



ИФМ РАН

2018–2023
Важнейшие
результаты

К 30-летию Института физики микроструктур РАН

Институт физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) образован постановлением Президиума РАН № 173 от 28 сентября 1993 года в результате выделения из Института прикладной физики РАН Отделения физики твердого тела и оптики в самостоятельный институт в составе Отделения общей физики и астрономии РАН. С 1 марта 2016 года ИФМ РАН вошел в состав образованного с его участием «Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики Российской академии наук» (ФИЦ ИПФ РАН) на правах филиала. В связи с присвоением ФИЦ ИПФ РАН имени академика А.В. Гапонова-Грехова 31 марта 2023 года ИФМ РАН переименован в Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Директором-основателем института с 1993 года являлся академик С.В. Гапонов. С 2009-го по 2020 год институт возглавлял член-корреспондент РАН З.Ф. Красильник, в настоящее время З.Ф. Красильник занимает должность руководителя научного направления «Физика микро- и наноструктур». С июля 2020 года по октябрь 2021-го обязанности директора временно исполнял профессор В.И. Гавриленко. С 15 октября 2021 года должность директора ИФМ РАН занимает д.ф.-м.н. А.В. Новиков.

В настоящее время в институте трудятся более 300 человек, в том числе 200 научных сотрудников, среди которых 1 академик, 3 члена-корреспондента РАН, 28 докторов и 96 кандидатов наук. Более 60 человек работают в ИФМ РАН с момента его основания. Каждый год трудовой коллектив института пополняется молодыми сотрудниками. Средний возраст научных сотрудников института в 2023 году составил 45 лет.

Сегодня ИФМ РАН хорошо известен в стране и за рубежом своими фундаментальными исследованиями и прикладными работами в области технологии и диагностики твердотельных микро- и наноструктур; многослойной оптики рентгеновского и ультрафиолетового диапазонов; кремниевой оптоэлектроники; спектрометрии и электроники терагерцового диапазона; физики магнитных наноструктур; физики сверхпроводников и сверхпроводниковой электроники. Выполнение исследований в этих областях на мировом уровне оказалось возможным благодаря высокой научной квалификации сотрудников и имеющемуся в институте современному технологическому и экспериментальному оборудованию.

Для эффективного использования современного научного оборудования в ИФМ РАН создан центр коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» (ipmcsr.ru), имеется уникальная научная установка «Фемтоспектр» (ipmcras.ru/science/oborudovanie). Научные исследования ИФМ РАН ведутся в тесном сотрудничестве

с российскими и зарубежными образовательными и научными организациями, организациями Росатома и российскими предприятиями микроэлектроники.

Брендом института является организуемый им ежегодный международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (nanosymp.ru). За почти 30-летнюю историю проведения симпозиума он стал одним из крупнейших в России научных мероприятий в области физики твердотельных микро- и наноструктур. В симпозиуме принимают участие более 500 человек.

В ИФМ РАН всегда уделялось большое внимание подготовке научных кадров. С 2004 года на базе института функционирует межфакультетская базовая кафедра «Физика наноструктур и нанoeлектроника» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, обучение на которой проходят студенты трех физических факультетов университета. ИФМ РАН имеет аспирантуру и диссертационный совет, за годы работы которого 14 сотрудников института успешно защитили докторские диссертации, 76 – кандидатские.

В год 30-летия в Институте физики микроструктур РАН ведутся работы по созданию отечественного рентгеновского литографа для микроэлектроники, рентгеновского микроскопа для биологических исследований, кубита на основе кремниевых гетероструктур в рамках дорожной карты «Квантовые вычисления», элементов магнитной и сверхпроводниковой нанoeлектроники, новых источников излучения ИК- и ТГц-диапазонов, приборов для медицинской диагностики. Коллектив ИФМ РАН полон творческих планов, новых идей и с оптимизмом смотрит в будущее!

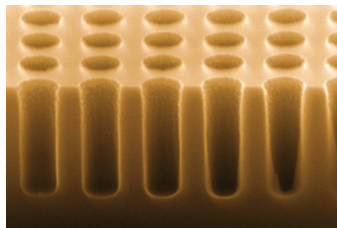


Светоизлучающие SiGe-гетероструктуры, встроенные в микрорезонаторы

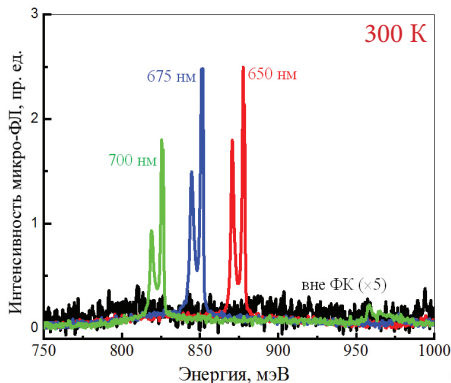
Методом молекулярно-пучковой эпитаксии на кремнии получены SiGe-гетероструктуры с самоформирующимися наноструктурами и структуры со слоями Ge, демонстрирующие люминесценцию при комнатной температуре, а также разработана технология формирования на таких структурах микро- и нанорезонаторов. Экспериментально показано, что путем выбора параметров структур и формируемых на них двумерных фотонных кристаллов (ФК) с гексагональной решеткой можно реализовать эффективное взаимодействие излучающей среды как с радиационными, низкодобротными модами ФК, так и с высокодобротными модами защищенных по симметрии связанных состояний в континууме (ВКС-моды). Продемонстрировано, что интенсивность сигнала люминесценции наноструктур Ge при комнатной температуре может быть увеличена более чем на два порядка на частотах, соответствующих ВКС-модам ФК. Добротность линий излучения связанных с ВКС-модами ФК превышает 2500. Разработаны экспериментальные методики определения дисперсионных зависимостей излучательной способности мод двумерных ФК по спектрам фотолюминесценции.

Для эпитаксиальных слоев Ge, сформированных на кремнии и встроенных в ФК, выявлено значительное увеличение при комнатной температуре интенсивности люминесценции, связанной с прямыми оптическими переходами в Ge на длинах волн 1,5–1,6 мкм.

Полученные результаты открывают новые возможности для создания на кремнии компактных источников излучения ближнего ИК-диапазона.



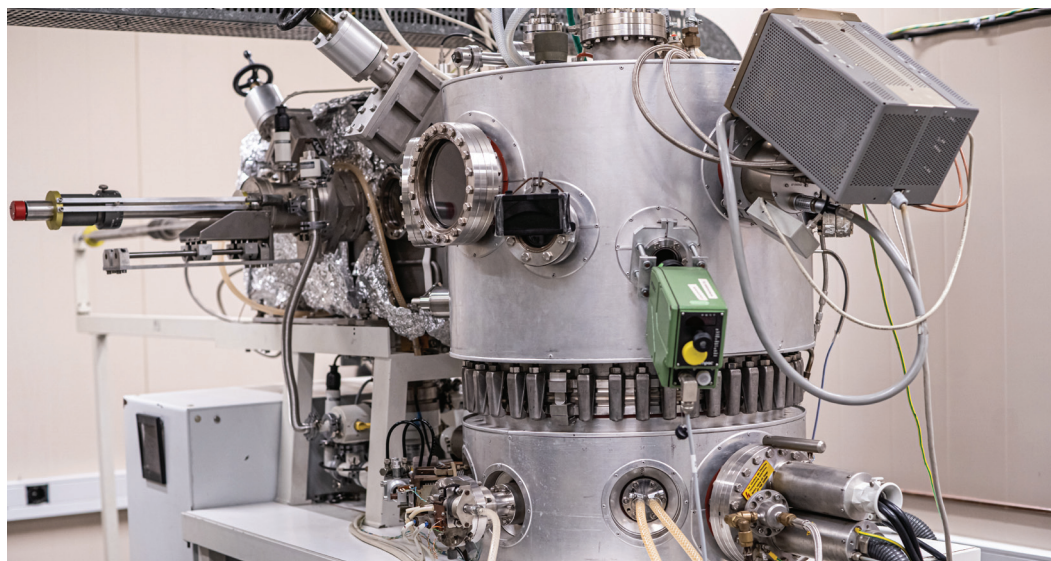
Полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа снимок скола фотонного кристалла, сформированного на Ge/Si-структуре



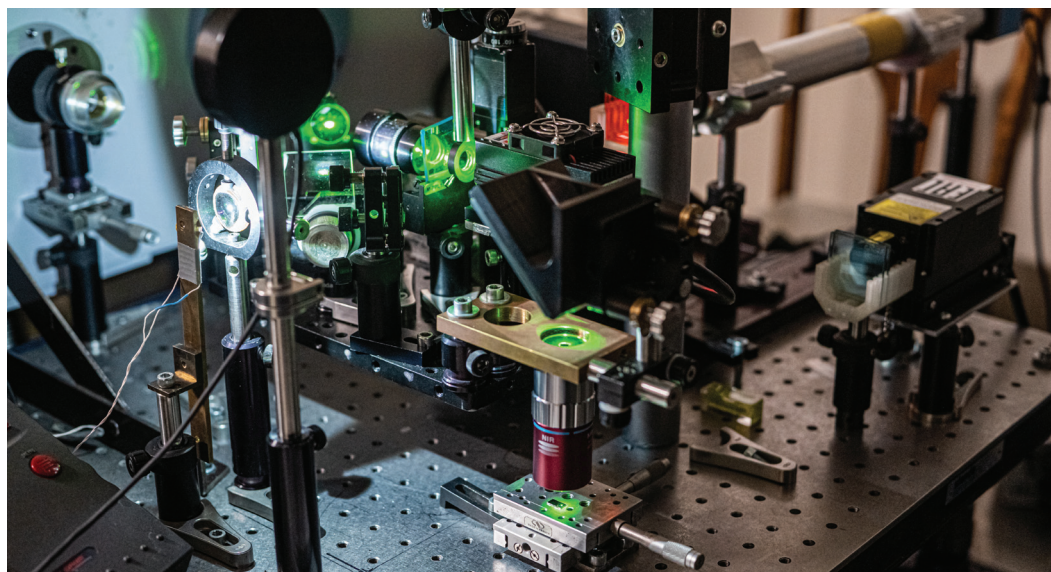
Основные публикации по результату:

- ▶ Semiconductor Science and Technology, **34**, 024003 (2019);
- ▶ Laser & Photonics Reviews, **15**, 2000242 (2021);
- ▶ Nanomaterials, **12**, 2687 (2022);
- ▶ Journal of Physics D: Applied Physics, **55**, 075107 (2022);
- ▶ Nanomaterials, **13**, 1678 (2023).

Спектры микрофотолюминесценции Ge(Si) наноструктур в ФК с различным периодом (указан рядом со спектром) и вне ФК. Узкие пики связаны с взаимодействием наноструктур с ВКС-модами



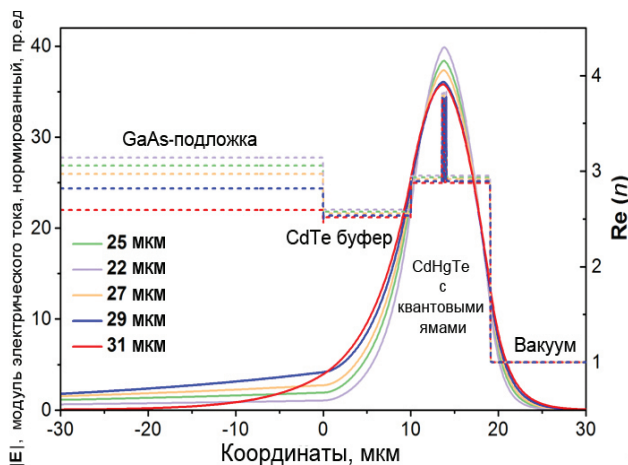
Высоковакуумная установка молекулярно-пучковой эпитаксии SiGe-гетероструктур



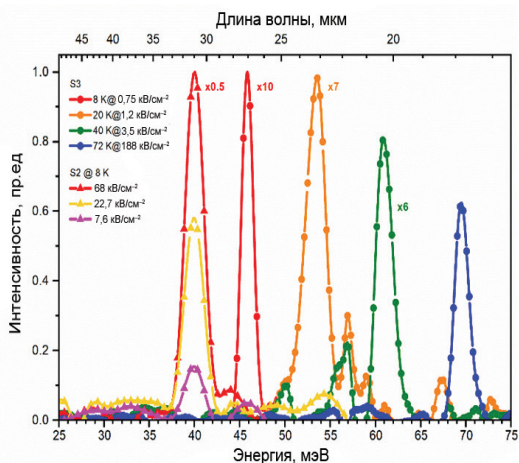
Установка для исследования люминесцентных свойств полупроводниковых структур с высоким пространственным и спектральным разрешением

Подавление безызлучательной оже-рекомбинации и генерация ТГц-излучения в квантовых ямах HgCdTe

Безызлучательная оже-рекомбинация является доминирующим механизмом межзонной рекомбинации для безмассовых фермионов Дирака в бесщелевом графене, что представляется сложным препятствием на пути создания лазеров терагерцового диапазона на основе графена. Для массивных фермионов Дирака оже-рекомбинация может полностью подавляться, если кинетическая энергия носителей ниже определенного порога, который зависит от непараболичности и симметрии законов дисперсии электронов и дырок. В гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe, выращенных на подложке GaAs, содержащих массивные фермионы Дирака, продемонстрировано, что путем тонкой настройки зонной структуры рекомбинация носителей имеет чисто радиационный характер. В структуре с диэлектрическим волноводом при межзонном оптическом возбуждении получено стимулированное излучение с перестройкой длины волны от 27 до 18 мкм при изменении температуры от 8 до 70 К. Предложен дизайн структур, в котором понижено вытекание волноводной моды в подложку из-за падения показателя преломления вблизи области остаточных лучей в GaAs. Достигнуто стимулированное излучение на межзонных переходах с длиной волны вплоть до 31 мкм, т. е. за пределами спектрального диапазона существующих квантово-каскадных лазеров.



