно с учеными из ИХВВ РАН созданы активированные редкоземельными ионами лазерные халькогенидные стекла для объемных и волоконных лазеров среднего ИК-диапазона. На образцах стекол с Tb^{3+} , Pr^{3+} , Ce^{3+} получена лазерная генерация в спектральном диапазоне 4.5–6 мкм (рис. 24). В совместных экспериментах с учеными из ФИАН на ионах церия достигнуты практически значимые выходные характеристики (до 35 мДж в импульсе), а также реализована перестройка длины волны излучения в диапазоне 4.5–5.6 мкм (рис. 25). Таким образом, в значительной степени решена проблема низкого квантового выхода люминесценции в материалах для твердотельных и волоконных лазеров среднего ИК-диапазона. Результаты опубликованы в [36–39].

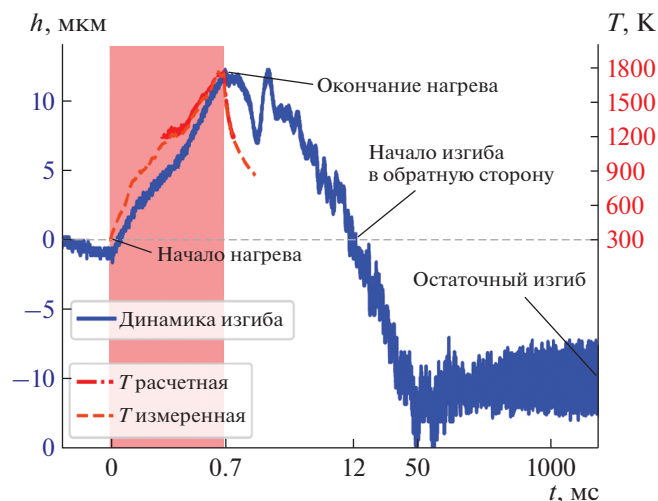


Рис. 23. Показана динамика деформации (величина стрелки прогиба) пластины из вольфрама толщиной 4 мм во время и после нагрева ее поверхности до температуры 1755 К за время 0.7 мс. Величина деформации позволяет дистанционно определить уровень механических напряжений, которые являются причиной растрескивания материала.

2. Эффективный широкополосный волоконно-оптический усилитель для спектрального диапазона 1.3–1.46 мкм

По результатам совместной работы ученых ИОФ РАН и ИХВВ РАН [40–42] предложена концепция плавного управления оптическими свойствами висмутовых волоконных световодов (ВС) с использованием W-структуры профиля показателя преломления (рис. 26а, сердцевина ВС окружена стеклом с более низким показателем преломления, чем у кварцевого стекла), что позволило реализовать серию активных ВС с оптимальными параметрами. На основе данного ВС разработан и реализован эффективный широкополосный усилитель, пригодный для высокоскоростных оптоволоконных систем связи в области длин волн 1.3–1.46 мкм. Накачка мощностью всего 255 мВт на длине волны 1256 нм позволила получить плоский спектр усиления шириной 116 нм по уровню –3 дБ от максимума в 27 дБ, что является рекордом (рис. 26б).

3. Широкополосные (100 кГц – 100 МГц) ультразвуковые антенны предельной числовой апертуры (NA = 1) для сканирующей оптоакустической ангиографии in vivo

В ИПФ РАН разработаны ультразвуковые пьезополимерные антенны для сканирующей оптоакустической (ОА) ангиографии, обладающие рекордными частотно-геометрическими характеристиками:

- угловым покрытием в 180 градусов;

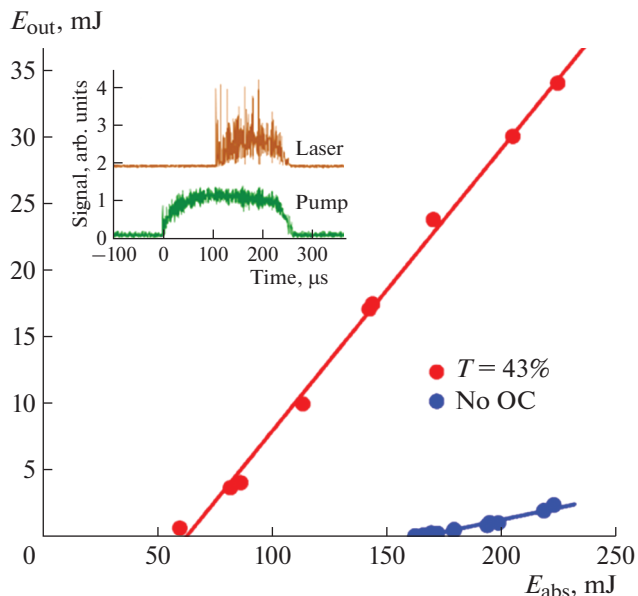


Рис. 24. Выходная энергия лазера на халькогенидном стекле с ионами Ce^{3+} . На вставке представлены осциллограммы импульсов накачки и генерации [37].

- приемной полосой частот 0.1–100 МГц.

Антенны впервые позволили визуализировать кровеносные сосуды произвольной пространственной ориентации в диапазоне размеров 30–500 мкм на глубинах до 7 мм (рис. 27, 28). В отличие от других оптических методов, оказалось возможным визуализировать мелкие сосуды, имеющие разную пространственную ориентацию [43–45].

4. Новый метод биомедицинской диагностики – компрессионная оптическая когерентная эластография

Коллективом, включающим ученых из ИПФ РАН, ПИМУ и ФНИЦ “Кристаллография и фо-

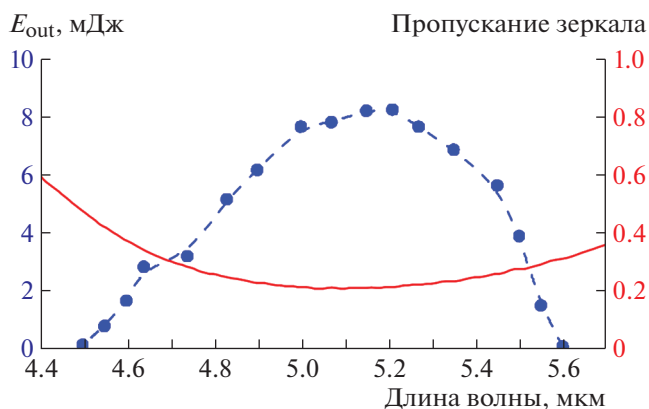


Рис. 25. Перестроечная кривая лазера на халькогенидном стекле с ионами Ce^{3+} [37].

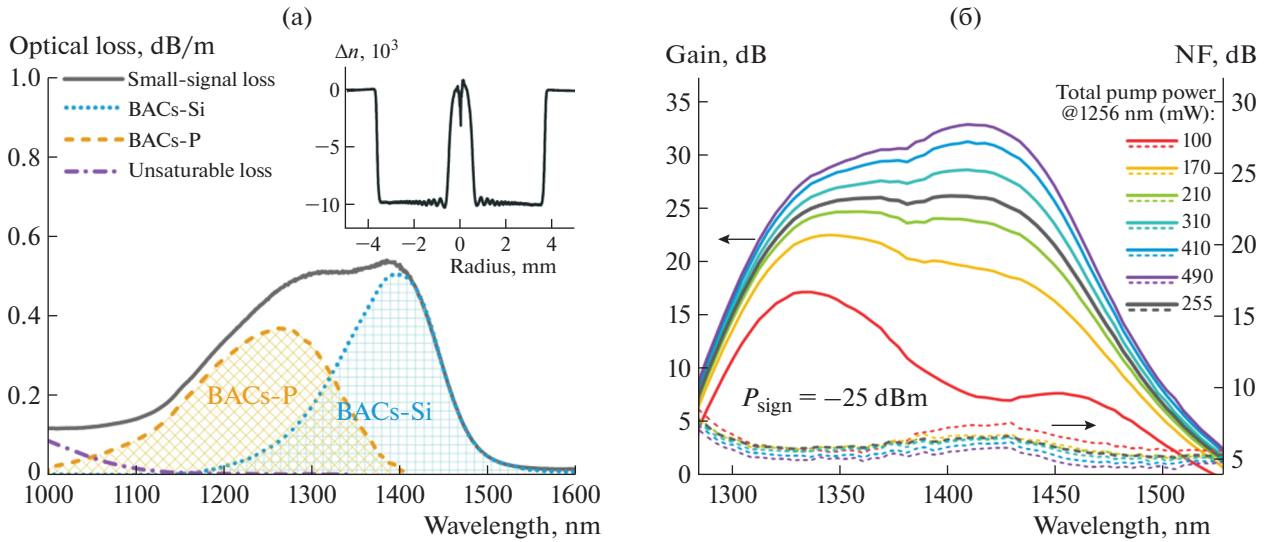


Рис. 26. а – Спектр поглощения висмутового ВС с W-профилем и вклад различных типов ВАЦ в поглощение (во врезке – профиль разницы показателей преломления сердцевинки и SiO₂-оболочки) [42]; б – спектры усиления и шум-фактор усилителя такого световода.

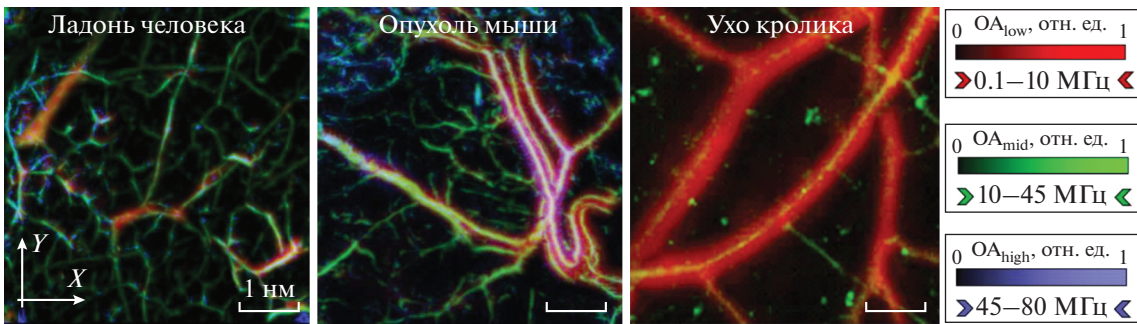


Рис. 27. Широкополосная ультразвуковая антенна обеспечивает разномасштабную ОА ангиографию.

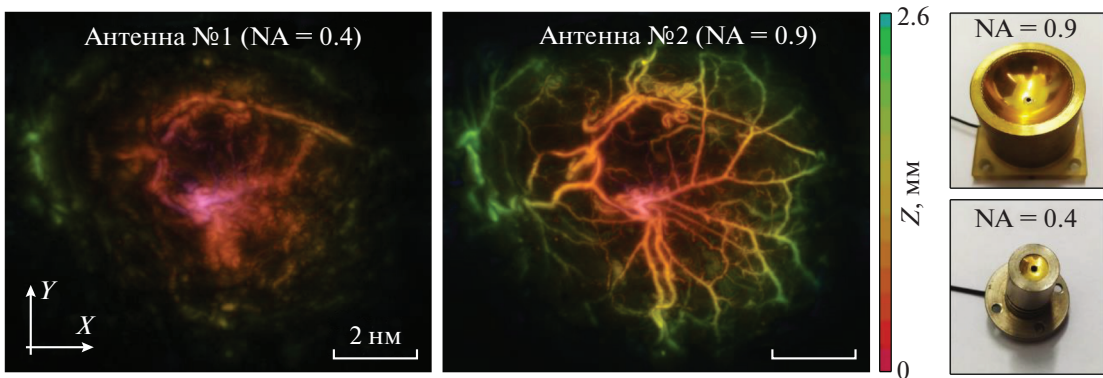


Рис. 28. Антенна высокой числовой апертуры визуализирует сосуды произвольной пространственной ориентации.

тоника” разработан и реализован в прототипе медицинского прибора новый метод биомедицинской диагностики – компрессионная Оптическая когерентная эластография. Метод визуализирует локальные деформации различной природы (тер-

момеханические, осмотические и т.п.), позволяет контролировать чистоту границы резекции на свежих образцах рака груди и выполнять экспресс-оценку его подтипа/агрессивности по спектру упругих свойств ткани (рис. 29). Развитый

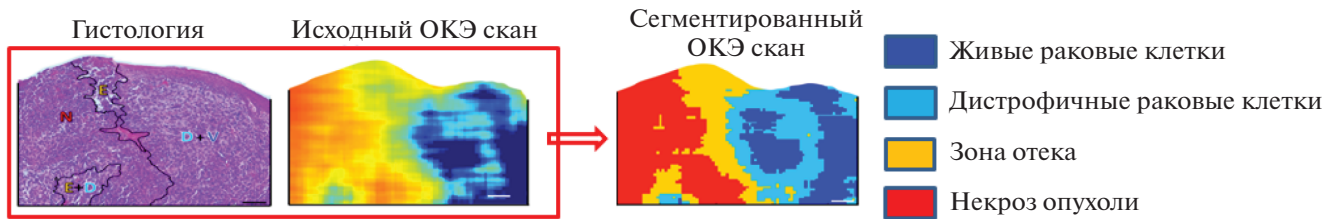


Рис. 29.

