

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики Российской академии наук (ИФМ РАН) был образован Постановлением Президиума РАН № 173 от 28 сентября 1993 г. на базе Отделения физики твердого тела Института прикладной физики РАН. Директором-основателем института, возглавлявшим его в 1993–2009 гг. является академик С. В. Гапонов. С июня 2009 г. по настоящее время институтом руководит член-корреспондент РАН З. Ф. Красильник. В период с июня 2015 г. по март 2016 г. обязанности директора временно исполнял профессор В. И. Гавриленко.

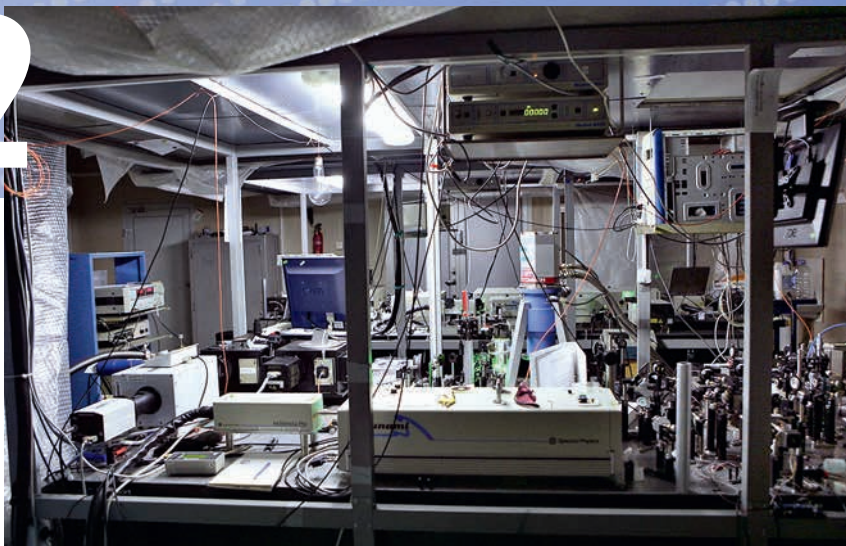
В 1993–2013 гг. ИФМ РАН являлся учреждением Российской академии наук в составе Отделения физических наук РАН, а также входил в Нижегородский научный центр РАН (2009–2013 гг.). В 2013 г. ИФМ РАН был передан в управление федеральному агентству научных организаций (ФАНО России), а 1 марта 2016 г. вошел в состав образованного Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на правах обособленного подразделения (филиала). 15 мая 2018 г. указом Президента РФ институт в составе центра был передан вновь образованному Министерству науки и высшего образования РФ.

В настоящее время в ИФМ 275 сотрудников, из них более 180 исследователей (25 докторов и 86 кандидатов наук, в том числе 1 академик и 3 члена-корреспондента РАН, 8 лауреатов Государственной премии СССР, 1 лауреат Государственной премии РФ для молодых ученых).

В институте проводятся фундаментальные научные исследования в области физики поверхности, твердотельных наноструктур, высокотемпературных сверхпроводников и многослойной рентгеновской оптики, а также технологии и применения тонких пленок, поверхностных и многослойных структур. Эффективное использование уникального оборудования обеспечивают Центр коллективного пользования «Физика и технология микро- и наноструктур» и уникальный стенд «Фемтоспектр» (стенд импульсных лазеров и параметрических генераторов света для спектроскопии полупроводников и полупроводниковых наноструктур с фемто- и наносекундным временным разрешением).

ИФМ РАН имеет тесные связи с Национальным исследовательским Нижегородским государственным университетом им. Н. И. Лобачевского (ННГУ) в области научных исследований и подготовки кадров. В ИФМ РАН работает межфакультетская базовая кафедра ННГУ «Физика наноструктур и наноэлектроника», открытая в 2004 г.

2



Фемтосекундный спектральный комплекс на базе титан-сапфирового лазера Tsunami.



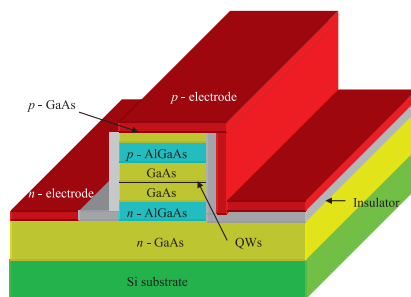
Стенд наносекундной спектроскопии на базе оптического параметрического осциллятора «Солар».

ОБЪЕМНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Созданы первые в мире лазеры терагерцового диапазона на основе n-Si. Источником когерентного излучения являются внутрицентровые переходы оптически возбуждаемых доноров пятой группы (сурьма, фосфор, мышьяк, висмут). Лазеры работают в дальнем ИК-диапазоне (45–60 мкм) при $T < 20$ К. Разработаны источники ТГц-излучения рамановского типа, в которых генерация обусловлена стимулированным излучением на стоксовой частоте при комбинационном рассеянии излучения накачки на донорных центрах.

Развита технология молекулярно-пучковой эпитаксии светоизлучающих структур с самоформирующимися наноструктурами и квантовыми точками GeSi. Получены структуры, демонстрирующие при комнатной температуре сигнал фото- и электролюминесценции в области длин волн 1,3–1,7 мкм с возможностью управления положением и шириной линии люминесценции, что открывает перспективы создания эффективных наноразмерных источников света на основе полупроводниковых нанострук-

тур за счет инженерии как отдельно взятого наноизлучателя, так и групп связанных полей излучателей. Созданы инжекционные гибридные лазеры ближнего ИК-диапазона с квантовыми ямами InGaAs/GaAs в качестве активной среды на неотклоненных подложках Si (001) с буферными слоями Ge с малой шероховатостью поверхности и низкой плотностью прорастающих дислокаций. Для полосковых лазеров пороговая плотность тока составила 0,46 и 5,5 кА/см² при 77 и 300 К соответственно. В микродисковых лазерах при комнатной температуре получена одномодовая генерация с шириной линии излучения 35 пм.

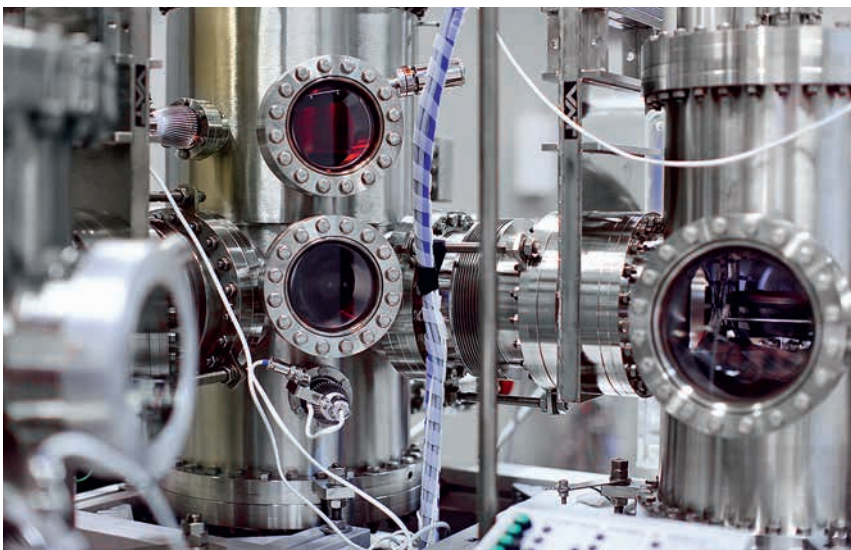


Схематическое изображение лазерного диода с планарными омическими контактами.

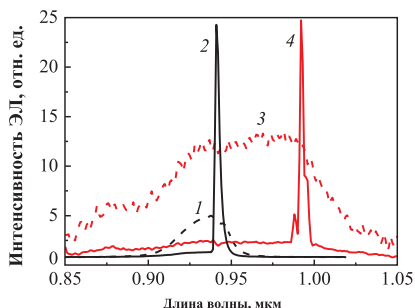
4



Фрагмент экспериментальной установки для исследования кинетики фотолюминесценции полупроводниковых гетероструктур.



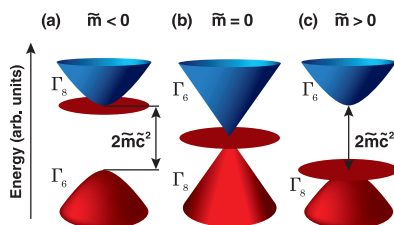
Установка молекулярно-пучковой эпитаксии нитридов III группы STE3N.



Спектры электролюминесценции гибридного A_3B_5 лазера на кремнии. Пунктирные линии — спектры, измеренные ниже порога лазерной генерации, сплошные — выше порога. Красные линии — спектры, измеренные при комнатной температуре, черные линии — спектры, измеренные при 77К.

Разработана лабораторная технология получения кремния и германия в плазменном разряде смеси SiF_4 или GeF_4 и водорода. Впервые в одноступенчатом процессе из изотопно-обогащенных фторидов получены слои нанокристаллического кремния с содержанием изотопа ^{28}Si более 99,95% и германия с содержанием изотопа ^{74}Ge — 86% и ^{72}Ge — 50%. Разработан метод безэталонного количественного анализа изотопного состава Si путем вторично-ионной масс-спектрометрии, основанный на разделении линий ^{28}Si и ^{29}Si в масс-спектрах и использовании пуассоновской коррекции детектора при регистрации интенсивности линии ^{28}Si .