Распределение показателя преломления (штриховые линии), электрического поля TE_0 -моды (сплошные линии) в структуре S2 (см. следующий рисунок) для длин волн вблизи 30 мкм. Хорошо видно, что лучшее ограничение имеет место для длины волны 31 мкм, которая ближе к области остаточных лучей в подложке GaAs

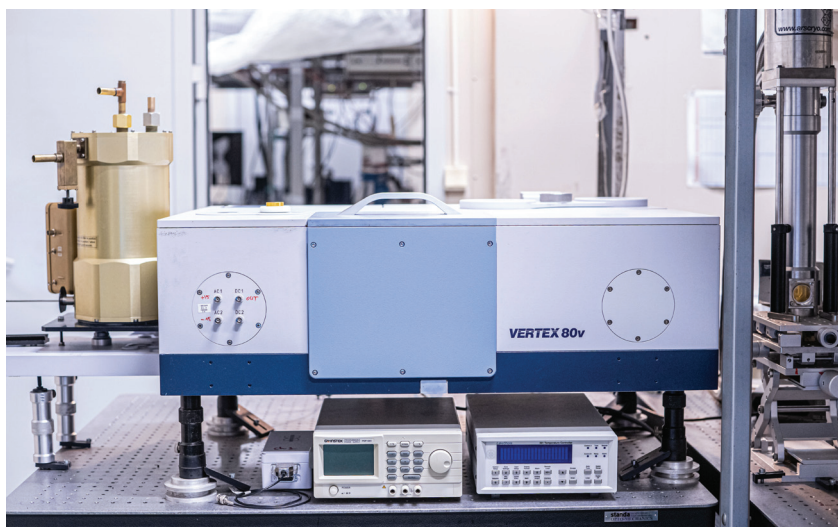


Спектры стимулированного излучения образцов S2 (буфер CdTe 10 мкм, 15 квантовых ям $\text{Hg}_{0.935}\text{Cd}_{0.065}\text{Te}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ шириной 7,9 нм) и S3 (буфер CdTe 15 мкм, 15 квантовых ям $\text{Hg}_{0.926}\text{Cd}_{0.074}\text{Te}/\text{Cd}_{0.6}\text{Hg}_{0.4}\text{Te}$ шириной 7,8 нм) при различных температурах

Полученные результаты открывают путь к созданию лазеров длинноволнового инфракрасного/терагерцового диапазона, способных конкурировать с ККЛ как по ширине перестройки частоты излучения, так и по длинноволновой границе области достижимой генерации (до 40 мкм, как показывают теоретические расчеты).

Основные публикации по результату:

- ▶ ACS Photonics, **18**, 3526 (2021);
- ▶ Applied Physics Letters, **121**, 182103 (2022).



Комплекс фурье-спектроскопии с временным разрешением на основе спектрометра Bruker Vertex 80v

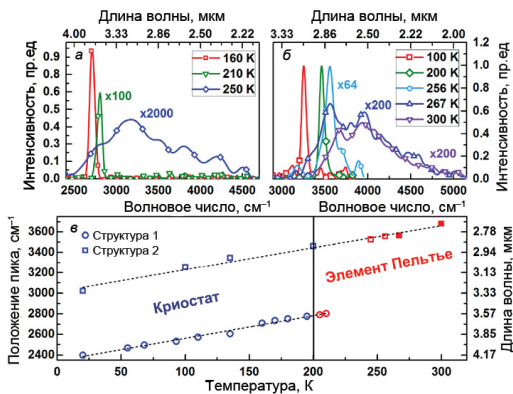
Новые полупроводниковые лазеры на основе квантовых ям HgCdTe, работающие в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм

Создание простых и эффективных источников излучения, работающих в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм, важно для множества практических применений: газовой спектроскопии, мониторинга окружающей среды, систем технологической безопасности, систем связи и др. Межзонные каскадные и квантовые каскадные лазеры для этого спектрального диапазона весьма сложны в технологическом отношении. В ИФМ РАН в гетероструктурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe с диэлектрическим волноводом, выращенных в ИП СО РАН, при оптической накачке получено стимулированное излучение в диапазоне длин волн 2,8–3,7 мкм при рекордно высоких температурах, вплоть до 267 К (–6 °С). Дизайн структур обеспечивает подавление безызлучательной оже-рекомбинации в узких (шириной 1,5–2 нм) квантовых ямах из чистого HgTe.

Полученные результаты открывают возможность создания лазеров, работающих в окне прозрачности атмосферы 3–5 мкм при охлаждении термоэлектрическими элементами Пельтье.

Основные публикации по результату:

- ▶ Optics Express, 26, 12755 (2018);
- ▶ Applied Physics Letters, 117, 083103 (2020).



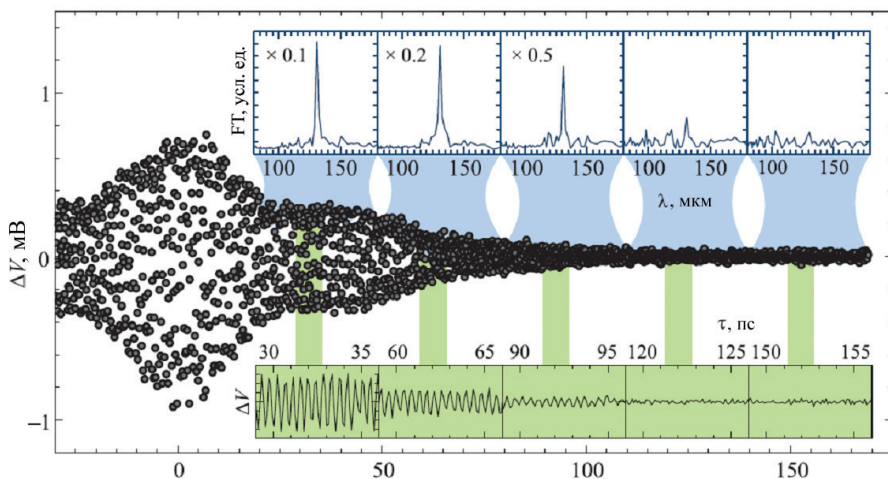
Спектры стимулированного излучения и фотолюминесценции при различных температурах для структур: а – №1 ($d_{QW1} = 1,9$ нм, длина волны накачки $\lambda_p = 1,6$ мкм) при фиксированной интенсивности накачки $I_p = 250$ кВт/см²; б – №2 ($d_{QW2} = 1,5$ нм, длина волны накачки $\lambda_p = 1,5$ мкм); в – температурная зависимость положения пика стимулированного излучения (синие и красные символы соответствуют измерениям в кристалле замкнутого цикла и на элементе Пельтье)

Квантовая интерферометрия кулоновских центров в полупроводниках

Методом интерферометрии Рамсея измерены времена когерентности при резонансном оптическом возбуждении доноров мышьяка в кристалле германия. В основе выбранной методики лежит измерение населенности возбужденного состояния (термически связанного с ней фототока) при воздействии на образец последовательности парных когерентных импульсов излучения на частоте перехода $1s(A_1) \rightarrow 2p_0$ (2,28 ТГц) в зависимости от времени их относительной задержки. Это можно рассматривать как демонстрацию некогерентного считывания когерентного состояния доноров. В качестве источника оптического возбуждения использовался терагерцовый лазер на свободных электронах (NovoFEL). Фурье-анализ осцилляций фототока на образцах с концентрацией доноров 10^{13} см^{-3} позволил наблюдать осцилляции Рамсея вплоть до времен 400 пс. Предполагается, что в образцах с меньшей концентрацией доноров в моноизотопном германии можно получить на порядок более длинные времена когерентности, что важно для дальнейших разработок, использующих состояния кулоновских центров в полупроводниках.

Основные публикации по результату:

- Письма в ЖЭТФ, 116, 139 (2022).



Интерферограммы осцилляций Рамсея при $T = 7 \text{ К}$. Голубые вставки показывают фурье-преобразование сигнала в указанных областях, зеленые – изменение сигнала ΔV на масштабе 7 пс

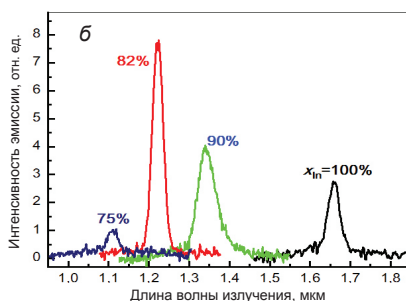
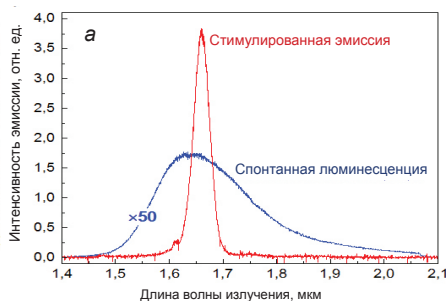
Гетероструктуры InGaN для источников излучения ближнего ИК-диапазона

В ИФМ РАН развита технология формирования методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота планарных слоев InGaN с высокой (75–100%) долей индия. Для формирования структур используются пластины Al_2O_3 с буферными слоями AlN/GaN. При импульсной оптической накачке в структурах с активным слоем InN получена стимулированная эмиссия на межзонных переходах в диапазоне длин волн 1,66–1,9 мкм, наблюдаемая до температуры 215 К. Определены основные условия, необходимые для достижения стимулированного излучения: фоновая концентрация электронов меньше $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, высокое кристаллическое качество структур (плотность дислокаций $< 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), двумерный характер роста (отсутствие нанопор) и однородность осаждаемого слоя (отсутствие включений металлического In). Минимальный порог возникновения стимулированного излучения достигался в слоях InN с наименьшей ($3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) концентрацией электронов и составлял 0,4 кВт/см² при температур 8 К и 6 кВт/см² при 77 К.

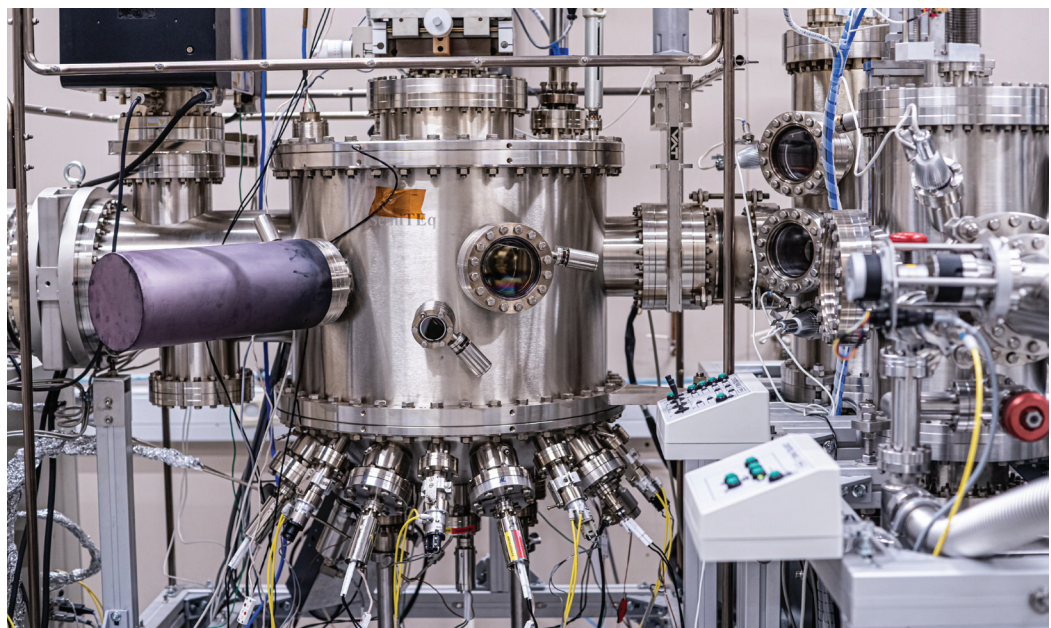
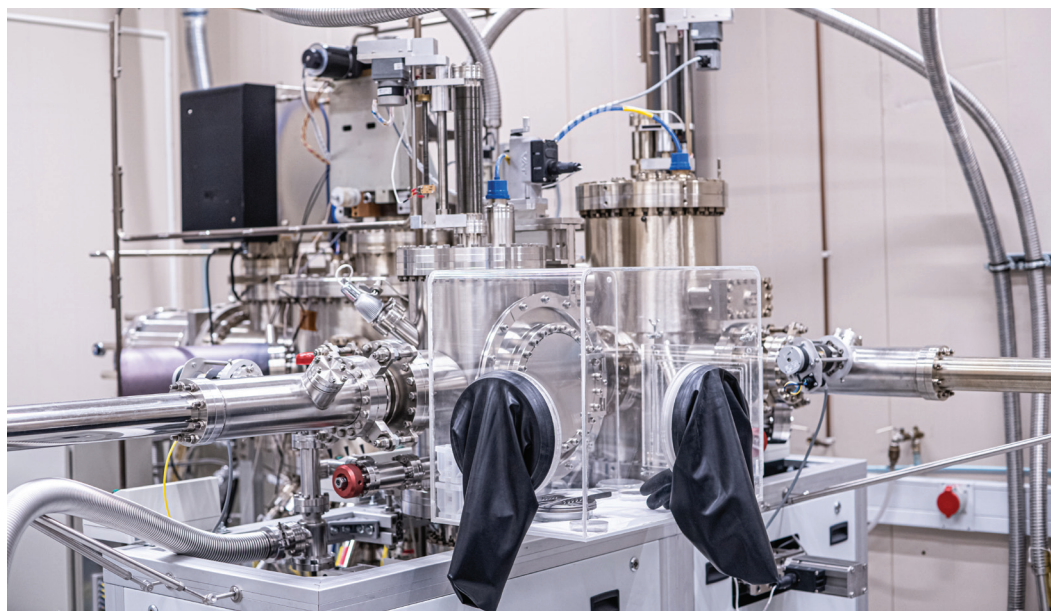
Варьирование доли In в пределах 75–100% в структурах со слоями InGaN позволило перестраивать длину волны стимулированного излучения от 1,1 мкм до 1,6 мкм. Наименьший порог достижения стимулированного излучения (10 кВт/см² при 77 К) реализован в слоях с долей индия 80–85%, что определяется балансом двух основных процессов, конкурирующих при продвижении от InN к более широкозонным структурам на основе InGaN: уменьшение роли оже-рекомбинации при увеличении ширины запрещенной зоны и рост оптических потерь, вызванный ухудшением структурного качества и морфологии поверхности слоев InGaN при увеличении доли индия в них. Реализация стимулированного излучения в InGaN-структурах с высоким содержанием In показывает перспективу создания на их основе эффективных светодиодов и лазеров для телекоммуникационного диапазона 1,3–1,55 мкм.