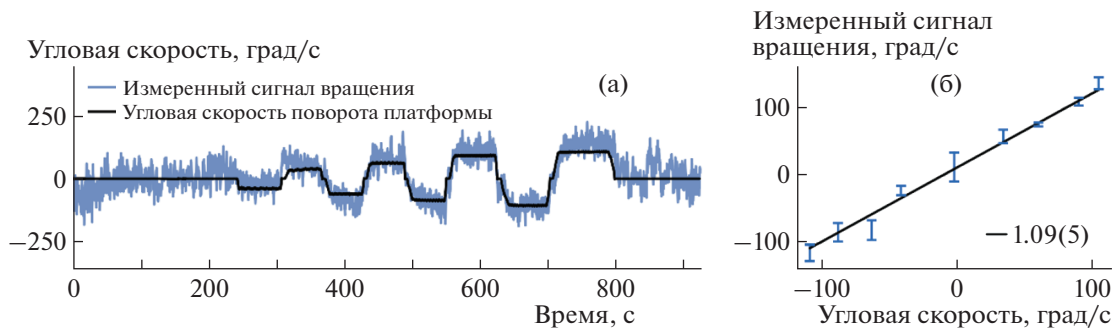


Рис. 30. Результаты измерения угловой скорости вращения платформы с помощью ядерных спинов центров окраски азот-вакансия (а); оценка масштабного коэффициента установки (б).

ОКЭ метод не имеет аналогов в мире и открывает недоступные ранее перспективы для решения широкого круга медицинских задач высокой социальной значимости (в онкологии, офтальмологии, регенеративной медицине и др.) Результаты работы опубликованы в ряде статей [46–51], получен патент [52].

5. Измерение угловой скорости вращения с помощью ансамбля ядерных спинов в решетке алмаза

В ФИАН и ООО “Сенсор Спин Техноложис”, в сотрудничестве с учеными США, было продемонстрировано измерение угловой скорости вращения лабораторной установки с помощью ансамбля ядерных спинов в твердом теле (алмазе), ассоциированных с NV-центрами (рис. 30). Сигнал вращения получен из неинерциальной добавки к частоте прецессии ядерного спина азота ^{14}N . Изменение частоты прецессии ядерного спина в магнитном поле скомпенсировано по сигналу магнетометра, использующего тот же ансамбль NV-центров [53].

6. 10 фс, 1.5 ПВт лазер с нелинейной компрессией импульса

В ИПФ РАН реализован метод сжатия лазерного импульса до фемтосекундной длительности. Выходные импульсы лазера PEARL с энергией до 18 Дж и длительностью около 60–70 фс после фа-

зовой самомодуляции в кристалле KDP толщиной 4 мм или кварце толщиной 5 мм сжаты до 10–11 фс. При этом не обнаружено никаких повреждений на оптических элементах, что говорит о подавлении мелкомасштабной самофокусировки. Полученные результаты демонстрируют возможность дальнейшего масштабирования нелинейной компрессии в направлении мультитераваттной мощности в импульсах с длительностью, соизмеримой с периодом поля (рис. 31, 32) [54, 55].

7. Метод подавления вариаций теплового сдвига (BBR SHIFT) ниже 10^{-19} для ультрапрецизионных атомных часов без использования криогенной техники

Коллективом ИЛФ СО РАН, Новосибирского государственного университета, Новосибирского технического университета в сотрудничестве с учеными Германии разработан метод синтетической частоты для создания атомных часов с относительной погрешностью по тепловому сдвигу ниже 10^{-19} в обычных условиях окружающей среды. В качестве конкретного примера подробно исследован ион Yb^+ (рис. 33а), где используемые оптические часовые переходы являются электроквардрупольным ($S \rightarrow D$) и октупольным ($S \rightarrow F$). В этом случае вариация температуры на ± 7 К вблизи $T_0 = 300$ К приводит к неопределенности теплового сдвига менее чем 10^{-19} для синтетической частоты ν_{syn} (рис. 33б), что свидетельствует о возможности создания ультра-прецизионных

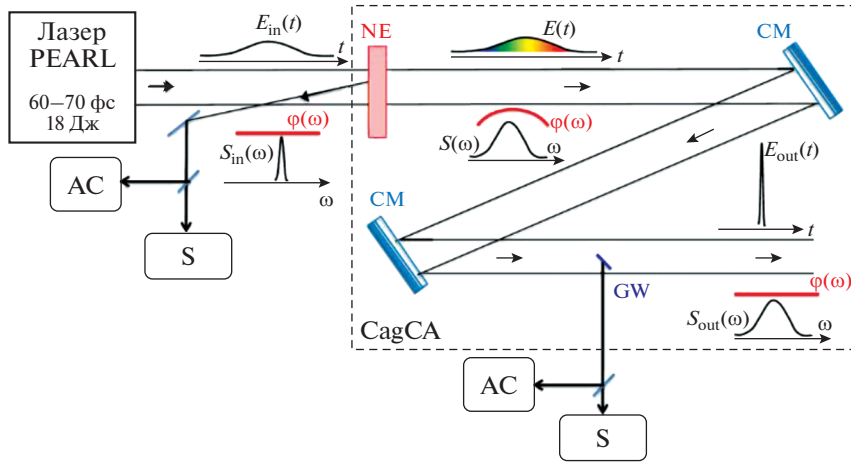


Рис. 31. Схема эксперимента. NE – пластина из KDP или кварца, CM – чирпирующие зеркала, GW – стеклянный клин, AC – автокорреляторы, S – спектрометры.

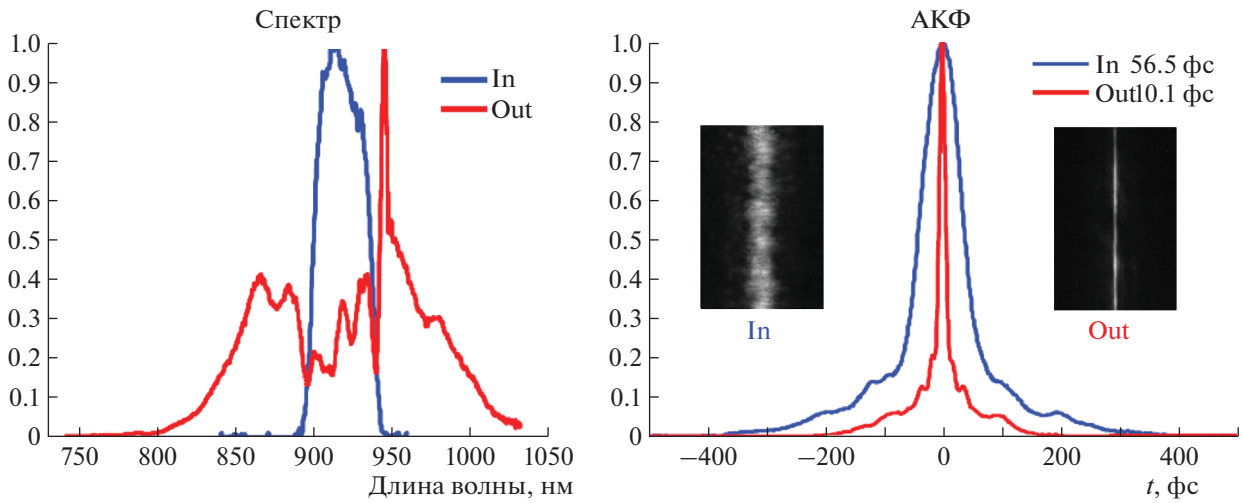


Рис. 32. Измеренные входные (синий) и выходные (красный) спектры и АКФ ($\tau_{in} = 57$ фс, $\tau_{out} = 10.1$ фс) [55].

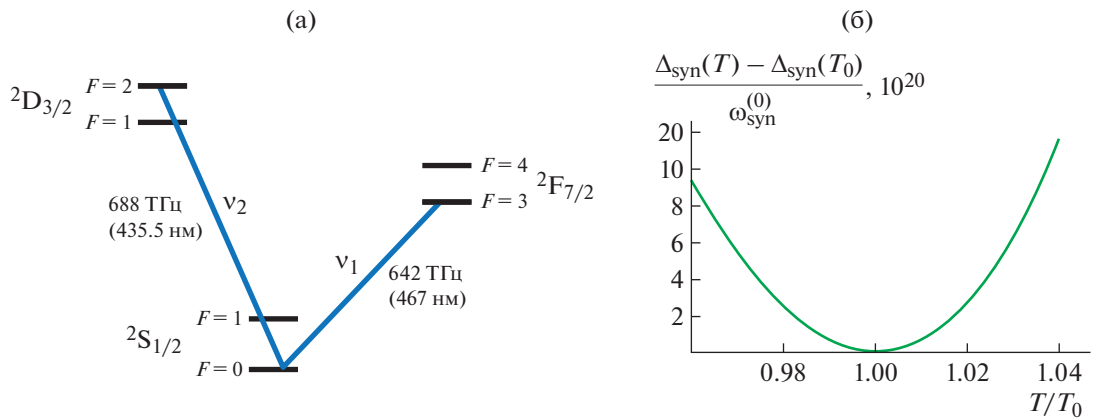


Рис. 33. а – Схема используемых часовых переходов в ионе Yb^+ для формирования синтетической частоты; б – относительная вариация теплового сдвига для синтетической частоты ν_{syn} (при $\epsilon = 0.136$ и $T_0 = 300$ К) в температурном интервале 300 ± 12 К [56].

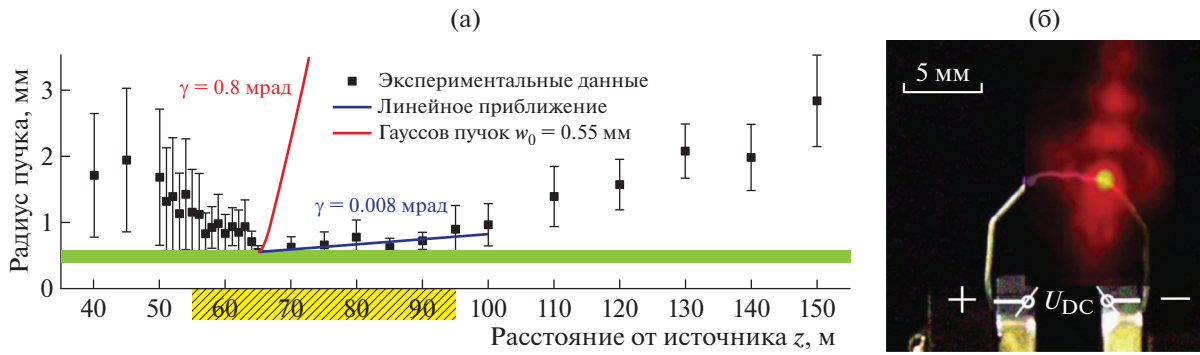


Рис. 34. а – Изменение радиуса пучка вдоль распространения (красная линия – радиус соответствующего гауссова пучка); б – фотография разряда.

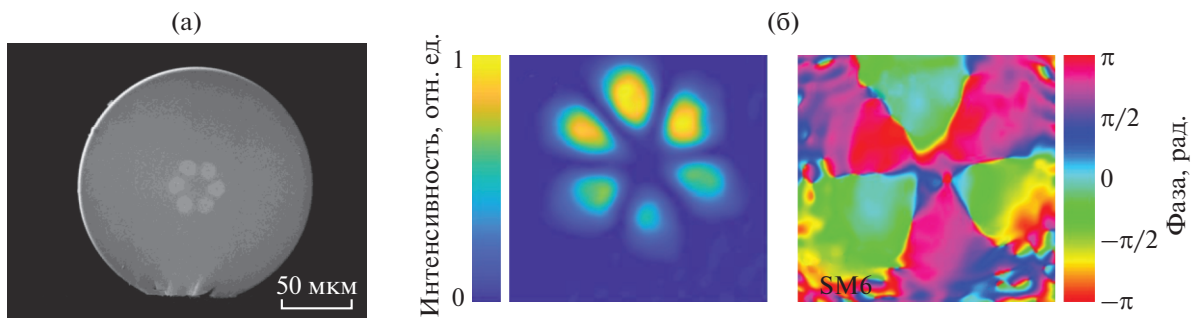


Рис. 35. Поперечное сечение изготовленного 6-сердцевинного иттербиевого активного световода (а), измеренное распределение интенсивности и фазы противофазной моды на выходе световода при пиковой мощности излучения 18 кВт (б).

комбинированных атомных часов (в том числе мобильных) без использования криогенных технологий [56].

8. Дистанционная (до 80 м) беспроводная помехозащищенная синхронизация электрического разряда с помощью фемтосекундного лазерного импульса

Учеными ФИАН в сотрудничестве с коллегами из МГУ было показано, что ультракоротким лазерным импульсом возможен дистанционный (до 80 м от лазерного источника) запуск высоковольтного разряда, который может использоваться для беспроводной помехозащищенной синхронизации устройств. Продемонстрировано, что этот запуск осуществляется благодаря многофотонному фотоэффекту (рис. 34) [57, 58].

9. Когерентное распространение и усиление оптических импульсов в многосердцевинных световодах

В результате коллективной работы сотрудников ИПФ РАН, ИОФ РАН и ИХВВ РАН [59–61] экспериментально показано, что в световоде с

6 взаимодействующими сердцевинами возможны распространение и усиление оптических импульсов, устойчивых к деформации структуры световода (рис. 35). При увеличении мощности вплоть до самофокусирующего предела в каждой из сердцевин происходит выравнивание интенсивностей в сердцевинах деформированного световода. Для световода с 24 сердцевинами, расположенными в вершинах семи шестиугольников, найдены устойчивые в нелинейном режиме противофазные моды, а также показана возможность распространения импульсов с солитонной временной формой и пространственной структурой в виде противофазной моды (рис. 36).

10. Мощные квантово-каскадные лазеры среднего инфракрасного диапазона

В Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук разработаны и исследованы мощные квантово-каскадные лазеры (ККЛ) для спектральных диапазонов 4.5 и 8 мкм, демонстрирующие лазерную генерацию при комнатной температуре (рис. 37). Максимальная продемонстрированная мощность 13 Вт на длине волны 8 мкм является рекордной для этого спек-

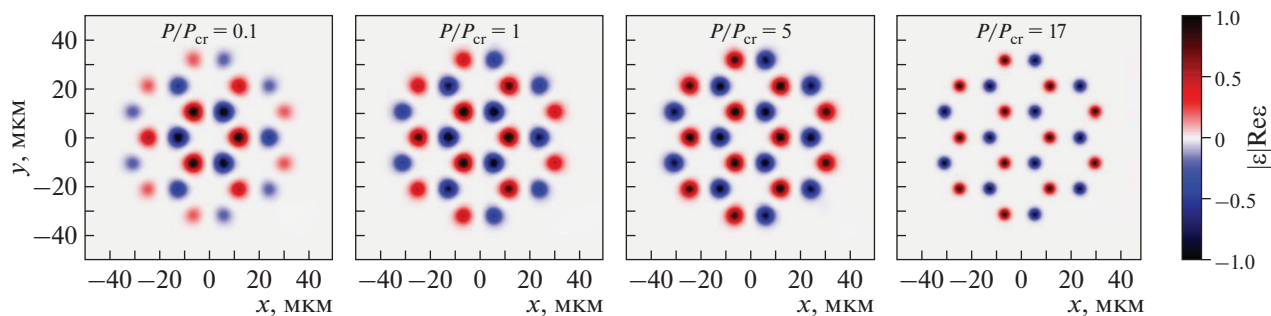


Рис. 36. Численное моделирование усиления противофазной супермоды в 24-сердцевинном световоде.

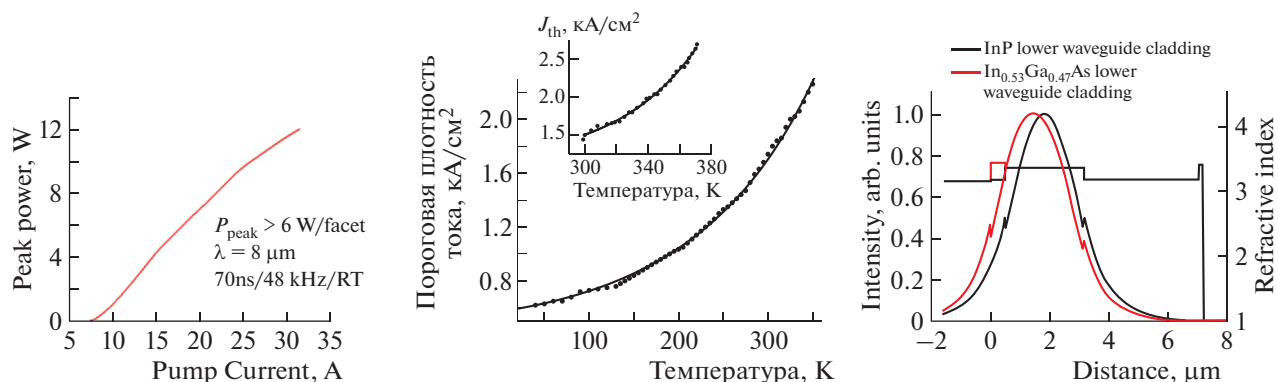


Рис. 37

трального диапазона. Эти результаты были опубликованы в серии работ в журнале “Квантовая электроника” [62–64].

11. Генерация терагерцового излучения в структуре диэлектрик – металл, облучаемой фемтосекундным лазерным импульсом

Учеными Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук показано, что эффективность генерации ТГц-излучения в скин-слое металла при воздействии короткого лазерного импульса значительно возрастает при нанесении на металлическую поверхность нанослоя широкозонного диэлектрика (рис. 38). Эффект обусловлен интерференцией падающей и отраженной высокочастотных волн в диэлектрике. С результатами этих исследований можно ознакомиться в статье [65].

12. Субпикосекундный газовый волоконный лазер среднего ИК-диапазона (920 фс, 10 мкДж, 2.68 мкм)

В результате совместной работы ученых ИОФ РАН и ИСАН создан субпикосекундный газовый волоконный лазер среднего ИК-диапазона. В качестве активной среды использовался револьвер-

ный волоконный световод, заполненный дейтерием. Реализовано эффективное двухкаскадное рамановское преобразование $1.03 \rightarrow 1.49 \rightarrow 2.68$ мкм при накачке чирпированными импульсами фемтосекундного иттербиевого лазера. Получена генерация на длине волны 2.68 мкм с энергией в импульсе ~ 10 мкДж, что существенно превосходит любые другие субпикосекундные волоконные лазеры среднего ИК-диапазона. Длительность выходных импульсов составила 920 фс, а квантовая эффективность преобразования до-

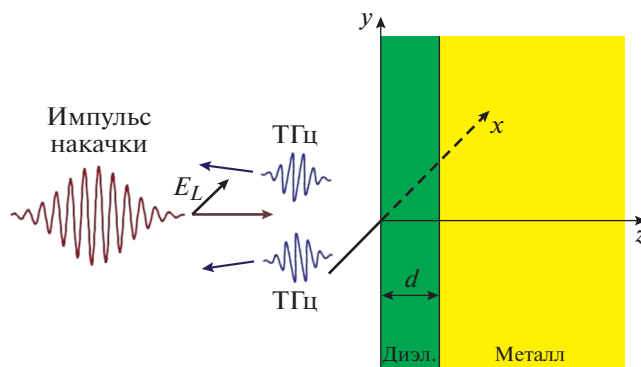


Рис. 38

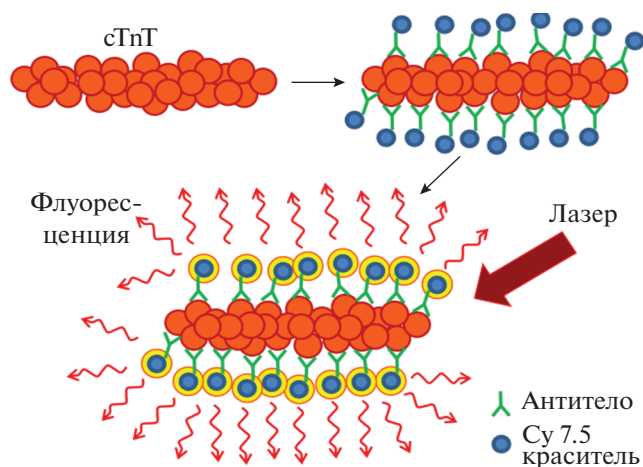


Рис. 39. Схема основной идеи подхода по визуализации молекул сердечного тропонина-Т.

стигла 28%. Полученные результаты открывают новые перспективы для разработки в среднем ИК-диапазоне лазерных источников различных типов, таких как частотные гребенки, источники суперконтинуума и источники ультракоротких импульсов длительностью в несколько периодов световой волны. Статья [66], где представлены результаты этих исследований, включена редактором журнала в категорию Spotlight on Optics, в которую из журналов, выпускаемых Optical Society of America, отбираются наиболее интересные результаты по оптике и фотонике, представляющие интерес для более широкой аудитории (<https://www.osapublishing.org/spotlight/about.cfm>) [67].

13. Сверхбыстрое и сверхчувствительное обнаружение и визуализация единичных молекул сердечного тропонина-Т

В результате исследований, выполненных учеными ИСАН, НИУ ВШЭ, ИБХ РАН, МФТИ и Техасского университета (США), обнаружены и визуализированы единичные молекулы сердечного тропонина-Т в сыворотке крови человека (рис. 39). Показано, что процесс обнаружения и визуализации осуществляется в реальном времени. Достигнута чувствительность измерения концентрации тропонина-Т с клинически важной чувствительностью около 1 пг/мл. Разработанный авторами подход можно использовать для сверхбыстрого и сверхчувствительного обнаружения, мониторинга и визуализации других биомолекул, а также более крупных объектов, включая патогенные вирусы и бактерии. Более детально с результатами этих исследований можно ознакомиться в работе [68].

14. Управление пространственной структурой оптических полей

В Институте оптики атмосферы им В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук разработан и экспериментально апробирован метод управления пространственной структурой синтезированных оптических полей на основе сложения излучения матрицы волоконных лазеров (рис. 40, 41). Основным преимуществом метода является возможность высокоскоростного управления свойствами синтезированного лазерного пучка. Использование оптоволоконных элементов позволяет управлять фазой и величиной ОУМ с частотой более 10^{10} Гц. При этом достигается высокая стабильность установления амплитуд и фаз излучения на волоконной матрице, и тем самым обеспечивается стабильность заданного распределения интенсивности в плоскости фокусировки. Результаты представлены в статье [69], получен патент на изобретение [70].

НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.6. РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

1. Короткоимпульсный плазменный мазер в режиме широкополосного усилителя шумов

Коллективом, объединяющим ученых ИЭФ УрО РАН, ФИАН, РУДН и ТРИНИТИ, разработан плазменный мазер, управляемый сильноточным электронным пучком длительностью 2 нс с энергией частиц ≈ 270 кэВ, импульсной мощностью ≈ 450 МВт и полной энергией ≈ 0.85 Дж. Перестраиваемые характеристики плазмы определяют спектральный диапазон мощных микроволн в диапазоне от 3 до 25 ГГц. Короткий импульс тока пучка обеспечил работу устройства в режиме однопроводного усиления шумов с энергоэффективностью $\approx 26\%$, средней СВЧ-мощностью за импульс тока пучка > 100 МВт и мгновенной (пиковой) мощностью до 430 ± 30 МВт (рис. 42, 43) [71].

2. Пикосекундная твердотельная импульсная система экстремально высокой мощности

В Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук осуществлена генерация сверхмощных пикосекундных импульсов. В коаксиальной линии сформированы импульсы длительностью ~ 100 пс. Реализованы рекордно высокие скорости нарастания выходного напряжения (26 МВ/нс) и тока (0.5 МА/нс). Для твердотельных импульсных систем получены рекордно высокие значения пиковой мощности (77 ГВт) и скорости ее нарастания (1.6 ТВт/нс) (рис. 44, 45). Детальная информация об этих исследованиях представлена в [72, 73].