Основные публикации по результату:

- ▶ Scientific Reports, **8**, 9454 (2018);
- ▶ Fundamental Research, **2**, 794 (2022);
- ▶ Applied Physics Letters, **118**, 151902 (2021);
- ▶ ECS J. of Solid State Science and Technology, **11**, 014003 (2022).



Измеренные при 77 К спектры: а – спонтанной люминесценции и стимулированной эмиссии в структуре со слоем InN, б – стимулированного излучения слоев InGaN с различным содержанием индия (x_{In})



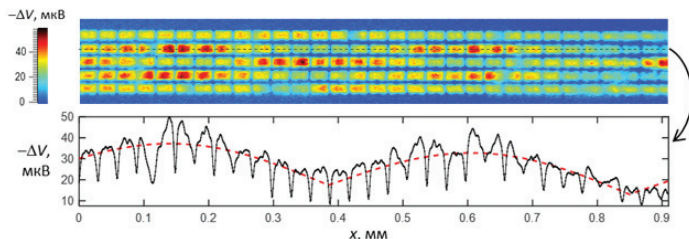
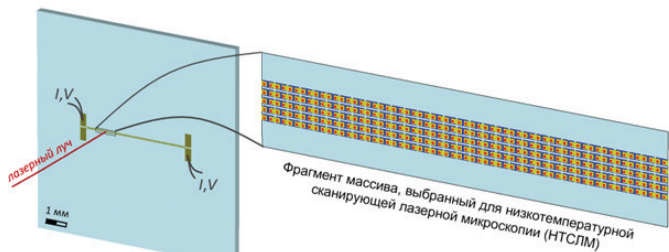
Высоковакуумная установка молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктур на основе нитридов металлов III группы STE3N3

Джозефсоновские массивы и антенны

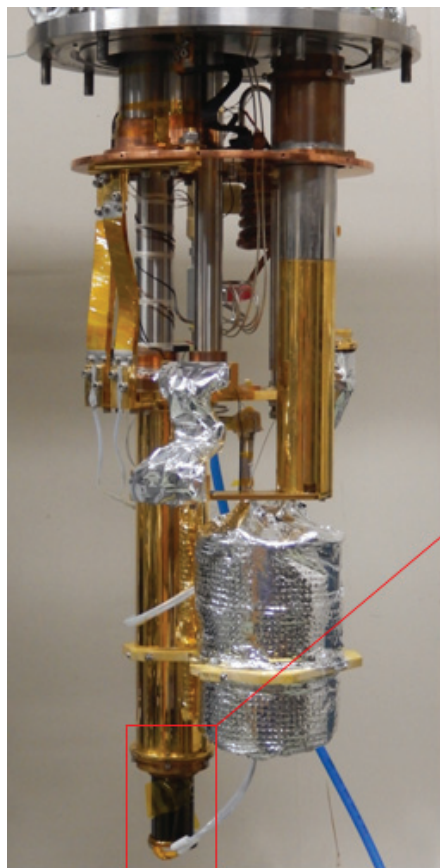
С помощью метода низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии продемонстрирована фазовая синхронизация больших массивов, содержащих свыше 1500 ниобиевых джозефсоновских контактов. При определенных напряжениях смещения V на скане отклика ΔV наблюдаются стоячие волны, связанные с возбуждением резонансных мод вдоль каждой полоски с контактами. Волны оказываются связанными между собой, что приводит к формированию общей двумерной моды, синхронизирующей контакты в массиве. В результате усиливается мощность джозефсоновской генерации в исследуемом субтерагерцовом диапазоне частот 100–300 ГГц. Изучены спектры и диаграммы направленности излучения, создаваемого такими активными джозефсоновскими системами. Проведенные исследования указывают на наличие дальнедействующей синхронизации контактов в массивах с размерами много больше длины волны, что может способствовать созданию на их основе терагерцовых излучателей с мощностью, достаточной для практических применений.

Основные публикации по результату:

- ▶ Physical Review Applied, 14, 024051 (2020);
- ▶ Superconductor Science and Technology, 34, 075005 (2021);
- ▶ IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 31, 1500905 (2021).



Верхний рисунок – скан $\Delta V(x, y)$, полученный методом НТСЛМ. На каждой полоске массива наблюдаются осцилляции $\Delta V(x)$ (нижний рисунок), что указывает на возбуждение резонансных мод, синхронизирующие контакты в массиве



Криогенная установка,
работающая при субкельвиновых температурах
(внешний корпус и тепловые экраны
демонтированы)



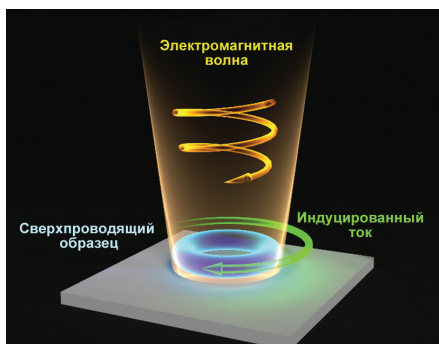
Сверхпроводящий магнит
и держатель образца
на третьей ступени
(в открытом состоянии)

Оптическая инженерия вихревых состояний в сверхпроводниках

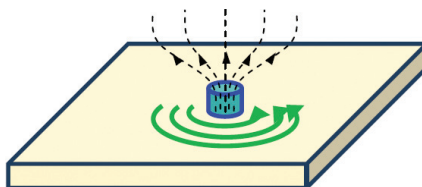
Предложен механизм оптической инженерии магнитных состояний в сверхпроводниках, основанный на обратном эффекте Фарадея. Показано, что электромагнитное излучение круговой поляризации индуцирует бездиссипативный ток и не зависящий от времени магнитный момент в отсутствие источников стороннего магнитного поля. Направление магнитного момента контролируется направлением вращения электромагнитных полей в падающей волне. В сверхпроводящих мезоскопических образцах и кольцах короткий лазерный импульс способен индуцировать магнитные вихри – топологически защищенные состояния, существующие в течение продолжительного времени после выключения излучения. Полученные результаты являются важным шагом к пониманию фундаментальных явлений на стыке оптики, магнетизма и сверхпроводимости и могут позволить реализовать принципиально новые сверхбыстрые механизмы оптического управления токовыми и магнитными состояниями в устройствах сверхпроводящей электроники и спинтроники.

Основные публикации по результату:

- ▶ Physical Review Letters, **126**, 137002 (2021);
- ▶ Nano Letters, **20**, 6488 (2020);
- ▶ Physical Review B, **106**, 174504 (2022).



Циркулярно-поляризованная волна и индуцированный ею ток



Вихрь Абрикосова

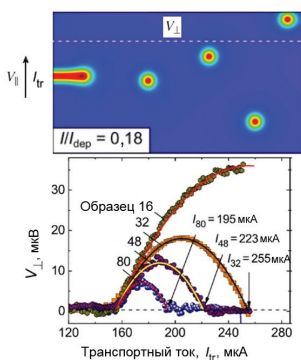
Динамика взаимодействующих вихрей вблизи краевого дефекта в сверхпроводнике

Теоретически и экспериментально исследована динамика счетного числа вихрей вблизи одиночного краевого дефекта (разреза) в узкой сверхпроводящей полоске. Впервые обнаружено образование упорядоченного веера вихрей и поперечного («холловского») напряжения, обусловленных взаимным отталкиванием вихрей. При приложении магнитного поля, перпендикулярного плоскости полоски, преимущественное зарождение вихрей на разрезе приводит к неважному, диодному, эффекту протекания тока в сверхпроводящей пленке, с рекордным отношением величин критических токов, текущих в противоположных направлениях. Полученные оценки скорости движения вихрей свыше 2 км/с свидетельствуют о возможности использования этого эффекта для реализации низкотемпературного сверхпроводящего диода в гигагерцовом диапазоне частот.

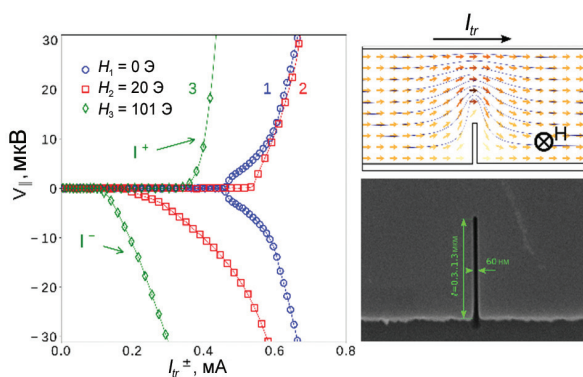
Показано, что на вольт-амперной характеристике (ВАХ) сверхпроводящей полоски с разрезом существуют изломы («кинки»), которые связаны с последовательным дискретным увеличением количества движущихся вихрей при росте тока в полоске, что указывает на возможность контроля количества движущихся вихрей в полоске с помощью тока. Обнаружено, что наличие нормального слоя, имеющего хороший электрический контакт со сверхпроводником, позволяет увеличить максимальную скорость вихрей, а также обеспечить безгистерезисные ВАХ сверхпроводящего мостика, что может быть полезно при практической реализации сверхпроводящего диода.

Основные публикации по результату:

- ▶ Physical Review B, **105**, 214507 (2022);
- ▶ Письма в ЖЭТФ, **115**, 658 (2022);
- ▶ ЖЭТФ, **162**, 262 (2022).



Вихревой веер



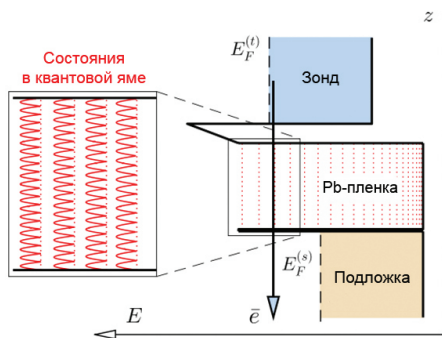
Диодный эффект

Диагностика тонких металлических пленок с помощью туннельной интерферометрии

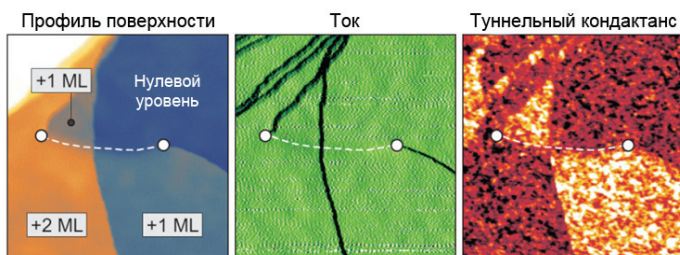
Методами низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии экспериментально исследованы особенности дифференциальной проводимости тонких пленок Pb(111), связанные с наличием уровней размерного квантования. Показано, что локальная дифференциальная проводимость dI/dV зависит от напряжения и от локальной толщины образца. Это позволяет проводить визуализацию участков тонких пленок и островков различной толщины, а также точечных и протяженных дефектов под слоем металла, например, ступеней монокристаллической подложки, инородных включений и скрытых частей дислокационных петель.

Основные публикации по результату:

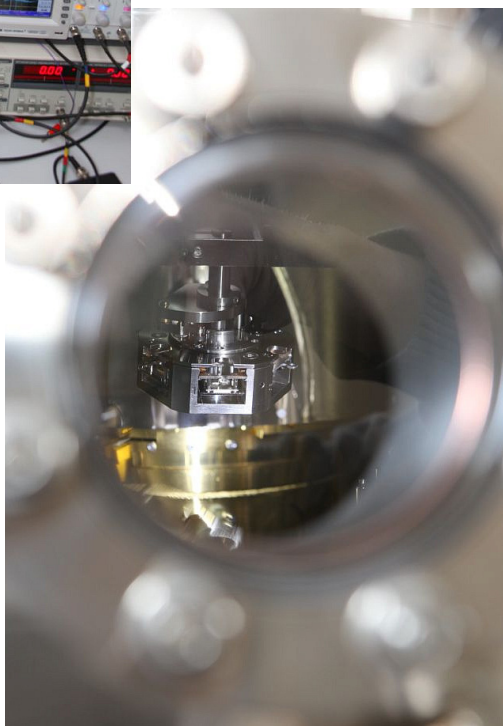
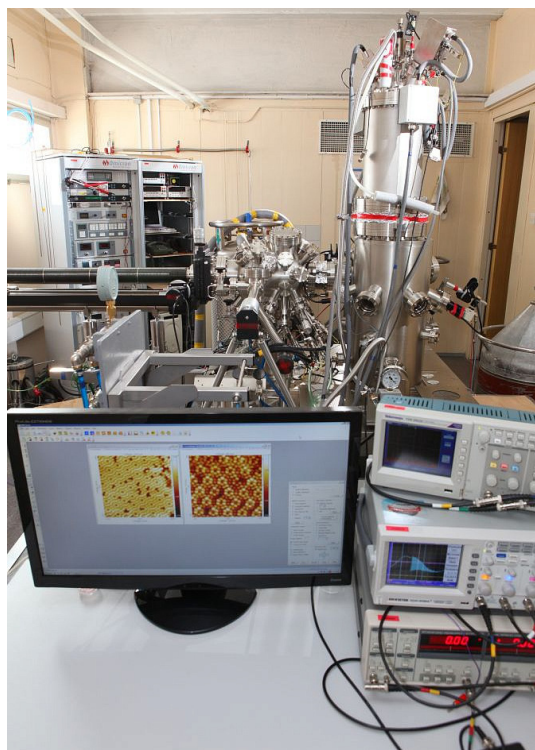
- ▶ Письма в ЖЭТФ, 109, 789 (2019);
- ▶ Journal of Physics: Condensed Matter, 32, 435001 (2020);
- ▶ Journal of Physical Chemistry C, 125, 26814 (2021);
- ▶ Journal of Physical Chemistry C, 126, 13341 (2022).