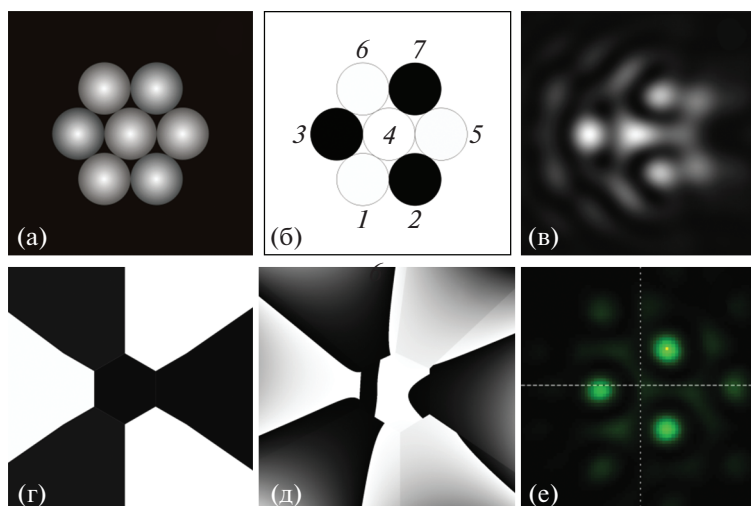


Рис. 40. Формирование распределения интенсивности в виде 3 пиков. Распределение интенсивности в начальной плоскости (а); распределение фазы в плоскости в градусах серого 0...255 соответствует изменению фазы от 0 до 2π (1 – 253, 2 – 12, 3 – 0, 4 – 255, 5 – 252, 6 – 253, 7 – 12) (б); расчетное распределение интенсивности в фокальной плоскости (в); фазовый экран в пространственном световом модуляторе (ПСМ) в соответствии с расчетом (г); фазовый экран на ПСМ с предкомпенсацией aberrации (д); сформированное распределение интенсивности (е).

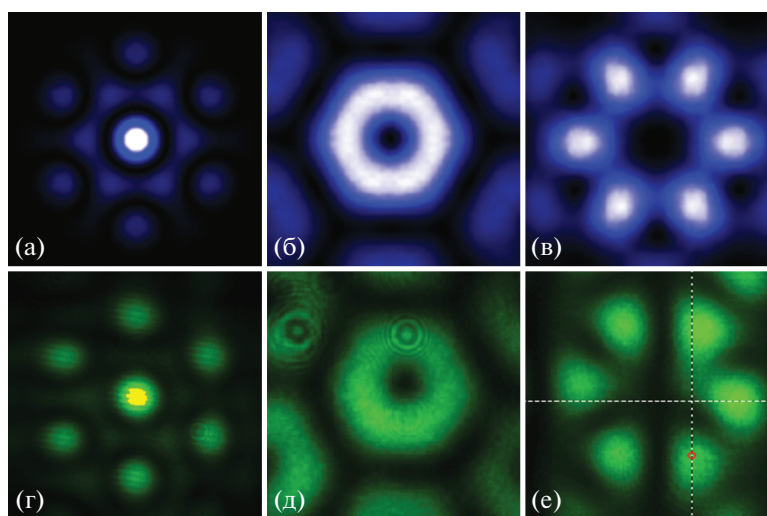


Рис. 41. Формирование вихревого пучка. Теория (а–в), эксперимент (г–е); ОУМ = ± 1 (б, д), ± 2 (в, е).

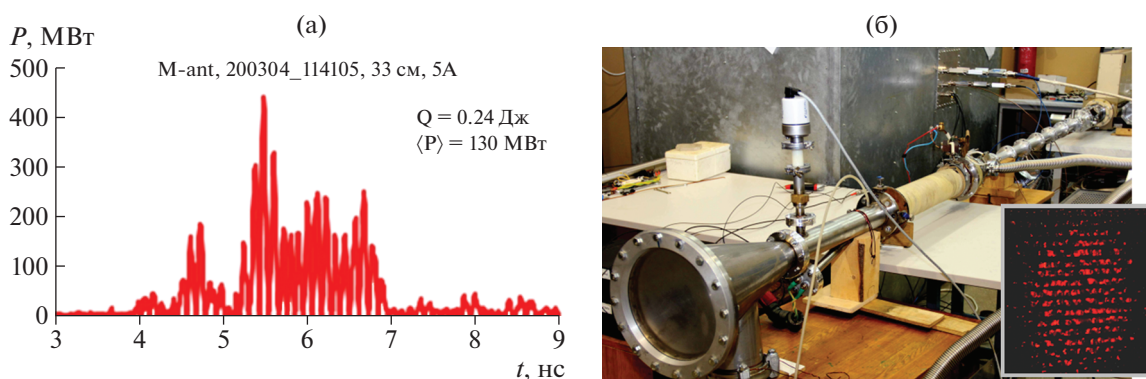


Рис. 42. СВЧ-импульс плазменного мазера (а); экспериментальная установка плазменного мазера и свечение матричного табло под воздействием импульса (б).

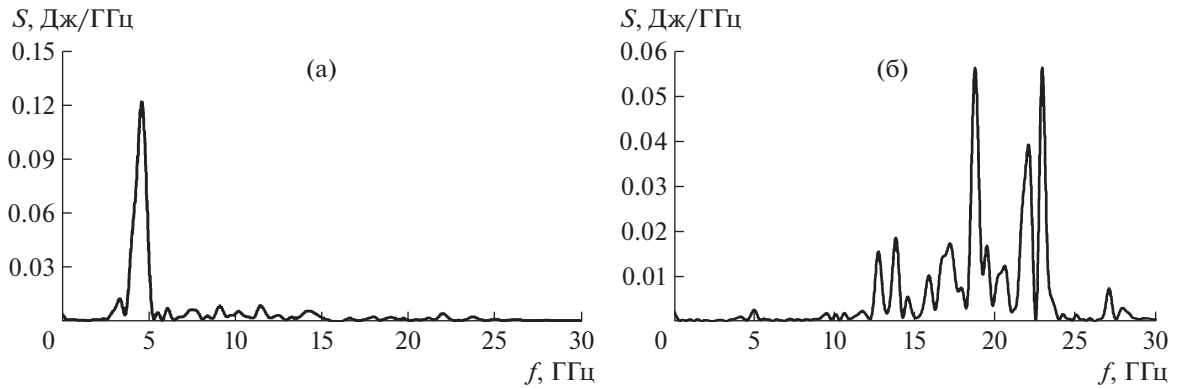


Рис. 43. Спектры СВЧ-излучения для различных концентраций плазмы: 2.5 отн. ед. (а) и 44 отн. ед. (б). Длина плазменно-пучкового взаимодействия 30 см.

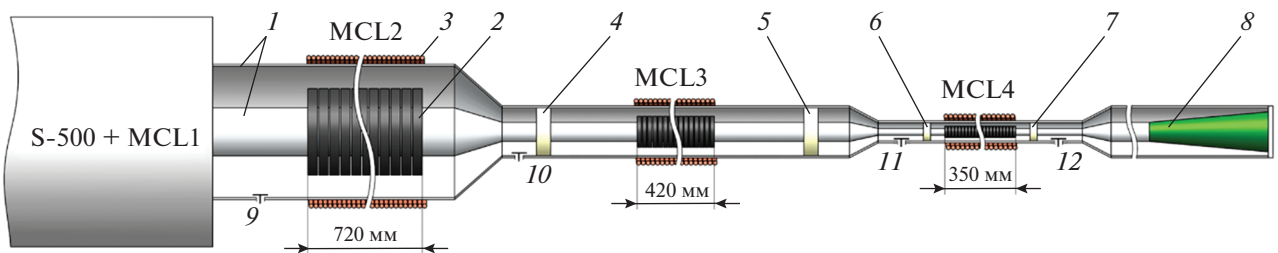


Рис. 44. Схема установки с линиями магнитной компрессии энергии: 1 – электроды линий, 2 – ферритовые кольца, 3 – внешний соленоид, 4–7 – изоляторы, 8 – нагрузка, 9–12 – емкостные делители напряжения.

3. Искусственное радиоосвещение на основе источников микроволнового динамического хаоса

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН динамический хаос был применен для освещения окружающего пространства в микроволновом диапазоне. Разработаны источники некогерентного сверхширокополосного микроволнового излучения – лампы радиосвета, основанные на генераторах динамического хаоса (рис. 46). Показано, что при помощи направленных антенн, подключенных к вышеупомянутым чувствительным элементам, можно создать приемники, обладающие пространственным разрешением для визуализации

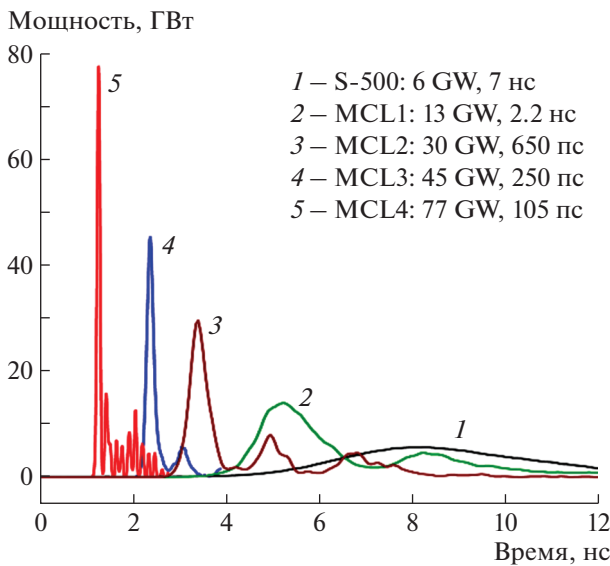


Рис. 45. Импульсы мощности в системе в процессе компрессии энергии: 1 – импульс SOS-генератора, 2 – импульс после линии MCL1, 3 – после линии MCL2, 4 – после линии MCL3 и 5 – после линии MCL4.

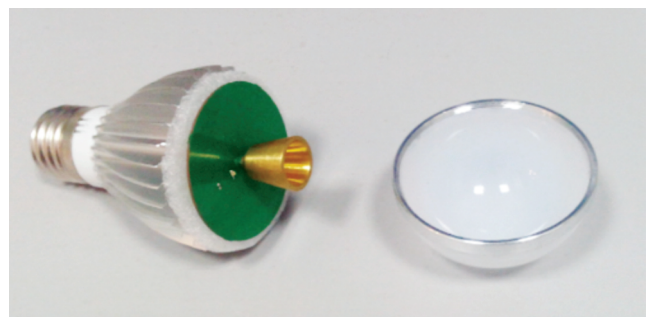


Рис. 46. Внешний вид лампы радиосвета.

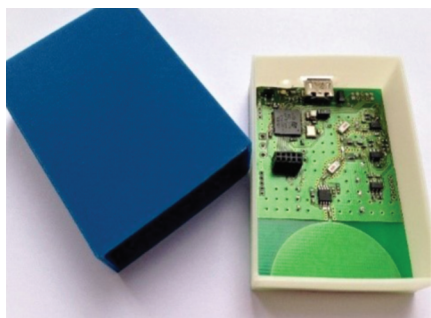


Рис. 47. Внешний вид чувствительного элемента приемника радиосвета.

части окружающего пространства, освещенного радиосветом (рис. 47). Получены изображения помещений в радиосвете (рис. 48) и некоторых отдельных объектов, расположенных в них. Показана возможность обнаружения изменений на этих изображениях, связанных с появлением новых объектов [74–81].

4. Разработана и апробирована технология подповерхностного радиолокационного зондирования с достижением впервые в мировой практике глубин свыше 500 метров

Коллективом, включающим представителей ИЗМИРАН, ООО “Таймер”, ООО “НОВАТЭК НТЦ”, ИОФ РАН и ПГИ разработана и апробирована технология подповерхностного радиолокационного зондирования, позволившая впервые в мировой практике достичь глубин свыше 500 м (рис. 49). Технология радиозондирования основана на использовании нестационарного характера возбуждения исследуемой среды полем высоковольтного широкополосного видеоимпульса с длительностью переднего фронта порядка наносекунды, сопоставляемого с характерными временами релаксации горных пород. Большая глубина зондирования обусловлена слабым затуханием сигнала из-за слабого взаимодействия с зарядами исследуемой среды и собственной интерференции сигнала, а также подбором оптимальной формы зондирующего импульса. Эффективность технологии подтверждена ре-

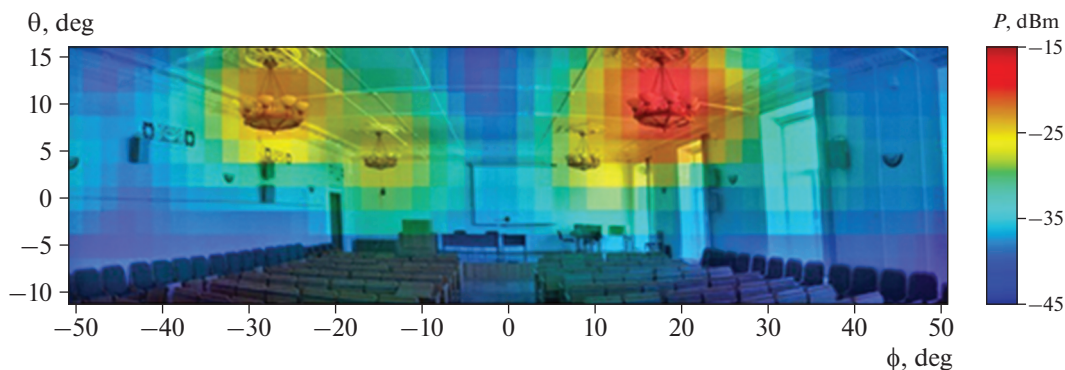


Рис. 48. Изображение конференц-зала, полученное в радиосвете, наложенное на изображение в видимом свете.

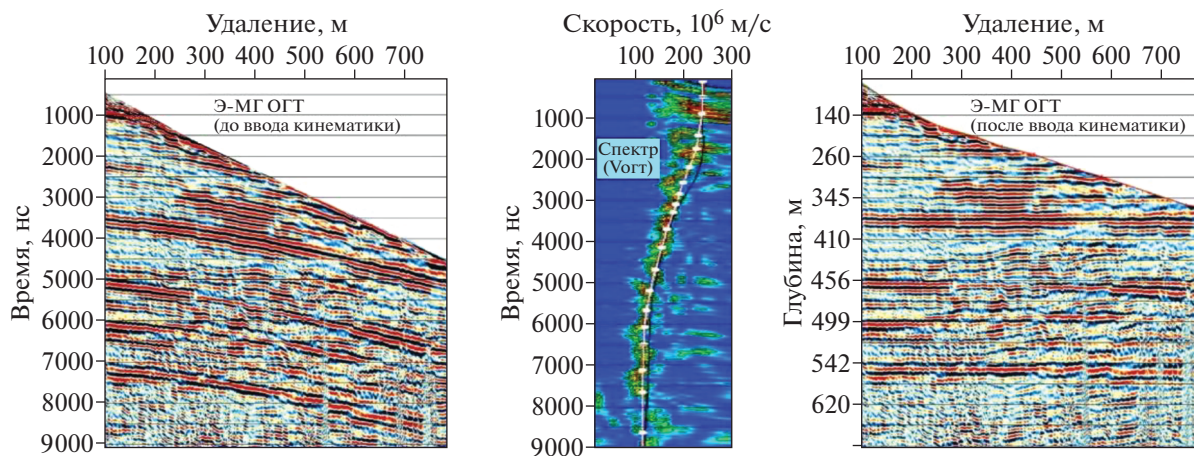


Рис. 49. Построение спектра скорости ЭМ-волн до 650 м.

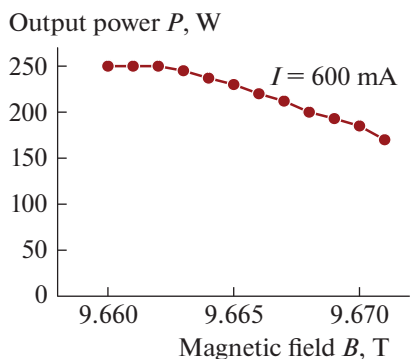


Рис. 50. Зависимость выходной мощности гиротрона от магнитного поля (тока соленоида) при токе электронного пучка и 600 мА и отверстие в куске гранита диаметром около 3 мм, полученное после фокусировки выходного излучения на поверхности образца детализированная.

зультатами бурения и сейсмической разведки. Технология существенно повышает эффективность геологоразведочных работ, включая поиск месторождений, нетрадиционных запасов углеводородов, газогидратов, трудно извлекаемых запасов и запасов небольших объемов [82–84].

5. Получение рекордной мощности на частоте 0.5 ТГц в непрерывном режиме генерации

В качестве магнитной системы был использован сверхпроводящий магнит JM10T100 с интенсивностью поля в 10 Тл и проходным отверстием 100 мм. Для вывода излучения из вакуумного объема гиротрона разработан квазиоптический преобразователь, трансформирующий рабочую моду в гауссов пучок. Эффективность преобразования рабочего типа колебаний в узконаправленный гауссов волновой пучок составляет около 90%. На второй циклотронной гармонике на частоте 526 ГГц получена мощность излучения 250 Вт в непрерывном режиме генерации с эффективностью 3%, что почти на порядок превосходит все известные мировые аналоги (рис. 50). Измеренная ширина линии спектра составляет 0.15–0.2 МГц. Работа выполнена в ИПФ РАН в рамках Комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года” [85].

**НАПРАВЛЕНИЕ 1.3.7.
АСТРОНОМИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

1. Новые результаты орбитальной обсерватории СРГ

Рентгеновские телескопы с оптикой косоугольного падения eROSITA и ART-XC им. М.Н. Павлинского российской орбитальной обсерватории Спектр-РГ (СРГ), успешный запуск которой состоялся в 2019 г., начиная с декабря 2019 г. прово-

дили обзор всего неба в рентгеновских лучах. К концу 2021 г. обсерватория завершила четыре полных обзора неба, выполнив половину обзорной программы. Это позволит существенно расширить каталог рентгеновских источников и изучить такие экстремальные астрофизические явления, как приливные разрушения звезд вблизи сверхмассивных черных дыр.

С помощью телескопа eROSITA проводился поиск редчайших объектов во Вселенной. Открыт квазар на красном смещении $z = 5.5$ и впервые зарегистрировано рентгеновское излучение от ранее известного квазара на $z = 6.2$. Эти объекты оказались самыми мощными в рентгене квазарами на $z > 5$ (рис. 51).

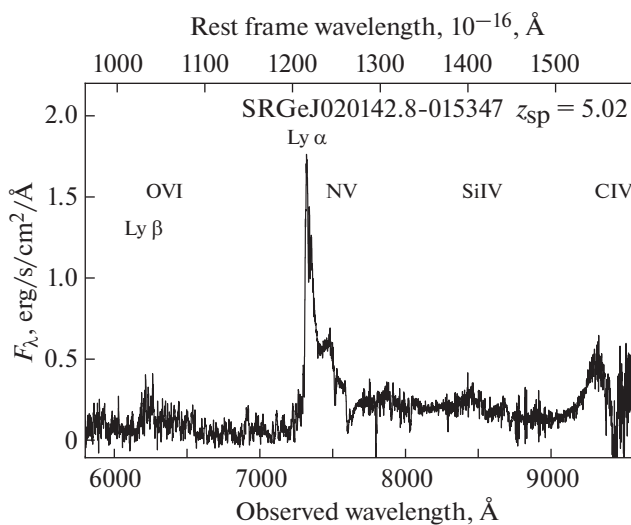


Рис. 51. Полученный на 6-метровом телескопе БТА (САО РАН) оптический спектр квазара на красном смещении $z = 5.02$, открытого в рентгене телескопом СРГ/eROSITA. На верхней шкале указаны длины волн в системе покоя квазара, а на нижней – в системе наблюдателя. Разница в длинах волн составляет $1 + z = 6$ раз.

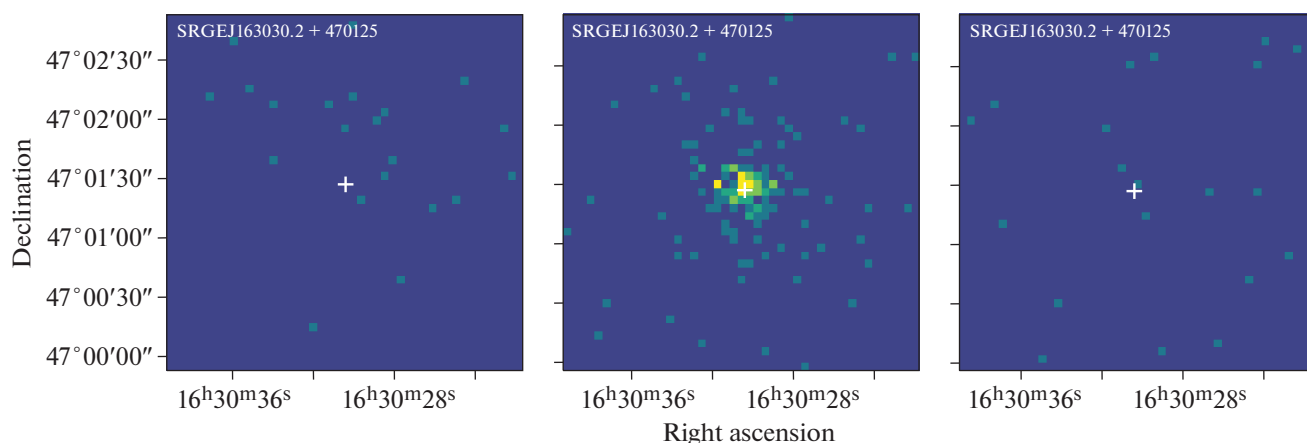


Рис. 52. Событие приливного разрушения звезды сверхмассивной черной дырой в галактике, расположенной на $z = 0.29$, открытое телескопом СРГ/eROSITA. Показаны три рентгеновские изображения, полученные с интервалами в полгода. Видно, что источник отсутствовал в первом скане неба, появился во втором и исчез в третьем (М.Р. Гильфанов, С.Ю. Сазонов, П.С. Медведев, А.В. Мещеряков, Г.А. Хорунжев, Р.А. Сюняев и др.). К оптическим наблюдениям этого и 50 других подобных событий были подключены лучшие российские телескопы и 10 м-телескоп обсерватории Кека на Гавайских островах.

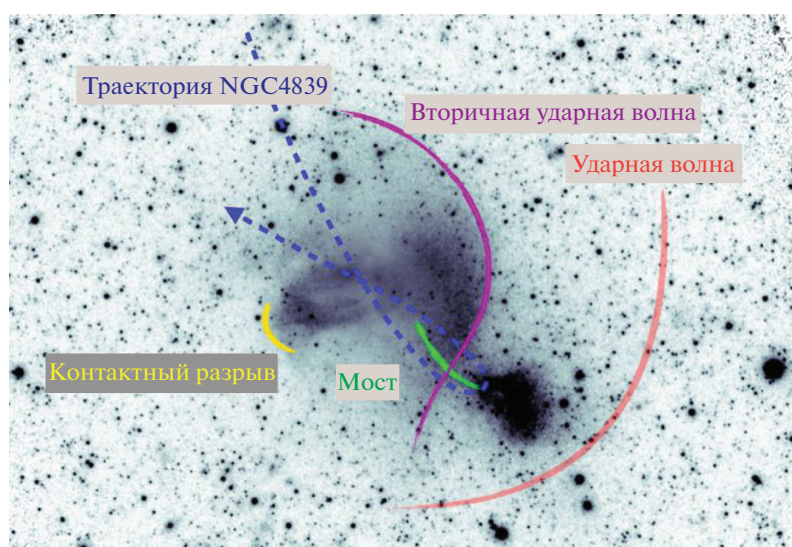


Рис. 53. Гидродинамика с характерным временем миллиард лет. Рентгеновское изображение скопления галактик Волос Вероники, на котором показаны наиболее значимые структуры, связанные с процессом слияния скопления с группой NGC 4839 (Е.М. Чуразов, И.И. Хабибуллин, Н.С. Лыскова, Р.А. Сюняев, А.М. Быков).

С ядрами галактик связано и другое катастрофическое явление — разрыв звезд приливными силами сверхмассивной черной дыры (рис. 52). С помощью телескопа eROSITA уже открыто несколько десятков событий приливного разрушения в галактиках на расстояниях в несколько миллиардов световых лет, составлен первый каталог таких событий.

Обсерватория СРГ провела глубокие наблюдения области вокруг скопления Волос Вероники (Кома, A1656). По результатам анализа полученных данных сделан вывод, что наиболее заметные

структуры могут быть объяснены продолжающимся слиянием скопления с группой галактик NGC 4839 (рис. 53).

Обсерватория непрерывно поставляет новые уникальные данные, позволяющие делать важные открытия в области астрофизики. Результаты регулярно публикуются в виде пресс-релизов, а также в множестве статей в авторитетных научных изданиях. Описанные выше результаты представлены Институтом космических исследований РАН от имени Коллаборации Спектр-РГ.