Схематическое представление когерентного резонансного туннелирования электронов из иглы туннельного микроскопа в образец через уровни размерного квантования, локализованные внутри тонкой металлической пленки Pb(111)



Топографическое изображение поверхности пленки Pb(111) и карты пространственных вариаций туннельного тока и дифференциальной туннельной проводимости. Точки указывают положение винтовых дислокаций, пунктирная линия соответствует проекции подповерхностной дислокационной петли на поверхность образца

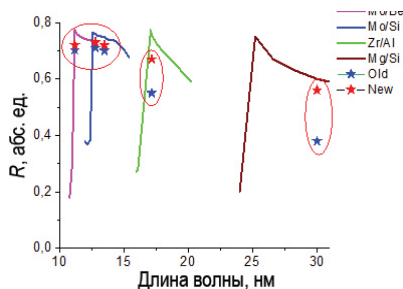


Установка сверхвысоковакуумного
низкотемпературного сканирующего
туннельного микроскопа
Omicron Nanotechnology

Многослойные зеркала на основе бериллия для диапазона длин волн 11,1–30,4 нм

Развита технология напыления многослойных зеркал на основе бериллия для диапазона длин волн 11,1–30,4 нм, обеспечивающая коэффициенты отражения, существенно превышающие мировой уровень. Повышение отражательной способности связано как с высокой прозрачностью бериллия, так и с уменьшением межслоевой шероховатости в многослойных зеркалах при введении в них бериллия в качестве прослойки.

Путем введения бериллиевых разделительных слоев коэффициент отражения Mo/Si многослойных зеркал, применяемых в схемах проекционной литографии, удалось увеличить с 70 до 71±71,6% на длине волны 13,5 нм и до 72,8% на длине волны 12,9 нм, что является лучшим результатом из опубликованных. Для проекционной литографии



Спектральная зависимость коэффициента отражения многослойных зеркал. Сплошные линии – теоретический предел коэффициента отражения, звезды – экспериментальные результаты (синим – достигнутые на зеркалах без Ве, красным – для Ве-содержащих зеркал)

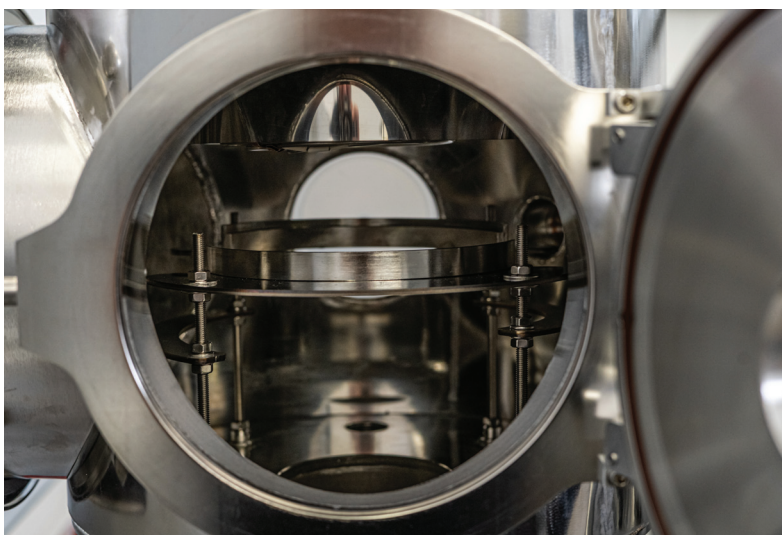
с длиной волны короче 13,5 нм получены зеркала на основе пары Ru/Ве с барьерными слоями Мо толщиной 0,2 нм на границе Ru-на-Ве и 0,4 нм – на границе Ве-на-Ru. Их коэффициент отражения достигает 72,2% на длине волны 11,4 нм со спектральной шириной пика отражения на половине высоты 0,38 нм. По сравнению с мировыми достижениями коэффициент отражения в относительных единицах вырос на 4,2%, а спектральная ширина отражения – на 8,6%. Для задач изучения короны Солнца в диапазоне длин волн 17–30,4 нм получены зеркала на основе Al/Be/Si и Be/Mg. Путем использования прослоек Si с целью сглаживания межслоевых границ в зеркалах Be/Si/Al для длины волны 17,1 нм получен рекордный коэффициент отражения 62,5% со спектральной шириной 0,3 нм. Показана высокая временная стабильность данных зеркал. Предложены, синтезированы и изучены структурные, рентгенооптические характеристики и временная стабильность Ве/Mg многослойных зеркал. Найден материал защитного слоя (Al) и определена его оптимальная толщина (13 нм), а также порядок следования слоев в Ве/Mg многослойных зеркалах (Al наносится на Ве), что обеспечивает высокую временную стабильность их отражательных характеристик. Для зеркал (защитный слой Al/Be/[Ве/Mg]×60) получен рекордный коэффициент отражения 56% на длине волны 30,4 нм.

Основные публикации по результату:

- ▶ Optics Express, **26**, 33718 (2018);
- ▶ Journal of Nanoscience and Nanotechnology, **19**, 546 (2019);
- ▶ Optics Letters, **44**, 263 (2019);
- ▶ Успехи физических наук, **190**, 92 (2020);
- ▶ Optics Express, **30**, 46749 (2020).



Установки магнетронного напыления Ве-содержащих многослойных рентгеновских зеркал



Процесс шлюзовой загрузки подложки рентгеновского зеркала

Безэталонный интерферометр с дифракционной волной сравнения

Разработан безэталонный интерферометр с дифракционной волной сравнения, предназначенный для высокоточных измерений формы оптических элементов и aberrаций оптических систем. Используемый в интерферометре источник сферической волны сравнения на основе одномодового оптического волокна с субволновой выходной апертурой обладает рядом преимуществ перед традиционной дифракцией света на субмикронном отверстии:

- возбуждение собственной моды в волноводе, что исключает aberrации волнового фронта на выходе источника, индуцированные aberrациями и погрешностями юстировки первичной оптики;

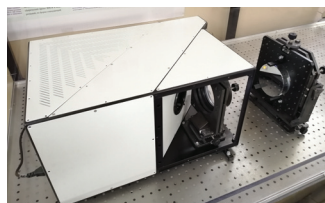
- высокая интенсивность дифрагированной волны при размерах выходной апертуры на уровне 0,2–0,3 мкм из-за большого диаметра кода оптоволокна на входе;

- возможность самокалибровки точности измерений интерферометра при помощи эксперимента Юнга по интерференции волн от двух источников.

Прибор обеспечивает точность измерений лучше 1 нм в числовой апертуре $NA = 0,28$, которая может быть дополнительно увеличена путем использования корректоров волнового фронта. Управление интерферометром – регистрация интерферограмм и восстановление aberrаций волновых фронтов – производится с помощью созданного программного обеспечения. Разработанный интерферометр находит свое применение в индустрии.

Основные публикации и РИД по результату:

- ▶ Успехи физических наук, **190**, 74 [2020];
- ▶ Precision Engineering, **72**, 330 [2021];
- ▶ Optics Letters, **47**, 3459 [2022];
- ▶ Патент № 2748827, приоритет от 27.10.2020;
- ▶ Патент № 2760920, приоритет от 03.06.2021;
- ▶ Патент RU 2793080 C1, приоритет от 29.09.2022.



Внешний вид интерферометра

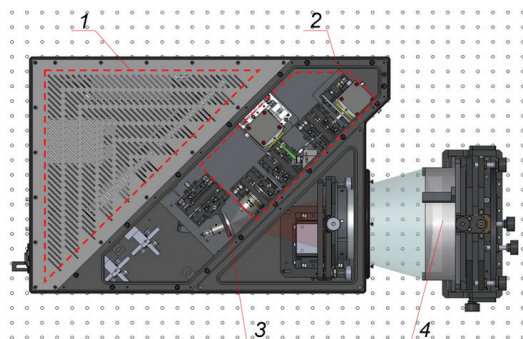
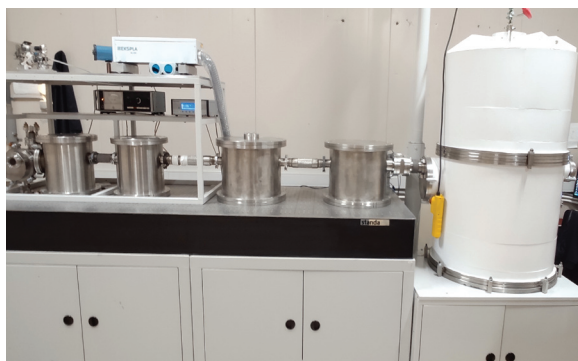


Схема интерферометра: 1 – отсек со стабилизированным He-Ne-лазером, 2 – оптическая часть регистрирующей системы, 3 – интегрированный модуль источника эталонной сферической волны на 5D-столе, 4 – вогнутое сферическое зеркало на 5D-столе

Рефлектометр высокого разрешения для экстремального УФ и мягкого рентгеновского диапазонов – «лабораторный синхротрон»

На основе лазерно-плазменного источника излучения и монохроматора с плоской дифракционной решеткой, по схеме Черни – Тернера, разработан рефлектометр, предназначенный для прецизионных измерений характеристик рентгенооптических элементов. Рабочий диапазон длин волн прибора 1–60 нм, спектральное разрешение до 0,028 нм, размер зондирующего пучка на образце 0,32×0,14 мм, диаметр исследуемых образцов до 500 мм. Потери эффективности монохроматора из-за дополнительных двух отражений по сравнению с роуландовскими схемами компенсированы применением двухслойных отражающих покрытий



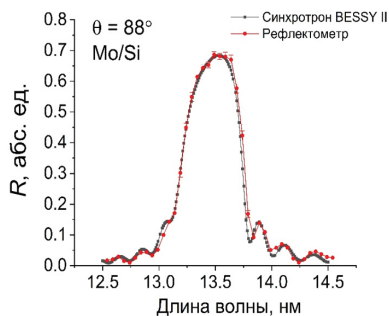
Внешний вид рефлектометра

зеркал-коллиматоров, дифракционной решетки и ионной полировки штрихов решетки. Светосила и спектральное разрешение прибора могут быть увеличены в 2–3 раза путем асферизации зеркал-коллиматоров. По совокупности характеристик рефлектометр существенно превосходит мировые аналоги и может использоваться для решения спектроскопических задач в различных областях физики и химии. Сравнительные измерения показали хорошее согласие результатов, полученных на рефлектометре, с измерениями этой же структуры в метрологическом центре на синхротроне BESSY II (Берлин, Германия).

Основные публикации по результату:

- ▶ Review of Scientific Instruments, **91**, 063103 [2020];
- ▶ Журнал технической физики, **90**, 1864 [2020].

Результат сравнения измеренной спектральной зависимости коэффициентов отражения Mo/Si многослойного зеркала с данными, полученными на синхротроне BESSY II

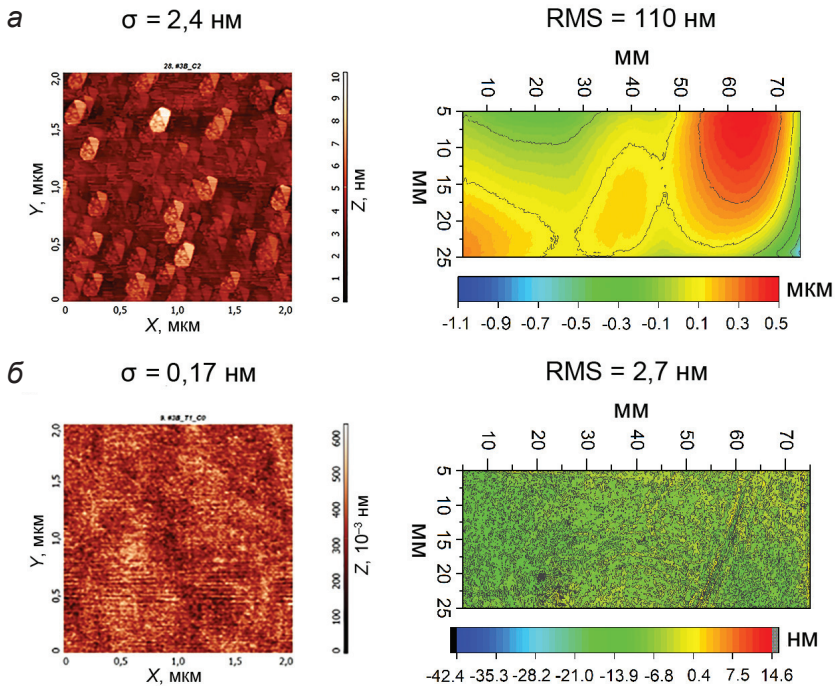


Прецизионная ионно-пучковая обработка поверхности оптических элементов на основе монокристаллического кремния

Разработана методика формирования поверхности рентгенооптических элементов для мощных источников синхротронного излучения 3+ и 4-го поколения (СКИФ, Россия, и ESRF, Франция) на основе монокристаллического кремния. Совокупность физико-механических и теплофизических свойств делает именно монокристаллический кремний наиболее перспективным материалом для подложек рентгеновских зеркал и элементов кристалла-монокроматора для мощных источников синхротронного излучения. Формообразование осуществляется методом прецизионной ионно-пучковой обработки. Было обнаружено, что существует пороговая энергия (~500 эВ) бомбардирующих поверхность ионов аргона, выше которой подавляется развитие шероховатости поверхности при ионном распылении монокристаллического кремния, и даже наблюдается ее сглаживание. Выявленная зависимость шероховатости поверхности от энергии распыляющих ионов связывается с аморфизацией приповерхностного слоя кремния, что подтверждает исследование методом комбинационного рассеяния света. Благодаря аморфизации приповерхностного слоя монокристаллический материал начинает вести себя как аморфный, для которого уже наблюдались эффекты ионной полировки.