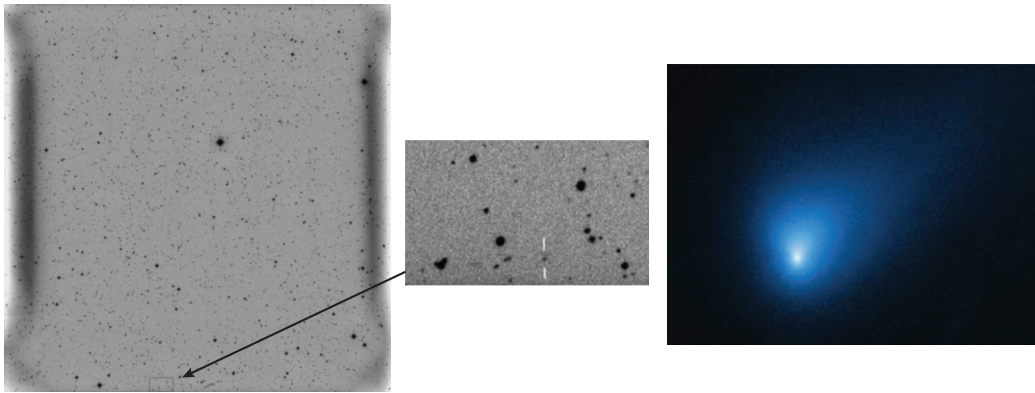


Рис. 54. Полученный 30 августа 2019 г. Г.В. Борисовым кадр, на котором впервые был обнаружен кометообразный объект. На площадке в центре комета отмечена белыми штрихами. Справа — изображение кометы 21/Borisov, полученное телескопом “Хаббл”.

2. Открытие и исследование свойств первой межзвездной кометы 21/Borisov

Открыта первая межзвездная комета 21/Borisov (рис. 54). Это всего лишь второй известный межзвездный объект. Относительно высокое содержание в коме кометы молекул CO, имеющих низкую температуру сублимации/конденсации, означает, что комета была выброшена с периферии протопланетного диска. Подтвержден единый механизм формирования таких объектов, как кометы, в Солнечной системе и вне ее. Также показано, что в окосолнечной сфере радиусом 50 а.е. в каждый момент времени может находиться около 50 межзвездных тел (в основном, ядер комет) размером более 50 м. Данный результат получен в итоге совместной работы ученых ИНАСАН, ИКИ РАН, МГУ, Астрономического научного центра [86, 87].

3. Достижение рекордного разрешения в оптической астрономии методом наблюдений покрытий звезд астероидами

Наблюдения покрытия астероидом (87) Sylvia двойной звезды ГYC 1947-290-1 на 6-м телескопе БТА САО РАН позволили определить диаметр главного компонента двойной системы и установить верхнюю границу для вторичного. Успешные наблюдения покрытия астероидом с целью определения углового диаметра звезды были выполнены на оптическом телескопе. Полученное угловое разрешение является рекордным в оптическом диапазоне и сопоставимо с возможностями современных радиоинтерферометрических комплексов.

Показано, что наблюдения покрытий звезд астероидами могут быть использованы для измерения угловых размеров на уровне до ≈ 30 микро-секунд дуги при использовании одиночных телескопов. Это в десятки раз лучше разрешения со-

временных длинноволновых интерферометров видимого и ИК-диапазонов и на три порядка лучше дифракционного предела крупнейших оптических телескопов. Описанный выше результат получен коллективом САО РАН в кооперации с учеными СПбГУ и INAF (Италия) (рис. 55) [88].

4. Открытие и исследование хлороводорода в атмосфере Марса

В результате исследований, выполнявшихся в ИКИ РАН в широкой международной кооперации, с помощью российского спектрометра ACS на космическом аппарате ExoMars Trace Gas Orbiter установлено присутствие хлороводорода (HCl) в атмосфере Марса (рис. 56). Предполагается, что HCl образуется ежегодно во время пылевого сезона в результате химических реакций с участием пыли и водяного пара. Не исключены и источники на поверхности. В отличие от других газов, обогащенных тяжелыми изотопами вследствие потери Марсом атмосферы, изотопное отношение в хлороводороде близко к земному. Это указывает, что хлор в его составе не участвует в длительных процессах обмена между атмосферой и поверхностью [89–92].

5. Первое отождествление быстрого радиовсплеска со вспышкой магнетара

Космическим гамма-спектрометром ФТИ им. А.Ф. Иоффе “Конус-WIND” была зарегистрирована вспышка от магнетара SGR 1935+2154, с необычно жестким спектром, сопровождавшаяся мощным радиовсплеском, измеренным радиотелескопами CHIME и STARE2. Одновременное детектирование и точное совпадение пиков на кривых блеска рентгеновского и радиоизлучения (рис. 57, 58) впервые позволили установить связь между галактическими магнетарами и быстрыми радиовсплесками. Данный результат получен

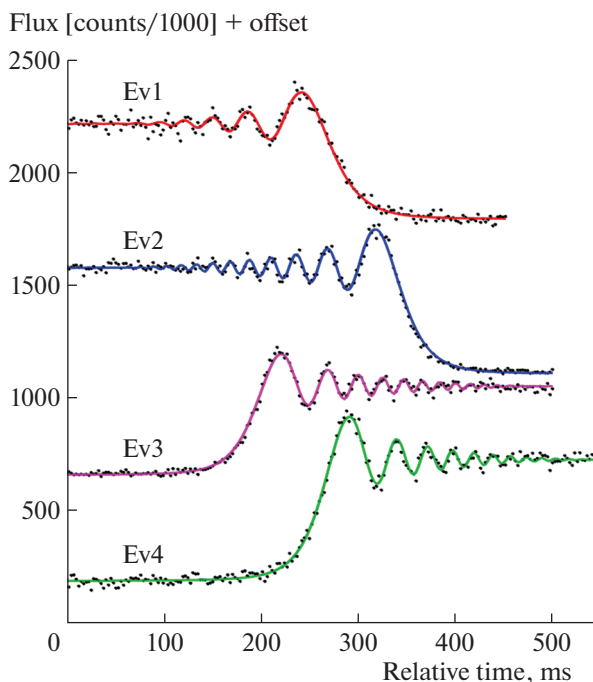


Рис. 55. Кривые покрытий компонентов ТУС 1947-290-1 астероидом (87) Sylvia 12 декабря 2019 г. на 6-м телескопе БТА САО РАН. Ev1, Ev4 относятся к главному компоненту, Ev2, Ev3 – к вторичному [88, рис. 4].

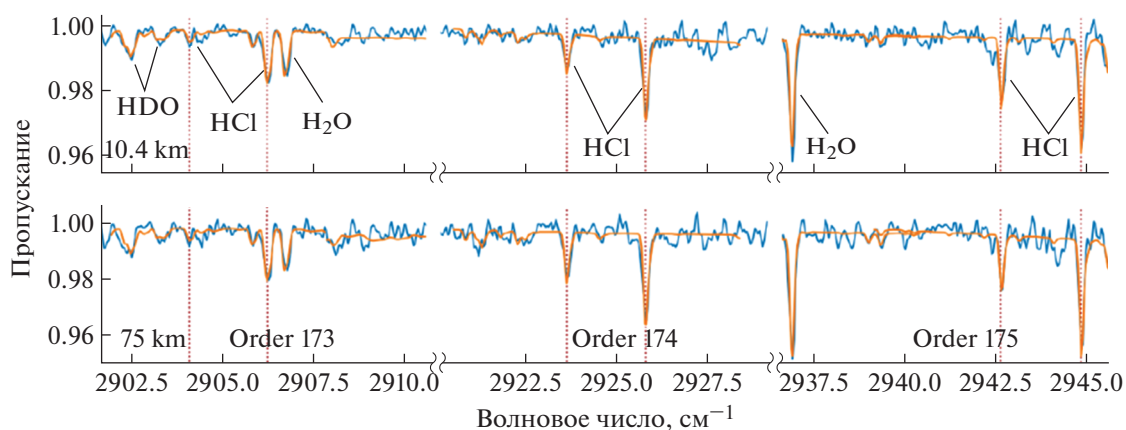


Рис. 56. Участки спектров атмосферы Марса, измеренные прибором ACS MIR, демонстрирующие шесть линий поглощения открытого хлороводорода (H^{35}Cl и H^{37}Cl).

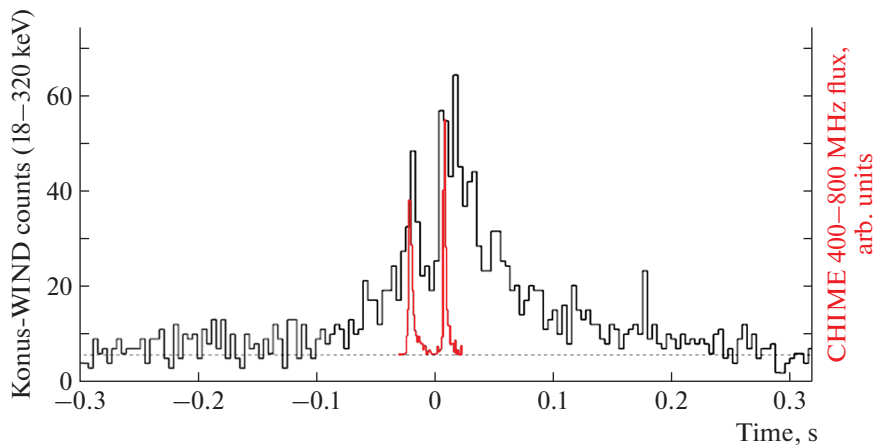


Рис. 57. Вспышка магнетара SGR 1935+2154 в рентгеновском диапазоне 18–320 кэВ (черная кривая, Конус-ВИНД) и в радиодиапазоне 0.4–0.8 ГГц (красная кривая, CHIME/FRB), 28.04.2020 г.

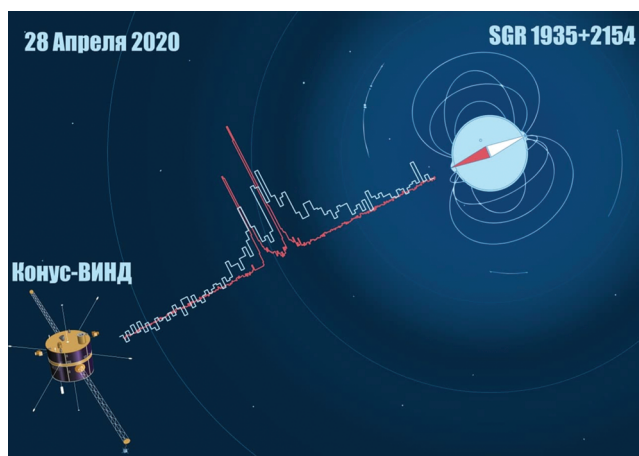


Рис. 58. Регистрация всплеск магнетара в художественном представлении.