Экспериментальная установка ионного травления



Шероховатость и форма поверхности кристалла-монократора из монокристаллического Si(110) до обработки (а) и после ионно-пучковой обработки поверхности (б)

Обнаруженный эффект позволяет использовать ионно-пучковое травление для формирования рентгенооптических элементов из монокристаллического кремния, что увеличит возможности современных и перспективных источников рентгеновского излучения. Разработанная методика была использована для изготовления из монокристаллического Si(110) кристалла-монократора для линии Nuclear Resonance Beamline (ID18) (энергия фотонов 7–80 кэВ) синхротрона 4-го поколения ESRF (Франция). Форма поверхности кристалла по параметру RMS была улучшена более чем в 40 раз от исходных 110 нм до 2,7 нм, а шероховатость поверхности уменьшена с 2,5 нм до 0,20 нм. Обработанный кристалл-монокротор позволил получить монохроматизированный пучок размером не более 10,0×5,0 мкм.

Основные публикации по результату:

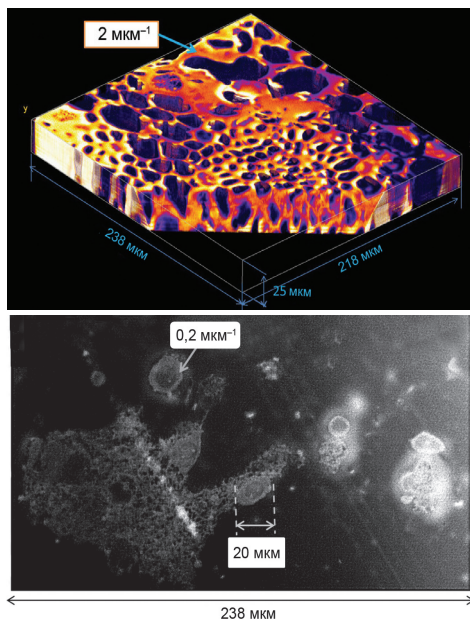
- ▶ Журнал технической физики, 92, 1219 (2022);
- ▶ Applied Optics, 61, 2825 (2022);
- ▶ Applied Optics, 61, 9879 (2022);
- ▶ Nuclear Instruments & Methods B, 534, 97 (2023).

ЭУФ-микроскоп на длине волны 13,84 нм с возможностью z-томографии

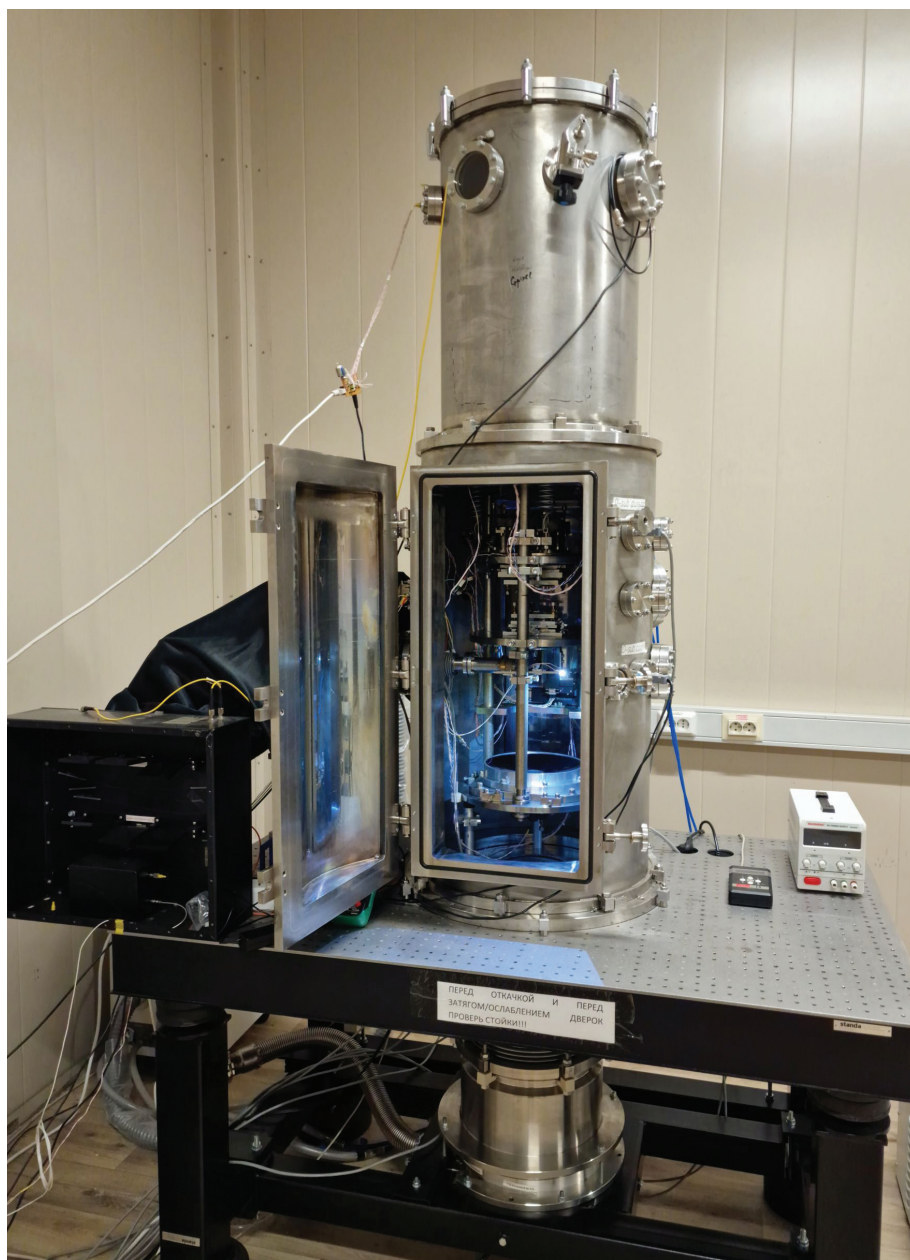
Разработан ЭУФ-микроскоп на длину волны 13,84 нм на основе лазерно-плазменного источника с импульсной аргоновой газовой мишенью и многослойных асферических ЭУФ-зеркал. В измерениях предусмотрен сдвиг образцов вдоль оптической оси для получения z-среза их латеральных сечений, который далее обрабатывается по предложенному алгоритму: выравнивание, вычитание шума, логарифмирование и деконволюция. Путем сведения ошибки формы изготовленных зеркал до нанометровых значений были получены aberrации объектива на уровне $\lambda/5$ по среднеквадратическому отклонению и, как следствие, близкая к дифракционному пределу функция рассеяния точки. На основе трехмерной функции рассеяния точки, смоделированной по измеренным aberrациям, была проделана деконволюционная реконструкция 3D-изображений. Данный подход позволил получить пиксельное латеральное разрешение микроскопа (140 нм) и 3-пиксельное аксиальное. Микроскоп может быть использован в «водном окне» ($\lambda = 2,3\text{--}4,4$ нм) для изучения объектов толщиной 10–15 мкм, в том числе живых образцов, с разрешением до 50 нм.

Основные публикации по результату:

- ▶ Ultramicroscopy, 202, 76 (2019);
- ▶ Optics Express, 30, 47567 (2022).



Трехмерное ЭУФ-изображение фиксированного среза стебля ландыша (вверху), и двумерное ЭУФ-изображение фиксированного 0,5 мкм среза первичных клеток гиппокампа мыши (внизу)



Внешний вид ЭУФ-микроскопа

Матричные системы радиовидения

Предложен новый подход к созданию систем радиовидения матричного типа, основанный на использовании плотной матрицы (период матрицы составляет порядка длины волны излучения) приемников прямого преобразования, расположенной в фокальной плоскости квазиоптического излучения. Для засветки сцены используется сигнал с линейной частотной модуляцией, часть которого играет роль сигнала гетеродина для элементов матрицы. Двумерное изображение сцены определяется распределением мощности принимаемого сигнала в фокальной плоскости объектива, в то время как расстояние до объектов может быть получено из анализа фазы сигнала разностной частоты согласно методу радиолокации непрерывным излучением.

Разработан приемник прямого преобразования простой конструкции для практической реализации предложенного подхода. Приемный элемент состоит из модифицированной щелевой антенны, диода Мотта с пониженной высотой барьера и малошумящего усилителя низкой (до 100 кГц) частоты. Мощность, эквивалентная шуму приемника, сопоставима со значениями, получаемыми в аналогичных приборах, при существенно меньшей мощности гетеродина (не более 100 мкВт) и отсутствии малошумящего усилителя на входе.

Создан макет системы радиовидения на основе приемника прямого преобразования размером 8×8 пикселей. Использовался квазиоптический объектив в виде диэлектрической линзы. Подача мощности гетеродина на приемную матрицу осуществлялась по воздушному каналу. Показано, что угловая разрешающая способность системы не более чем в 1,5 раза превышает дифракционный предел. Использование приемника прямого преобразования вместо приемника прямого детектирования позволило более чем в 10 раз повысить дальность действия системы, а простота конструкции сохранила возможность изготовления матриц большой (≥ 100 элементов) размерности.

Основные публикации по результату:

- ▶ TEEE Sensors Letters, 4, 3500404 (2020);
- ▶ Письма в ЖТФ, 48, 470 (2022);
- ▶ Sensors, 22, 7132 (2022).

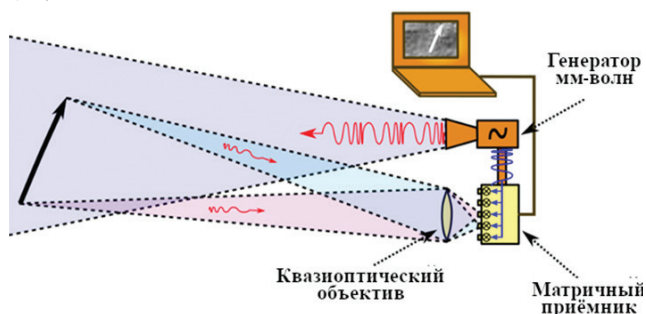
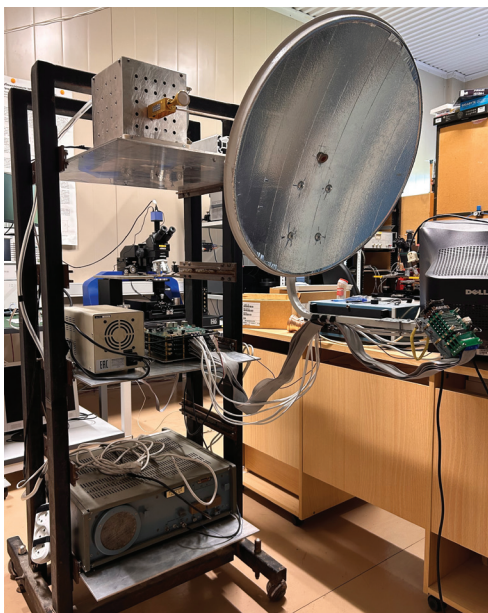
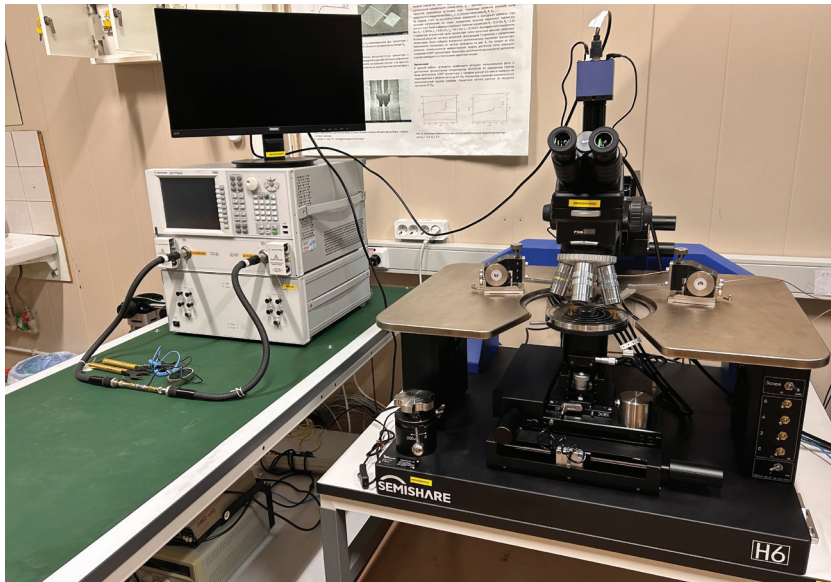


Схема матричной системы радиовидения с модуляцией частоты



Матричная система радиовидения трехмиллиметрового диапазона с модуляцией частоты



Комплекс для сверхвысокочастотной зондовой диагностики наноструктур и приборов

Волоконно-оптические сенсоры

Развита технология изготовления чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков различных физических величин путем формирования встроенных внутриволоконных зеркал с коэффициентом отражения до 15%. На основе данной технологии созданы полностью волоконные датчики акустической эмиссии на внутриволоконных резонаторах Фабри – Перо. Разработанная под данные датчики система регистрации на базе следящего тандемного низкокогерентного интерферометра позволила добиться чувствительности на уровне 0,5 нм (RMS) в полосе частот 1–200 кГц. Была продемонстрирована возможность детектирования сигналов акустической эмиссии, генерируемых при возникновении дефектов в композитных материалах, а также возможность определения местоположения ударного воздействия на композитный элемент.

Разработана технология создания малогабаритного волоконно-оптического датчика температуры на базе кремниевого микрорезонатора, интегрированного с оптическим волокном. Продемонстрирована возможность измерения абсолютных значений температуры с разрешением до 0,1 °С с помощью оригинальной двухволновой низкокогерентной схемы.

Основные публикации и РИД по результату:

- ▶ Sensors and Actuators A: Physical, **316**, 112385 (2020);
- ▶ Sensors, **21**, 7343 (2021);
- ▶ Sensors, **23**, 772 (2023);
- ▶ Патент RU2775379, приоритет от 12.04.2021.

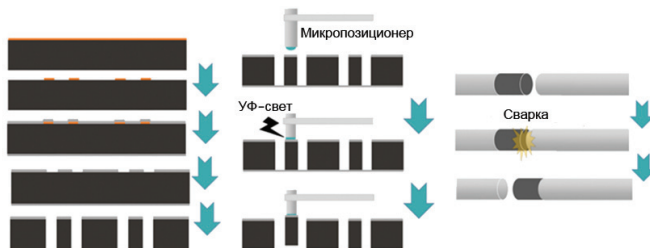
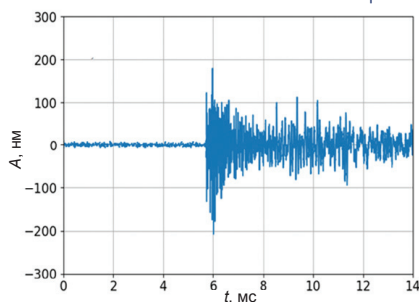


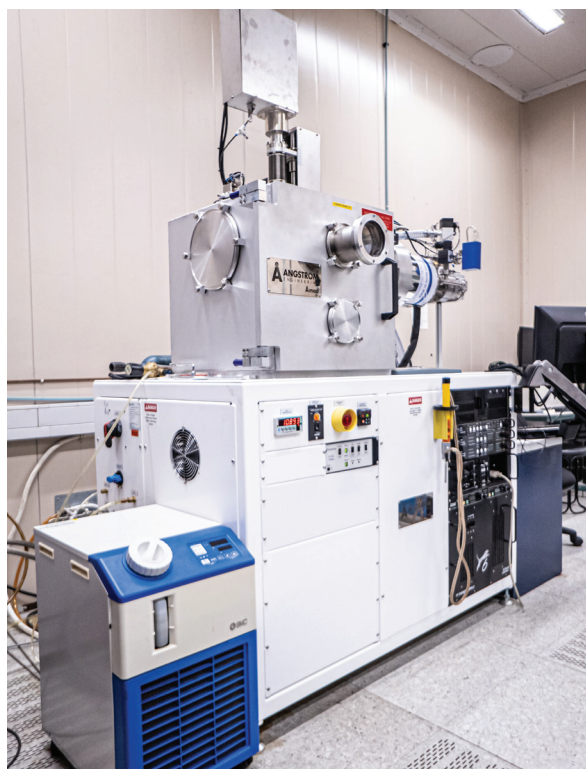
Схема изготовления волоконно-оптического датчика температуры на базе кремниевого микрорезонатора



Сигнал акустической эмиссии после слабого ударного воздействия, записанный волоконно-оптической системой регистрации. Рабочая полоса частот 1–200 кГц



Установка плазменной обработки Pico



Вакуумная установка резистивного и электронно-лучевого испарения с холловским ионным источником Amod 206

Органическая фотовольтаика

Разработана технология изготовления тонкопленочных фотовольтаических преобразователей на основе синтетических (фталоцианинов) и природных (петропорфиринов) молекулярных полупроводников. Первые – доступные на рынке пигменты, а вторые представляют собой побочный продукт нефтепереработки. В результате полностью вакуумного процесса получены прототипы полупрозрачных, с пропусканием до 45%, либо панхроматических солнечных ячеек, в том числе на гибких полимерных подложках. В зависимости от схемы устройства разделение зарядов происходит либо вблизи металлического контакта, либо в области p/n -перехода, органического или гибридного.

Получены данные, связывающие изменения структуры макроциклического лиганда с фазовыми свойствами тонких слоев (оптическими, проводящими). Установлено, что геометрия макроагрегатов и/или ориентация молекулярных плоскостей относительно ростовой поверхности, а следовательно и подвижность носителей заряда, задается региоизомерным состоянием молекулы этиопорфирина и координирующим металлоатомом. Так, у пленок изомера II этиопорфирина Cu^{2+} , выращенных при комнатной температуре и при $100\text{ }^\circ\text{C}$, удельная проводимость может различаться в 1000 раз, в то время как у этого же изомера Ni^{2+} – всего в 2 раза.

Основные параметры фотопреобразования в простейших прототипах с полностью порфириновым одиночным p/n -переходом, несмотря на узкий диапазон спектральной активности (380–480/500–600 нм), соответствуют мировому уровню для данного класса устройств: плотность фототока $J_{sc} = 6\text{ мВт/см}^2$, фото-э.д.с. $U_{oc} = 0,7\text{ В}$, коэффициент заполнения $FF = 55\%$, к.п.д. = 3,6% в условиях диффузной инсоляции.

Основные публикации по результату:

- ▶ RSC Advances, **11**, 15131 [2021];
- ▶ Journal of Materials Science: Materials in electronics, **32**, 17791 [2021];
- ▶ Colloids and Interfaces, **6**, 77 [2022];
- ▶ Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, **648**, 129284 [2022];
- ▶ ChemPlusChem, **88**, e202300141 [2023].

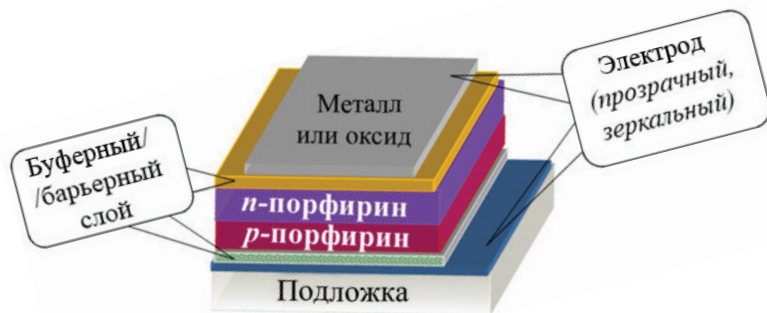
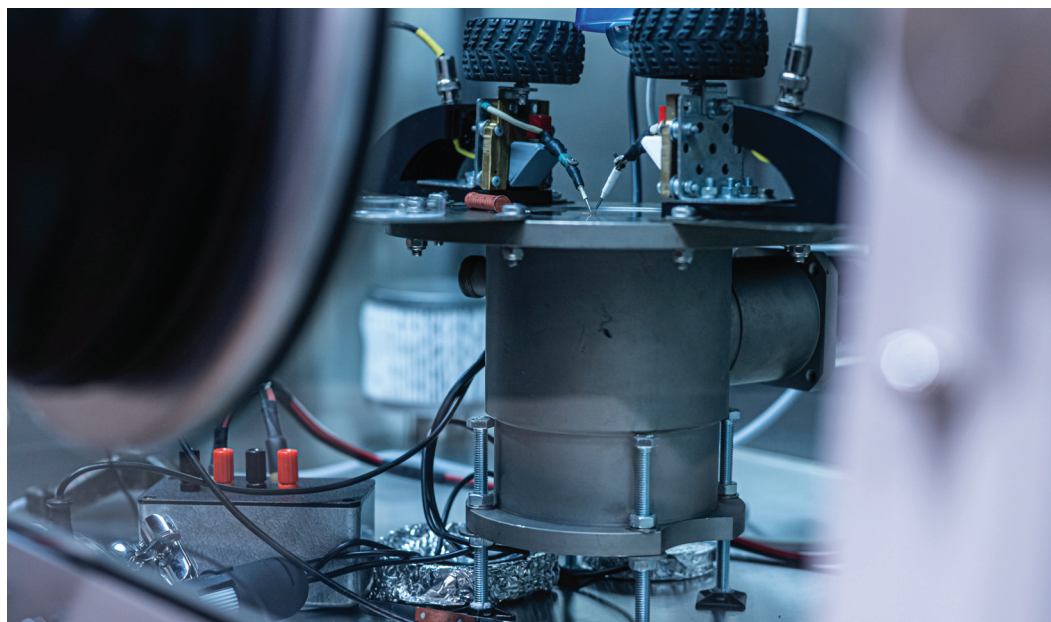
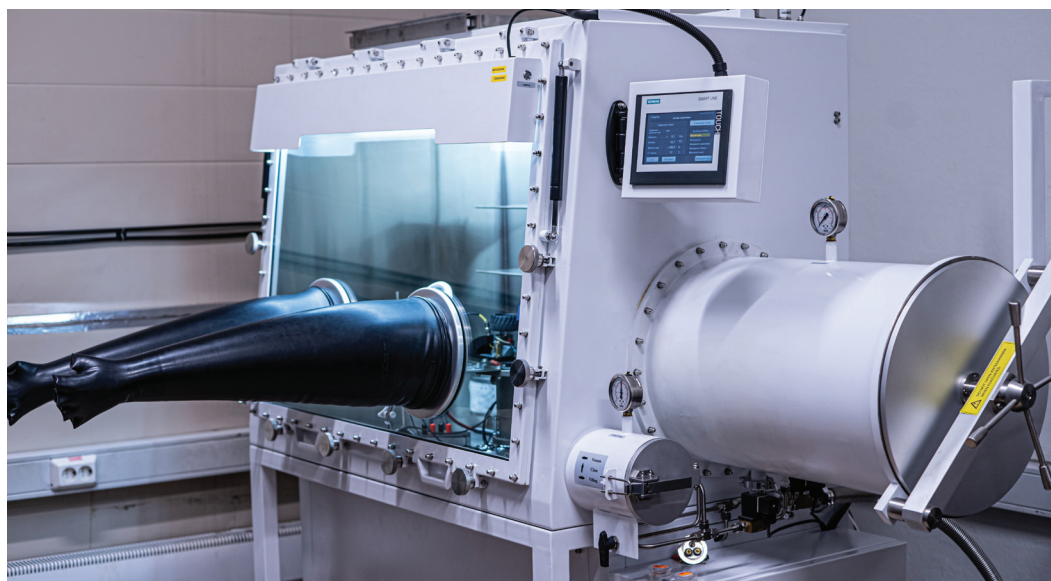


Схема фотовольтаической ячейки с планарным молекулярным p/n -переходом



Зондовая станция для измерения электрических характеристик тонкопленочных структур



Перчаточный бокс с высокочистой инертной атмосферой

Планарные сверхпроводящие структуры на основе эпитаксиальных пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$

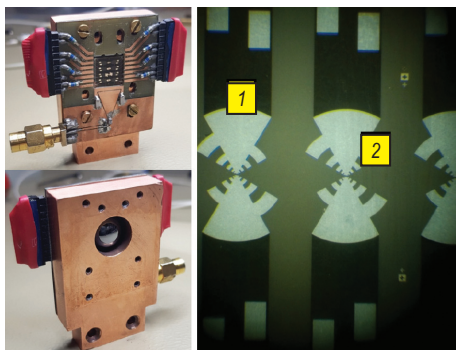
Разработан новый подход к формированию планарных сверхпроводящих структур на основе эпитаксиальных пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ (YBCO) – метод задающей маски. Отличительной особенностью метода является осаждение пленки YBCO на завершающем этапе формирования структуры в локальные области, когда в окнах маски формируются сверхпроводящие элементы, а между ними – изолирующие области.

С помощью развитого метода на бикристаллических фианитовых подложках были изготовлены джозефсоновские смесители ГГц- и субТГц-диапазонов частот. Получена зависимость мощности промежуточной частоты от мощности внешнего сигнала при учете коэффициента усиления теплового и холодного ВЧ-усилителей (45 дБ) и полосы разрешения 1 МГц. Для оптимального уровня накачки частотой 5,137 ГГц и внешнего сигнала 170 ГГц найдены минимальные потери на преобразовании, которые составили –57 дБ. Проведены исследования гармоник низкочастотной сверхрешетки с опорным сигналом 30 ГГц с помощью джозефсоновского YBCO-смесителя с целью определения максимально наблюдаемой гармоники сверхрешетки. В результате исследования удалось зарегистрировать сигнал вплоть до восьмой гармоники сверхрешетки с частотой 240 ГГц.

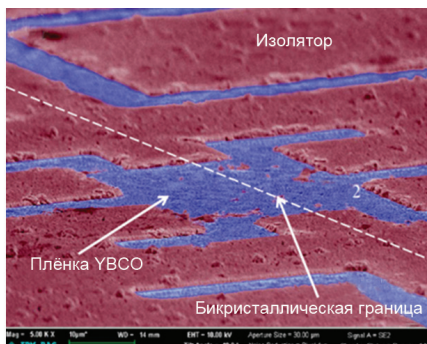
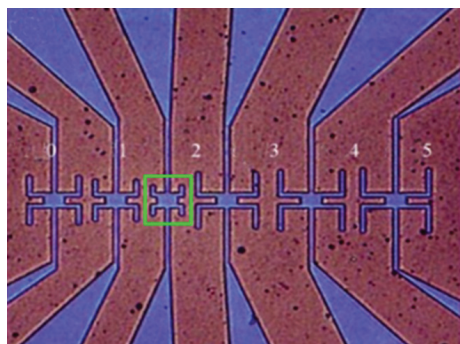
На основе бикристаллических длинных джозефсоновских переходов, работающих в режиме бегущей волны, созданы генераторы сигналов в диапазоне 100–800 ГГц с низкими шумами, что позволило создать криогенный измерительный стенд для исследования амплитудно-частотных характеристик низкотемпературных приемников.

Основные публикации и РИД по результату:

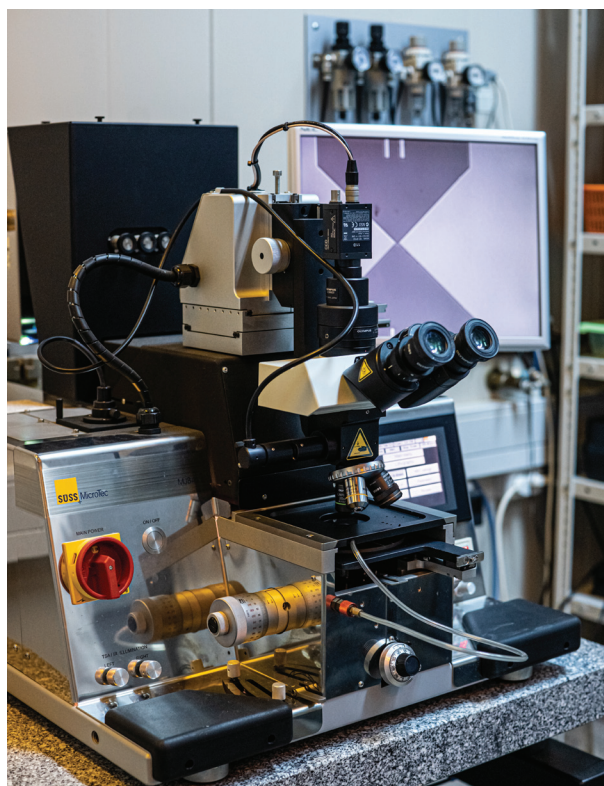
- ▶ Superconductor Science and Technology, **31**, 045002 (2018);
- ▶ Applied Science, **10**, 7667 (2020);
- ▶ Beilstein Journal of Nanotechnology, **12**, 1279 (2021);
- ▶ Applied Sciences, **12**, 11960 (2022);
- ▶ Патент RU 188983, приоритет от 30.07.2018.