совместно учеными ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ГАИШ МГУ, НИУ ВШЭ, а также NASA Goddard Space Flight Center и опубликован в [93].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков И.А. Некоторые приоритетные результаты, полученные в области физики в 2019 году (из отчетного доклада академика-секретаря ОФН РАН) // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2020. Т. 492. С. 4–53.
2. Афанасьев А.Е., Кортель А.А., Скакуненко П.И., Калмыков А.С., Киртаев Р.В., Негров Д.В., Балькин В.И. Single-layer atom chip for continuous operation: Design, fabrication and performance // Optics & Laser Technology. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107698>
3. Zelepukin I.V., Yaremenko A.V., Ivanov I.N., Yuryev M.V., Cherkasov V.R., Deyev S.M., Nikitin P.I., Nikitin M.P. Long-Term Fate of Magnetic Particles in Mice: A Comprehensive Study // ACS Nano. 2021. V. 15. № 7. P. 181–191. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00687>
4. Zavyalova E., Ambartsumyan O., Zhdanov G., Gribanov D., Gushchin V., Tkachuk A., Rudakova E., Nikiforova M., Kuznetsova N., Popova L., Verdiev B., Alatyrev A., Burtseva E., Ignatieva A., Iliukhina A., Dolzhikova I., Arutyunyan A., Gambaryan A., Kukushkin V. SERS-Based Aptasensor for Rapid Quantitative Detection of SARS-CoV-2. // Nanomaterials. 2021. V. 11(6):1394. <https://doi.org/10.3390/nano11061394>
5. Bondarenko L.V., Tupchaya A.Y., Vekovshinin Y.E., Gruznev D.V., Mihaluk A.N., Ivanov Y.P., Olyanich D.A., Matetskiy A.V., Zotov A.V., Saranin A.A. Metal sheet of atomic thickness embedded in silicon // ACS Nano. 2021. 15(12). <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c05669>
6. Dolganov P.V., Shuravin N.S., Dolganov V.K., Kats E.I., Stannarius R., Harth K., Trittel T., Park C.S., Maclennan J.E. Transient hexagonal structures in sheared emulsions of isotropic inclusions on smectic bubbles in microgravity conditions // Scientific Reports 11. 2021. 19144.
7. Stepanov A.L., Farrakhov B.F., Fattakhov Ya.V., Rogov A.M., Kononov D.A., Nuzhdin V.I., Valeev V.F. Incoherent-light pulse annealing of nanoporous germanium layers formed by ion implantation // Vacuum. 2021. 186. 110060.
8. Stepanov A.L., Khantimerov S.M., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M. Formation of nanoporous Ge layers by ion implantation at different temperatures of c-Ge substrate // Vacuum. 2021. 194. 110552.
9. Gavrilova T.P., Khantimerov S.M., Nuzhdin V.I., Valeev V.F., Rogov A.M., Stepanov A.L. Formation of nanoporous germanium layers with various morphology by ion implantation for anodes of lithium-ion batteries // Proc. 14th International Conference “Interaction of radiation with solids”. Minsk, Belarus. 2021. Sept. 21–24. P. 424–428.
10. Semenok D.V., Troyan I.A., Kvashnin A.G., Hanfland M., Sadakov A.V., Sobolevskiy O.A., Pervakov S., Pudalov V.M., Karimov D., Vasiliev A., Ivanova A.G., Gavriluk A.G., Lyubutin I.S., Akashi R., Oganov A.R. Superconductivity at 253 K in lanthanum-yttrium ternary hydrides // Materials Today. 2021. V. 48. P. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.025>
11. Troyan I.A., Semenok D.V., Kvashnin A.G., Sadakov A.V., Sobolevskiy O.A., Pudalov V.M., Ivanova A.G., Prakupenka V.B., Greenberg E., Gavriluk A.G., Lyubutin I.S., Struzhkin V.V., Bergara A., Errea I., Bianco R., Calandra M., Mauri F., Monacelli L., Akashi R., Oganov A.R. Anomalous high-temperature superconductivity in YH6 // Adv. Mater. 2021. 33, 2006832. <https://doi.org/10.1002/adma.202006832>
12. Belykh V.V., Korotneva A.R., Yakovlev D.R. Stimulated resonant spin amplification reveals millisecond electron spin coherence time of rare-earth ions in solids // Physical Review Letters. 2021. 127, 157401.
13. Alekseev S.G., Dizhur S.E., Polzikova N.I., Luzanov V.A., Raevskiy A.O., Orlov A.P., Kotov V.A., Nikitov S.A. Magnons Parametric Pumping in Bulk Acoustic Waves Resonator // Appl. Phys. Lett. 2020. 117. 072408. <https://doi.org/10.1063/5.0022267>
14. Алексеев С. Г., Дижур С.Е., Лузанов В.А., Раевский А.О., Орлов А.П., Ползикова Н.И. Линейные и параметрические магно-фононные взаимодействия, детектируемые с помощью обратного спинового эффекта Холла // Труды XXIV Международного симпозиума “Нанопизика и нанозлектроника”. Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г. В 2-х т. Т. 1. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2020. 469 с. ISBN978-5-91326-587-6. С. 154–155. <http://www.nanosymp.ru/ru/proceedings>
15. Cherkasov V.R., Mochalova E.N., Babenyshev A.V., Vasilyeva A.V., Nikitin P.I., Nikitin M.P. Nanoparticle Beacons: Supersensitive Smart Materials with On/Off-Switchable Affinity to Biomedical Targets // ACS Nano. 2020. V. 14. № 2. P. 1792–1803. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b07569>
16. Kononenko T.V., Knyazev B.A., Sovyk D.N., Pavelyev V.S., Komlenok M.S., Komandin G.A., Konov V.I. Silicon kinoform cylindrical lens with low surface roughness for high-power terahertz radiation // Optics and Laser

- Technology. 2020. V. 123. P. 105953.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105953>
17. *Kononenko T.V., Soyuk D.N., Pivovarov P.A., Pavelyev V.S., Mezhenin A.V., Cherepanov K.V., Komlenok M.S., Sorochenko V.R., Khomich A.A., Pashinin V.P., Ashkinazi E.E., Ralchenko V.G., Konov V.I.* Fabrication of diamond diffractive optics for powerful CO₂ lasers via replication of laser microstructures on silicon template // *Diamond and Related Materials*. 2020. V. 101. P. 107656.
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107656>
 18. *Ромишин А.М., Кудрявцев О.С., Екимов Е.А., Шкарин А.Б., Раттенбахер Д., Рахлин М.В., Торопов А.А., Власов И.И.* Фурье-ограниченная ширина линий оптических переходов одиночных SiV-центров в “адамантановых” наноалмазах // *JETP Letters*. 2020. V. 112. № 1–2(7). P. 17–21.
<https://doi.org/10.31857/S1234567820130030>
 19. *Mileiko S.T., Kolchin A.A., Galyshev S.N., Shakhlevich O.F., Prokopenko V.M.* Composites Part A 132. 2020. Article 105830.
 20. *Dzhilkibaev Zh-A.M. for Collaboration Baikal-GVD.* Baikal-GVD: Status and Perspectives // *PoS(2021)002*.
<https://doi.org/10.22323/1.395.002>
 21. *Аврорин А.В. и др.* Глубоководный черенковский детектор в озере Байкал // *ЖЭТФ*. 2022. Т. 161. Вып. 4. С. 476–496.
 22. *Барабин С.В., Кропачев Г.Н., Лукашин А.Ю., Кулевой Т.В., Выбин С.С., Голубев С.В., Изотов И.В., Киселева Е.М., Скалыга В.А., Григорьев С.В., Коваленко Н.А.* // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 10. С. 7.
 23. *Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V. et al.* Tenfold increase in the fusion triple product caused by doubling of toroidal magnetic field in the spherical tokamak Globus-M2 // *Nuclear Fusion*. 2021. V. 61. Number 6. 064001.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/abe08c>
 24. *Petrov Yu.V., Gusev V.K., Sakharov N.V. et al.* Overview of Globus-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current // *Nuclear Fusion*. 2022. 62 042009.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac27c7>
 25. *Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., et al.* Energy confinement in the spherical tokamak Globus-M2 with a toroidal magnetic field reaching 0.8 T // *Nuclear Fusion*. 2021. 62 016011.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac38c9>
 26. *Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Дейчули П.П. и др.* Исследования по физике и технике ионных и атомарных пучков в ИЯФ СО РАН // *УФН*. 2018. Т. 188. № 6. С. 595–650.
 27. *Дейчули П.П., Бруль А.В., Давыденко В.И., Иванов А.А., Осин Д., Магги Р.* Доплеровская спектроскопия атомарного водородно-дейтериевого пучка // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 7. С. 596–604.
 28. *Inzhevatkina A.A., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Lomov K.A., Postupaev V.V., Sudnikov A.V., Ustyuzhanin V.O.* Investigation of Plasma Rotation in SMOLA Helical Open Trap // *Plasma Physics Reports*. 2021. V. 47. Is. 8. P. 794–802.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X21080055>
 29. *Ivanov I.A., Ustyuzhanin V.O., Sudnikov A.V., Inzhevatkina A.* Long-pulse plasma source for SMOLA helical mirror // *J. Plasma Physics*. 2021. V. 87. Is. 2. Art.nr 845870201.
<https://doi.org/10.1017/S0022377821000131>
 30. *Chernoshtanov I.S., Ayupov D.A.* Collisionless particle dynamics in trap sections with helical corrugation // *Physics of Plasmas*. 2021. V. 28. Is. 3. Art.nr 032502.
<https://doi.org/10.1063/5.0040715>
 31. *Sudnikov A.V., Ivanov I.A., Inzhevatkina A.A., Larichkin M.V., Lomov K.A., Postupaev V.V., Tolkachev M.S., Ustyuzhanin V.O.* Plasma flow suppression by the linear helical mirror system // *J. Plasma Physics*. 2022. V. 88. 1. 905880102.
 32. *Ivanov I.A., Batkin V.I., Burdakov A.V., Kuklin K.N., Mekler K.I., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N.* Formation of Starting Plasma Flow in an Open Trap Using Arc Plasma Gun // *Plasma Physics Reports*. 2021. V. 47. No. 9. P. 938–946.
 33. *Sidorov E.N., Batkin V.I., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Nikishin A.V., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F.* Four-electrode probe for plasma studies in the GOL-NB multiple-mirror trap // *J. Instrumentation*. 2021. V. 16. No. 11. Art. No. T11006.
 34. *Postupaev V., Batkin V., Burdakov A., Burmasov V., Ivanov I., Kuklin K., Mekler K., Melnikov N., Nikishin A., Polosatkin S., Rovenskikh A., Sidorov E., Skovorodin D.* Status of Activity on GOL-NB Multiple-Mirror Experiment // 28th IAEA Fusion Energy Conference (Virtual Event, 10-15 May 2021): Programme, list of contributions, linked conference materials. Vienna: IAEA, 2021. Art. No. IAC/P4-4. P. 781.
 35. *Vyacheslavov L.N. et al.* In situ study of the processes of damage to the tungsten surface under transient heat loads possible in ITER // *J. Nuclear Materials*. 2021. V. 544. February 2021. 152669.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152669>
 36. *Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Velmuzhov A.P., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Leonov S.O., Fjodorow P., Skasyrsky Ya.K.* Resonantly pumped Ce³⁺ mid-infrared lasing in selenide glass // *Optics Letters*. 2021. V. 46. 4002. 3 p.
 37. *Fjodorow P., Frolov M.P., Leonov S.O., Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Velmuzhov A.P.* Mid-infrared laser performance of Ce³⁺-doped selenide glass // *Optics Express*. 2021. V. 29. 17, 27674. 9 p.
 38. *Churbanov M.F., Denker B.I., Galagan B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Snopatin G.E., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P.* Laser potential of Pr³⁺ doped selenide glasses in 5–6 μm spectral range // *J. Non-Crystalline Solids*. 2021. V. 559. 120592.
 39. *Shiryayev V.S., Sukhanov M.V., Velmuzhov A.P., Karakshina E.V., Kotereva T.V., Snopatin G.E., Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G.* Core-clad terbium doped chalcogenide glass fiber with laser action at 5.38 μm // *J. Non-Crystalline Solids*. 2021. 567, 120939.
 40. *Khegai A. et al.* O+E Band BDFA with Flattop 116 nm Gain Bandwidth Pumped with 250 mW at 1256 nm // *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2021. C. Tu1E. 4.