Джозефсоновский смеситель, установленный на держатель с линзой (слева) и образец с тремя структурами YBCO-детекторов (справа): 1 – сверхпроводящая пленка; 2 – лог-периодическая антенна из YBCO, покрытая серебром



Снимки джозефсоновских сверхпроводящих генераторов с дипольными антеннами, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа: общий вид серии структур (слева) и детальное изображение активной области структуры [область структуры № 2] (справа)



Установка проекционной фотолитографии Suss MJB4

Эффекты поля в туннельных магнитных контактах

Отработана технология изготовления туннельных магниторезистивных (ТМР) контактов $\text{CoFeB}/\text{MgO}/\text{CoFeB}/\text{IrMn}$, демонстрирующих магнетосопротивление величиной до 200% при комнатной температуре. Туннельные контакты с толщиной барьера в 1–2 нм позволяют создавать в них сильные электрические поля, достигающие значений 10^9 В/м, что близко к внутренним атомарным полям. Данное сильное электрическое поле изменяет профиль потенциального барьера, в результате чего может изменяться величина межслоевого обменного взаимодействия ферромагнитных слоев туннельного контакта. Эффект проявляется в сдвиге кривой магнетосопротивления по магнитному полю при приложении напряжения к туннельному контакту, что дает возможность управлять магнитным и резистивным состоянием системы приложением электрического поля. Это открывает новые возможности для разработки энергоэффективной магнитной памяти.

Обнаружен эффект, обусловленный сильным электрическим полем в туннельном контакте, заключающийся в спин-орбитальном рассеянии туннелирующих в контакте электронов непосредственно на этом поле, что приводит к поперечному току (внешний туннельный эффект Холла). В отличие от известных аномальных эффектов Холла, когда рассеяние электронов происходит на встроенных атомарных полях, и поэтому линейных по внешнему электрическому полю ($U_{\text{Hall}} \sim j \sim E$), обнаруженный внешний эффект Холла квадратичен по приложенному полю, а знак возникающего холловского напряжения не зависит от направления протекания тока ($U_{\text{Hall-SO}} \sim jE \sim E^2$).

Основные публикации по результату:

- ▶ Журнал технической физики, **89**, 11 (2019);
- ▶ Письма в ЖЭТФ, **111**, 12 (2020);
- ▶ Physical Review B, **106**, L220408 (2022).

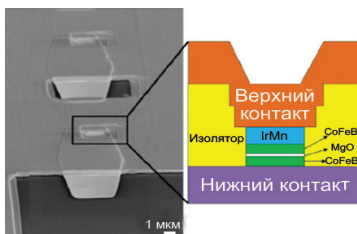
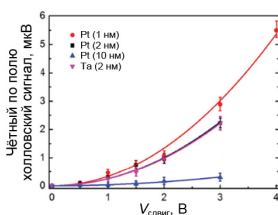
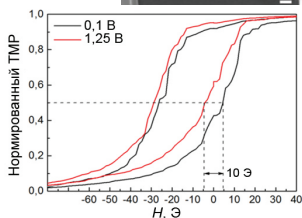
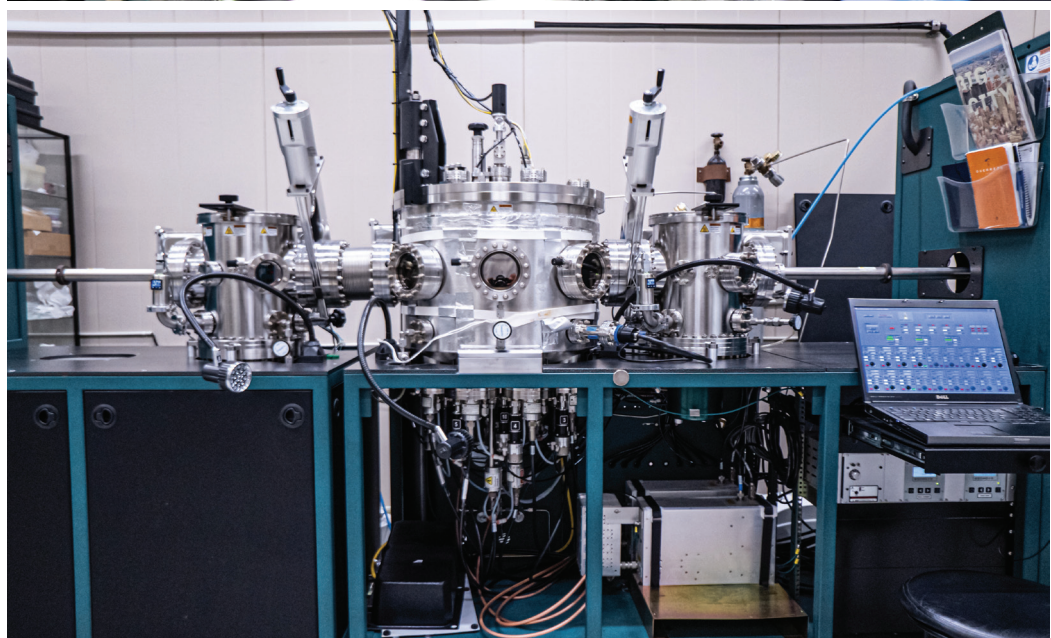
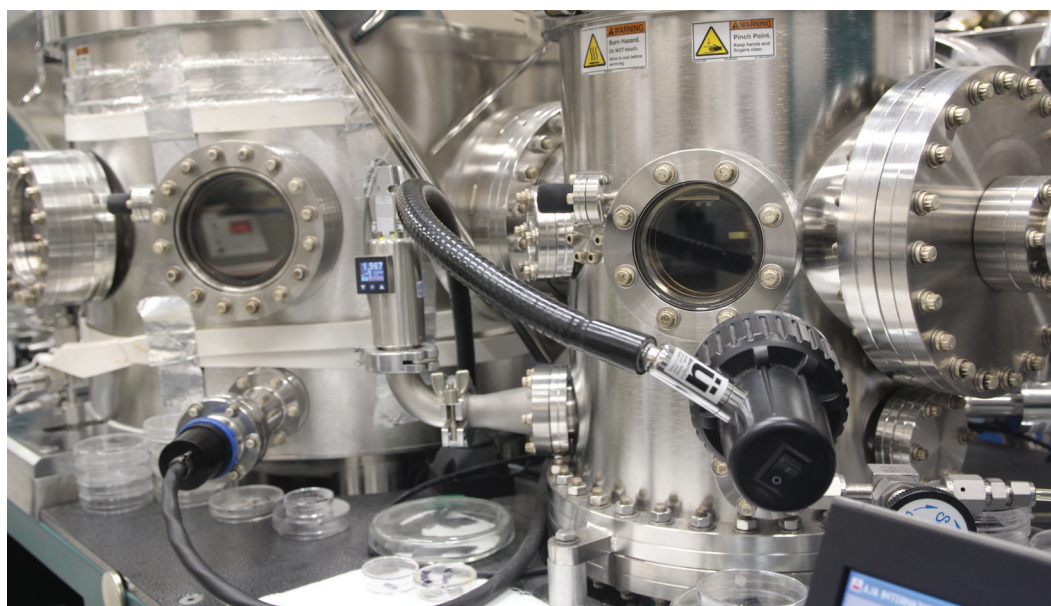


Схема ТМР-контакта и его СЭМ-изображение



Кривые магнетосопротивления ТМР-контакта при различных приложенных напряжениях (слева) и квадратичная зависимость внешнего туннельного эффекта Холла от приложенного напряжения (справа)



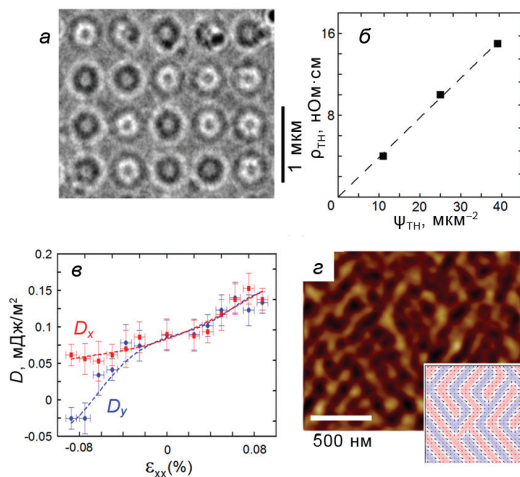
Установка магнетронного напыления «AJA» в разных ракурсах

Магнитные системы с топологическим зарядом

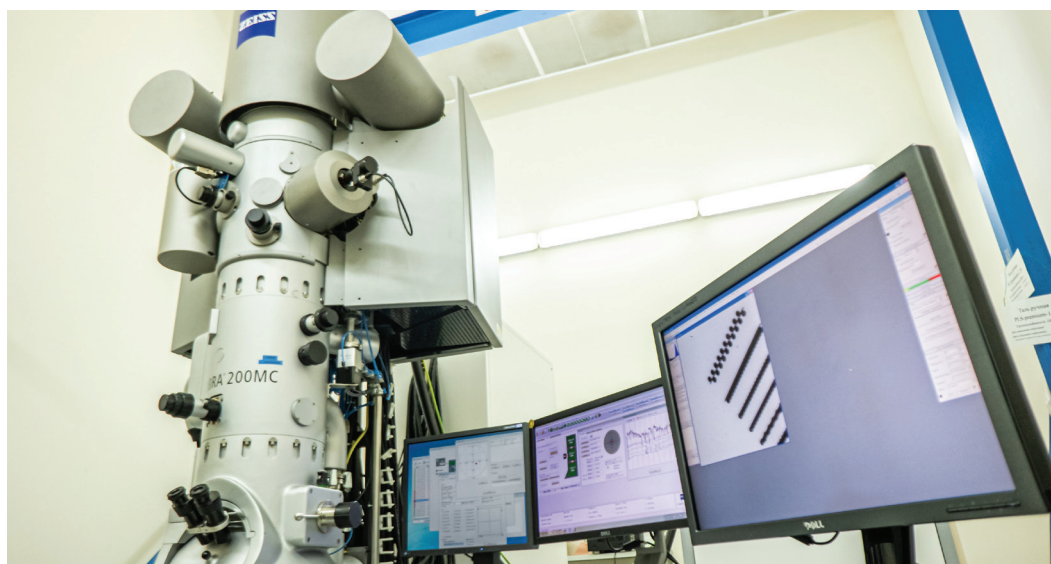
Созданы наноструктуры на основе многослойных пленок Co/Pt, в которых реализуется сильное взаимодействие Дзялошинского – Мория, приводящее к формированию необычных магнитных структур, обладающих топологическим зарядом (магнитные скирмионы). Методом локального наномодифицирования фокусированными ионными пучками сформированы плотные регулярные решетки магнитных скирмионов с высокой плотностью топологического заряда. Измерения транспортных и магнитооптических свойств решеток скирмионов позволили впервые прямыми экспериментальными методами обнаружить и исследовать топологический эффект Холла в пленках переходного металла (Co) при комнатной температуре. Показано, что механические деформации пленок Co/Pt сильно влияют на свойства взаимодействия Дзялошинского – Мория и могут приводить к изменению знака взаимодействия или к его анизотропии. Методами магнитосиловой микроскопии продемонстрировано, что в условиях анизотропного взаимодействия Дзялошинского – Мория происходит формирование нового типа доменных структур – ориентированных зигзагообразных магнитных доменов. Обнаружена зависимость взаимодействия Дзялошинского – Мория от деформаций, что позволяет управлять магнитным состоянием искусственных композитных мультиферроиков при помощи электрического поля.

Основные публикации по результату:

- ▶ Physical Review Letters, **124**, 157202 (2020);
- ▶ Physical Review B, **103**, 054429 (2021);
- ▶ Physical Review B, **105**, 024405 (2022);
- ▶ ACS Applied Electronic Materials, **4**, 3205 (2022).



Изображение решетки блоховских скирмионов в лоренцевом просвечивающем микроскопе (а) и зигзагообразных доменов в пленке Co/Pt с анизотропным взаимодействием Дзялошинского – Мория (б) (на вставке – МСМ-изображение и микромагнитное моделирование). Зависимости величины топологического эффекта Холла в наноструктурированной пленке CoPt от плотности скирмионной решетки (б) и констант взаимодействия Дзялошинского – Мория от величины одноосной деформации магнитной пленки Co/Pt (в).



Просвечивающий электронный микроскоп LIBRA 200MC (Carl Zeiss)



Система подготовки образцов Fischione 1051

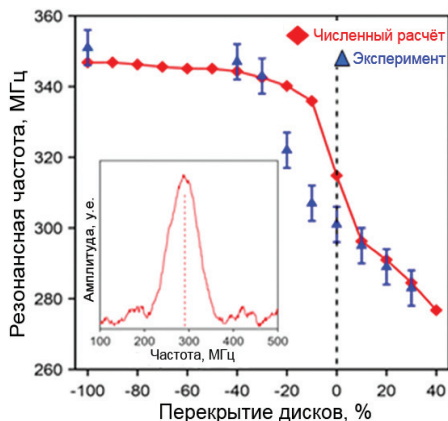
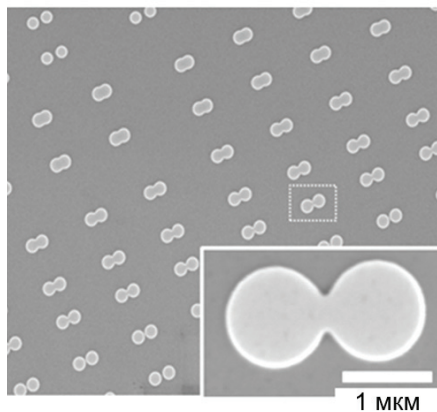
Магнитно-резонансная спектроскопия

Разработана методика магнитно-резонансной спектроскопии на основе магнитосиловой микроскопии (МРСМ). Сконструированный МРСМ микроскоп предназначен для регистрации спектров и пространственных распределений амплитуды вынужденных колебаний намагненности в тонкопленочных ферромагнитных наноструктурах. Микроскоп позволяет проводить измерения в диапазоне частот 9 кГц – 20 ГГц во внешних магнитных полях до 3,5 кЭ.

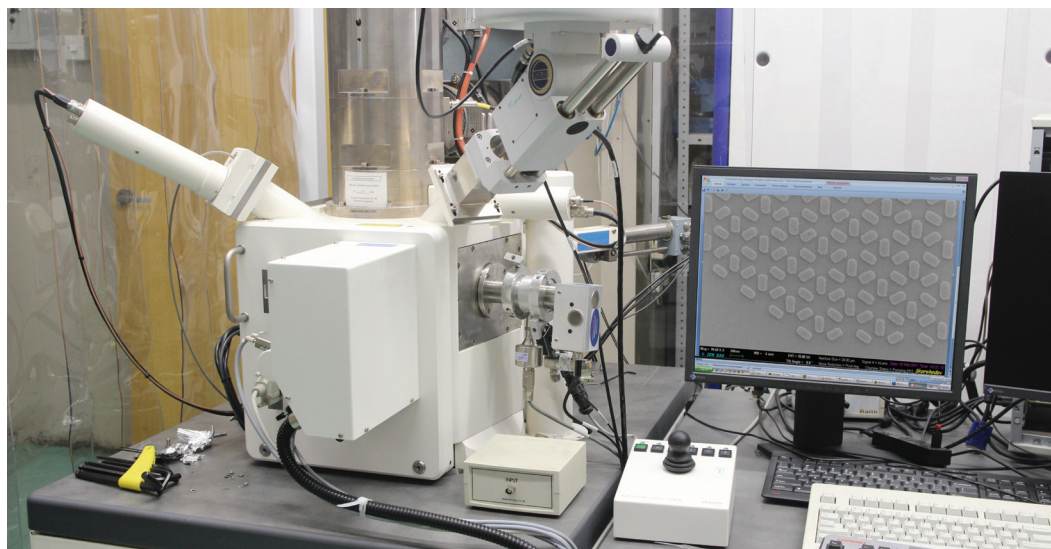
Разработанная методика МРСМ использована для исследования влияния обменного взаимодействия на резонансные свойства систем магнитных частиц с вихревым распределением намагненности. Обнаружено, что основные резонансные частоты вихрей существенно уменьшаются при сближении дисков, что является результатом как усиления дипольного взаимодействия, так и включения обменного взаимодействия между вихрями. Оценка энергии взаимодействия между вихрями в системах двух перекрывающихся пермаллоевых дисков свидетельствует о существенном увеличении энергии связи в результате обменного взаимодействия, что может быть использовано для фазовой синхронизации вихревых спин-трансферных наносцилляторов.

Основные публикации по результату:

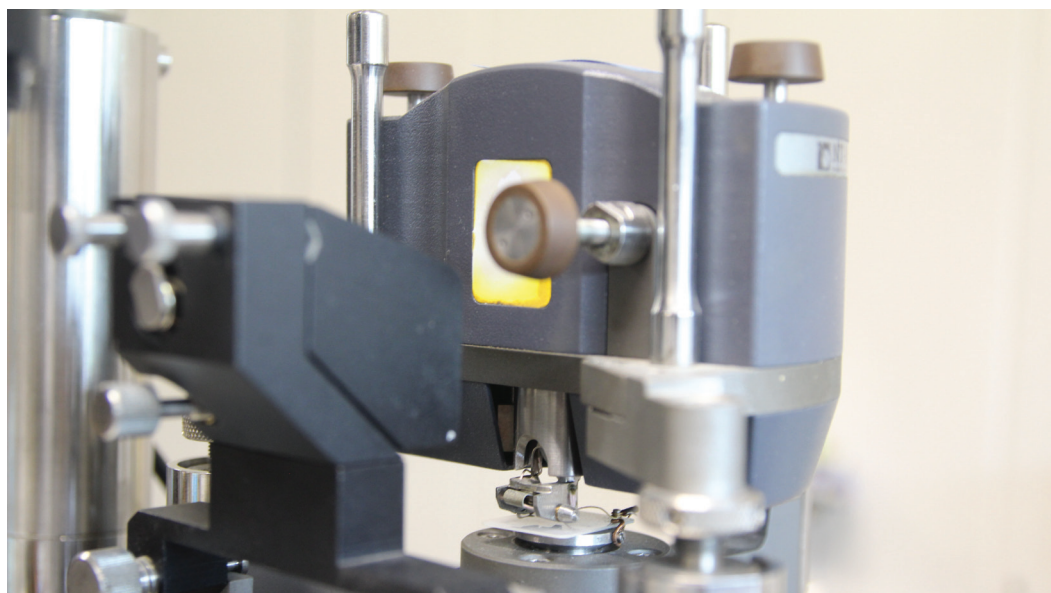
- ▶ Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **518**, 167396 (2021);
- ▶ Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **491**, 165538 (2019);
- ▶ Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **522**, 169152 (2022);
- ▶ Письма в ЖЭТФ, **117**, 165 (2023).



СЭМ-снимок массива ферромагнитных дисков с разной степенью перекрытия (слева) и зависимость резонансной частоты системы двух взаимодействующих магнитных вихрей от расстояния между центрами дисков (на вставке – экспериментальный МРСМ-спектр для дисков с перекрытием 20%)



Растровый электронный микроскоп SUPRA 50VP (Carl Zeiss) с литографической приставкой



Сканирующий зондовый микроскоп Solver-PRO (HT-МДТ)

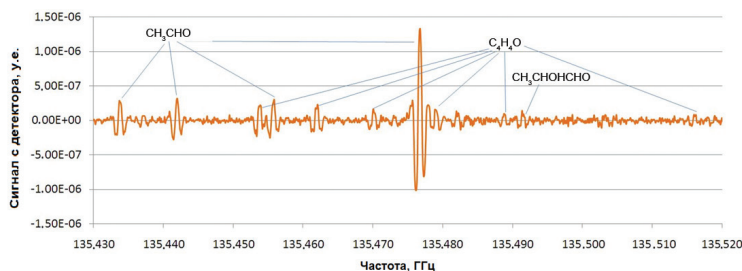
Терагерцовая спектроскопия высокого разрешения

Создана линейка спектрометров, оптимальная для анализа многокомпонентных газовых смесей, включающая ТГц-спектрометры высокого разрешения на эффекте быстрого прохождения частоты и на эффекте фазовой манипуляции. Комбинация двух спектрометров сочетает высокое разрешение и чувствительность одновременно, а также быстрое, практически в режиме реального времени, прохождение всего частотного диапазона линейки. Созданная линейка позволяет обнаруживать вещества в малых концентрациях и изучать динамику изменения их концентраций в ходе химической реакции благодаря высокой, до 2 ГГц/с, скорости сканирования в полосе 60 ГГц, спектральному разрешению 200 кГц и чувствительности по коэффициенту поглощения 10^{-9} см $^{-1}$.

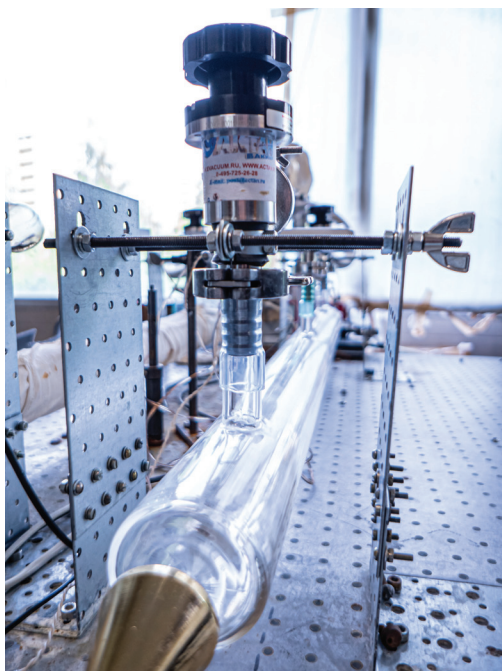
С использованием созданных спектрометров исследованы механизмы термораспада энергетических материалов (нитрат аммония, октоген и др.), важные для прогнозирования длительности их безопасного хранения. Разработана методика и впервые проведены исследования тканевых метаболитов, характеризующих патологии органов уха – горла – носа (ЛОР), что позволило определить вещества-маркеры, появляющиеся в ходе развития конкретной патологии, и прогнозировать ход дальнейшего лечения. Разработана методика анализа компонентного состава паров и продуктов естественного и термического разложения образцов урины условно здоровых добровольцев и пациентов с онкологическими заболеваниями, позволяющая детектировать в следовых концентрациях вещества, отражающие на ранних стадиях после химиотерапии нефропатические осложнения на организм пациента с онкологическим заболеванием.

Основные публикации и РИД по результату:

- ▶ Успехи физических наук, **190**, 765 [2020];
- ▶ IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, **11**, 443 [2021];
- ▶ Scientific Reports, 12:18117 [2022];
- ▶ Applied Science, **13**, 1573 [2023];
- ▶ Патент на изобретение RU 2 785 915 C1.



Запись участка спектра с сериями линий поглощения фурана (C₄H₄O) и ацетальдегида (CH₃CHO) и линией лактальдегида (CH₃C(=O)ONCHO) в продуктах термического разложения тканей полипа клинической пазухи



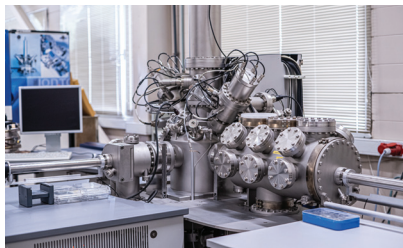
Измерительный тракт ТГц-спектрометра



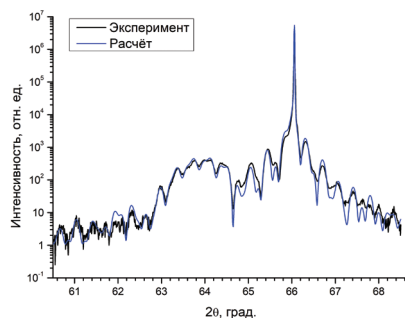
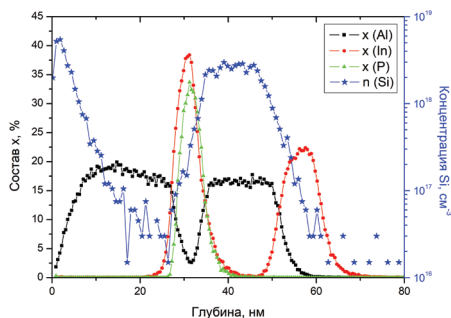
ТГц-спектр поглощения многокомпонентной газовой смеси биологического происхождения

Центр коллективного пользования научным оборудованием

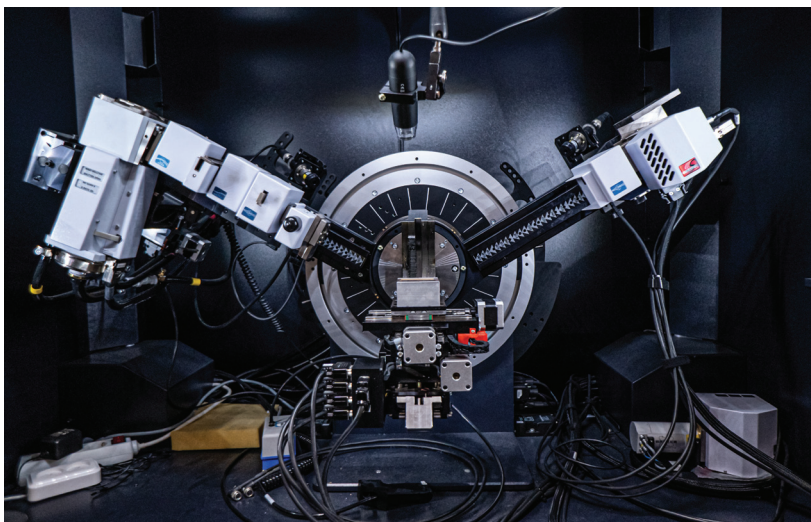
Центр коллективного пользования научным оборудованием «Физика и технология микро- и наноструктур» (ЦКП ИФМ РАН) образован на базе Института физики микро-структур РАН в 2003 году с целью повышения эффективности использования имеющегося в институте аналитического и технологического оборудования. С 2017 года в состав ЦКП включен уникальный стенд перестраиваемых, мощных (до 2 ГВт), импульсных фемто- и наносекундных лазеров и параметрических генераторов света (УСУ «Фемтоспектр»). Уникальное оборудование, квалифицированные кадры, использующие это оборудование для научных исследований, а также оригинальные методики измерений и технологические маршруты позволили ЦКП в 2019 и 2021 годах войти в число победителей конкурсов Российского научного фонда (РНФ) на получение проектов, выполняемых с использованием объектов научной инфраструктуры. В 2023 году все четыре проекта, победившие в конкурсе 2019 года, получили поддержку РНФ еще на три года. В результате в 2023 году в ЦКП ИФМ РАН выполняются работы по 9 проектам РНФ ученых из ИФП СО РАН им. А.В. Ржанова, КФУ им. В.И. Вернадского, МГУ им. М.В. Ломоносова, МФТИ, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, СПбГУ, СГУ им. Н.Г. Чернышевского (два проекта). Кроме научных исследований, в 2018–2023 годах ЦКП ИФМ РАН оказывал услуги диагностического и технологического характера в интересах научно-производственных организаций (НИИИС, НПО «Салют», НПП «Исток», НИИРТ, АО ВЗПП и др.).



Времяпролетный масс-спектрометр вторичных ионов ToFSIMS-5



Пример совместной диагностики методами вторично-ионной масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии состава и структуры транзистора с высокой подвижностью электронов на основе эпитаксиальной гетероструктуры A_3B_5



Высокоразрешающий рентгеновский дифрактометр BrukerD8 Discover



Элементы комплекса УСУ «Фемтоспектр»

603087, Россия, Нижегородская обл.,
Кстовский район, д. Афонино,
ул. Академическая, д. 7
Тел: +7(831) 417-94-65
<http://www.ipmras.ru>