41. *Ososkov Y.Zh., Khagai A.M., et al.* Low-Water-Peak Bismuth-Doped Fiber for Efficient O+E Band Amplifiers // In proc. of ASSL 2021.
42. *Khagai A. et al.* Pump-efficient flat-top O+E-bands bismuth-doped fiber amplifier with 116 nm -3 dB gain bandwidth // Optics Express. 2021. <https://doi.org/10.1364/OE.441775>
43. *Курников А.А., Павлова К.Г., Орлова А.Г., Хилов А.В., Перекатова В.В., Ковальчук А.В., Субочев П.В.* Широкополосные (100 кГц–100 МГц) ультразвуковые ПВДФ-детекторы для сканирующей оптико-акустической ангиографии с ультразвуковым разрешением // Квантовая электроника. 2021. Т. 51(5). С. 383.
44. *Perekatova V., Nemirova S., Orlova A., Kirillin M., Kurnikov A., Pavlova K., Khilov A., Kovalchuk A., Subochev P.* Three-dimensional dual-wavelength optoacoustic angiography reveals arteriovenous anastomoses // Laser Physics Letters. 2021. 18(4), 045601.
45. *Orlova A., Pavlova K., Kurnikov A., Sirotkina M., Maslennikova A., Kirillin M., Skamnitsky D., Turchin I., Subochev P.* In vivo applications of raster-scan optoacoustic angiography // Proc. SPIE. 2021. 11642, 1164209. https://www.youtube.com/watch?v=GKK_148Oecw
46. *Plekhanov A.A., et al.* Histological validation of in vivo assessment of cancer tissue inhomogeneity and automated morphological segmentation enabled by Optical Coherence Elastography // Scientific Reports. 2020. 10 (11781). P. 1–16. V.Y. Zaitsev, et al. J. of Biophotonics, e202000257 (2020).
47. *Sirotkina M.A., et al.* // Biomedical Optics Express. 2020. 11 (3). P. 1365–1382.
48. *Sovetsky A.A., et al.* // Laser Physics Letters. 2020. 17 (6), 065601.
49. *Gubarkova, et al.* // Diagnostics. 2020. 10, 994.
50. *Alexandrovskaia Y.M., Baum O.I., Sovetsky A.A., Matveyev A.L., Matveev L.A., Sobol E.N., Zaitsev V.Y.* // Laser Physics Letters. 2020. 17 085603.
51. *Matveyev A.L., et al.* // Laser Physics Letters. 2020. 17(11), 115604.
52. Патент РФ № 2020114397, приоритет от 22.04.2020. Способ прижизненной оценки микроструктуры опухолевой ткани in эксперименте. А.А. Плеханов и др.
53. *Soshenko V.V., et al.* Nuclear Spin Gyroscope based on the Nitrogen Vacancy Center in Diamond // Physical Review Letters. 2021. 126, 199702.
54. *Ginzburg V., Yakovlev I., Kochetkov A., Kuzmin A., Mironov S., Shaikin I., Shaykin A., Khazanov E.* 11 fs, 1.5 PW laser with nonlinear pulse compression // Opt. Express. 2021. 29, 28297.
55. *Shaykin A., Ginzburg V., Yakovlev I., Kochetkov A., Kuzmin A., Mironov S., Shaikin I., Stukachev S., Lozhkarev V., Prokhorov A., Khazanov E.* Use of KDP crystal as a Kerr nonlinear medium for compressing PW laser pulses down to 10 fs // High Power Laser Science and Engineering. 2021. 9. E54.
56. *Yudin V.I., Taichenachev A.V., Basalaev M.Yu., Prudnikov O.N., Furst H.A., Mehlstaubler T.E., Bagayev S.N.* Combined atomic clock with blackbody-radiation-shift-induced instability below 10^{-19} under natural environment conditions // New Journal of Physics/ 2021. V. 23. 023032.
57. *Kosareva O., et al.* Postfilament supercontinuum on 100 m path in air // Optics Letters. 2021. 46, 5: 1125–1128.
58. *Kosareva O.G., et al.* Remote triggering of air-gap discharge by a femtosecond laser filament and postfilament at distances up to 80 m // Appl. Physics Letters. 2021. 119, 4. 041103.
59. *Andrianov A.V., Kalinin N.A., Anashkina E.A., Egorova O.N., Lipatov D.S., Kim A.V., Semjonov S.L., Litvak A.G.* Selective Excitation and Amplification of Peak-Power-Scalable Out-of-Phase Supermode in Yb-Doped Multicore Fiber // J. Lightwave Technology. 2020. V. 38. 2464.
60. *Balakin A.A., Skobelev S.A., Andrianov A.V., Anashkina E.A., Litvak A.G.* Coherent propagation and amplification of intense laser pulses in hexagonal multicore fibers // Opt. Lett. 2020. 45, 3224.
61. *Balakin A.A., Litvak A.G., Skobelev S.A.* Coherent propagation and amplification of intense wave beams in a deformed multicore fiber // Phys. Rev. A. 2020. 102, 023527.
62. *Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В., Чистяков Д.В., Когновицкая Е.А., Лосев С.Н., Бобрецова Ю.К., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С.* Мощные (более 1 Вт) квантовые каскадные лазеры для длинноволнового ИК диапазона при комнатной температуре // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 2. С. 141–142.
63. *Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В., Савченко Г.М., Лосев С.Н., Когновицкая Е.А., Лютецкий А.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С.* Квантово-каскадные лазеры мощностью 10 Вт для спектральной области 4.6 мкм // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 8. С. 720–721.
64. *Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В., Савченко Г.М., Лосев С.Н., Когновицкая Е.А., Лютецкий А.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С.* Разработка и исследование мощных квантово-каскадных лазеров для спектрального диапазона 4.5–4.6 мкм // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 11. С. 989–994.
65. *Grishkov V.E., Uryupin S.A.* Generation of terahertz radiation in dielectric-metal structure irradiated by a femtosecond laser pulse // Optics Letters. 2020. V. 45. № 1. P. 41–44.
66. *Gladyshev A., Yatsenko Y., Kolyadin A., Kompanets V., Bufetov I.* Mid-infrared 10- μ J-level sub-picosecond pulse generation via stimulated Raman scattering in a gas-filled revolver fiber // Optical Materials Express. 2020. 10(12). P. 3081–3089. <https://doi.org/10.1364/OME.411364>
67. Spotlight Summary by David Novoa. (Аннотация статьи [66], подготовленная редакцией для Spotlight on Optics): <https://www.osapublishing.org/spotlight/summary.cfm?id=442359>
68. *Melentiev P.N., Son L.V., Kudryavtsev D.S., Kasheverov I.E., Tsetlin V.I., Esenaliev R.O., Balykin V.I.* Ultrafast, Ultrasensitive Detection and Imaging of Single Cardiac Troponin-T // Molecules ACS Sensors. 2020. 5. 11. P. 3576–3583. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c01790>

69. *Aksenov V.P., Dudorov V.V., Kolosov V.V., and Levitsky M.E.* Synthesized Vortex Beams in the Turbulent Atmosphere // *Frontiers in Physics*. 2020. V. 8. Article 143. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00143>
70. Патент на изобретение “Способ формирования лазерного пучка с произвольно заданным распределением интенсивности в дальнем оптическом поле и устройство его реализации”. Рег. № АААА-Г20-620082890003-0 от 28.08.2020.
71. *Buleyko B., Ponomarev A.V., Loza O.T., Ulyanov D.K., Sharypov K.A., Shunailov S.A., Yalandin M.I.* Experimental Plasma Maser as a Broadband Noise Amplifier. 2: Short Pulse // *Physics of Plasmas*. 2021. V. 28. № 2. P. 023304 (1-5). (Feb. 2021). <https://doi.org/10.1063/5.0031432>
72. *Alichkin E.A., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., Karelin S.Y.* Picosecond solid-state generator with a peak power of 50 GW // *Review of Scientific Instruments*. 2020. V. 91. № 10. <https://doi.org/10.1063/5.0017980>.
73. *Rukin S.N. et al.* // Proc. of 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk, Russia, 2020. P. 92–97.
74. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Герасимов М.Ю., Ицков В.В.* Радиоосвещение на основе сверхширокополосных генераторов динамического хаоса // *Радиотехника и электроника*. 2016. Т. 61. № 11. С. 1073–1083.
75. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* Источники радиоосвещения на основе сверхширокополосных микрогенераторов хаотических колебаний // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42. Вып. 24. С. 49–57.
76. *Гуляев Ю.В., Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Рыжов А.И., Уваров А.В.* Экспериментальная ячейка приемника радиосвета // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44. № 21. С. 81–90.
77. *Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Попов М.Г., Рыжов А.И.* Искусственное радиоосвещение: источники, приемники и получение изображений // *Физические основы приборостроения*. 2018. Т. 7. № 3(29). С. 50–63. <https://doi.org/10.25210/jfop-1803-050063>
78. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Рыжов А.И.* Радиоосвещение: концепция и технология / В сб. “Нелинейные волны 2018”. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2019. ISBN 978-5-8048-0092-6. С. 40–64.
79. *Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Попов М.Г., Рыжов А.И.* Искусственное радиоосвещение в закрытом пространстве // *Радиотехника и электроника*. 2019. Т. 64. № 9. С. 916–925.
80. *Дмитриев А.С., Ицков В.В., Петросян М.М., Рыжов А.И.* Разрешающая способность при получении изображений в искусственном радиосвете // *Физические основы приборостроения*. 2020. Т. 9. № 2 (35).
81. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Ryzhov A.I., Petrosyan M.M., Itskov V.V.* Artificial radio lighting with sources of microwave dynamic chaos // *Chaos* 31. 2021. 063135. <https://doi.org/10.1063/5.0053504>
82. *Gulevich O.A., Kaigorodov E.P., Lyakhov G.A., Reznikov A.E., Varenkov V.V., Volkomirskaya L.B.* Experimental Study of a Deep Oil and Gas Deposit by the Method of Reflected Electromagnetic Waves, ISSN 1541-308X // *Physics of Wave Phenomena*. 2021. V. 29. № 4. P. 311–320.
83. *Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Резников А.Е., Тригубович Г.М., Чернышев А.В.* Изучение распределения проводимости в криолитозоне на основе данных метода отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ) // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021. № 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.6>
84. *Dolgikh Yu.N., Volkomirskaya L.B., Kaygorodov E.P., Sanin S.S., Kuznetsov V.I., Gulevich O.A., Reznikov A.E., Varenkov V.V.* The Reflected Electromagnetic Wave CDP Method (ECDP) Testing Results and Possibilities for The Future Oil and Gas Exploration. // Proc. Conference “Tyumen 2021”, March 2021. V. 2021. P. 1–6.
85. *Kuftin A.N., Morozkin M.V., Proyavin M.D., Fokin A.P., et al.* A 250-Watts, 0.5-THz continuous-wave second-harmonic gyrotron. // *Electron Device Letters*. 2021. 42(11). P. 1666–1669.
86. *Борисов Г.В., Шустов Б.М.* Открытие первой межзвездной кометы и пространственная плотность межзвездных объектов в солнечной окрестности // *Астрономический вестник*. 2021. Т. 55. № 2. С. 1–9.
87. *Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Ikonnikova N.P., Burlak M.A., Belinski A.A.* Interstellar comet 2I/Borisov: dust composition from multiband photometry and modelling // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. V. 502. P. 1882–1894.
88. *Dyachenko V., Richichi A., Obolentseva M., Beskakotov A., Maksimov A., Mitrofanova A., Balega Y.* A joint occultation and speckle investigation of the binary star TYC 1947-290-1 and of the asteroid (87) Sylvia // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. V. 508. № 2. P. 2730–2735.
89. *Korablev O., Olsen K.S., Trokhimovskiy A., Lefevre F., Montmessin F., Fedorova A.A., Toplis M.J., Alday J., Belyaev D.A., Patrakeeve A., Ignatiev N.I., Shakun A.V., Grigoriev A.V., et al.* Transient HCl in the atmosphere of Mars // *Science Adv.* 7. 2021. eabe4386. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4386>
90. *Olsen K.S., Trokhimovskiy A., Montabone L., Fedorova A.A., Luginin M., Lefevre F., Korablev O.I., Montmessin F., et al.* Seasonal reappearance of HCl in the atmosphere of Mars during the Mars year 35 dusty season // *Astron. Astrophys.* 2021. 647, A161. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140329>
91. *Aoki S., Daerden F., Viscardy S., et al.* Annual appearance of hydrogen chloride on Mars and a striking similarity with the water vapor vertical distribution observed by TGO/NOMAD // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. 2021GL092506. <https://doi.org/10.1029/2021GL092506>
92. *Trokhimovskiy A., Fedorova A.A., Olsen K.S., Alday J., Korablev O., Montmessin F., Lefevre F., Patrakeeve A., Belyaev D., Shakun A.V.* Isotopes of chlorine from HCl in the Martian atmosphere // *Astron. Astrophys.* 2021. V. 651. A32. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140916>
93. *Ridnaia A., Svinin D., Frederiks D., Bykov A., Popov S., Aptekar R., Golenetskii S., Lysenko A., Tsvetkova A., Ulanov M., Cline T.* A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst // *Nature Astronomy*. 2021. № 5. P. 372–377.

ON THE RESULTS IN PHYSICS OBTAINED IN 2020–2021**E. Yu. Kilpio^{a,b} and Academician of the RAS I. A. Shcherbakov^{a,c}**^a *Department of Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*^b *Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,
Nauchny, the Republic of Crimea, Russia*^c *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The article is based on annual reports presented by the head of the Department of Physics, RAS at general meetings of the Department in April 2021 and April 2022. It describes some scientific results in physics obtained in 2020–2021 in research organizations (so called RAS institutes) in respect of which the Russian Academy of Sciences has special credentials, stipulated by the resolutions of the Government of the Russian Federation No. 521 of 5.06.2014 and No. 1652 of 24.12.2018. The brief summary information on the work of scientific organizations in different areas of physics is given and several examples of individual achievements in the form of annotations are presented.

Keywords: physics of atoms and molecules, condensed matter, materials science, nuclear physics, particle physics, plasma physics, optics, laser physics, radio physics electronics, acoustics, astronomy, space science