Теоретически и экспериментально исследованы фундаментальные свойства узкозонных твердых растворов HgCdTe. Продемонстрировано существование нового типа псевдорелятивистских частиц — фермионов Кейна. Показано, что в точке топологического фазового перехода между инвертированной и нормальной зонной структурой «масса покоя» фермионов Кейна меняет знак, в то время как их скорость остается постоянной, что указывает на универсальность их псевдорелятивистского описания в широком интервале температур и составов твердого раствора HgCdTe. Продемонстрировано подавление оже-рекомбинации в квантовых ямах по сравнению с объемными структурами HgCdTe, получено стимулированное излучение на рекордно большой длине волны 20,3 мкм при оптической накачке.

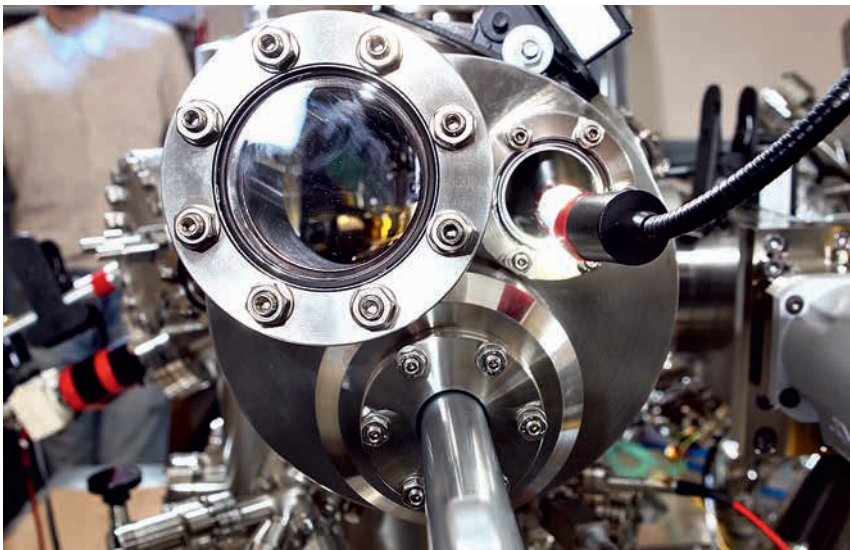


Схематическое изображение зонной структуры фермионов Кейна в 3D $HgCd_{1-x}Te$. С ростом доли Cd зонная структура эволюционирует от полуметалла («массы покоя» фермионов Кейна ($\tilde{m} < 0$) к нормальному полупроводнику ($\tilde{m} > 0$).

6



Низкотемпературный сканирующий туннельный микроскоп.

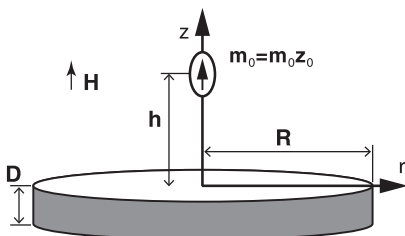


Фрагмент низкотемпературного сканирующего туннельного микроскопа.

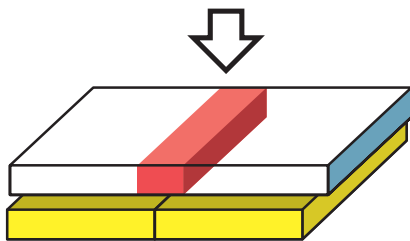
СВЕРХПРОВОДНИКИ И ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ

СВЕРХПРОВОДНИК-ФЕРРОМАГНИТИК

В рамках теории Гинзбурга — Ландау рассчитана зависимость критической температуры $T_c(H)$ гибридных систем сверхпроводник / ферромагнетик с доменной структурой. Показано, что в таких системах возможно формирование сверхпроводящих каналов и появление особенностей на зависимости $T_c(H)$ — возвратной сверхпроводимости и осцилляций T_c .



Магнитный диполь над сверхпроводящей пленкой.



Сверхпроводящий канал над доменной стенкой.

Построена теория эффектов размерного квантования в спектрах квазичастиц в мезоскопических сверхпроводниках. Показано, что следствием конкуренции геометрического и андреевского механизмов квантования являются мезоскопические осцилляции энергетических уровней, амплитуда которых может существенно превышать расстояние между андреевскими уровнями в объемных образцах. Ступенчатая и/или осцилляторная зависимость проводимости от магнитного поля позволяет рассматривать мезоскопические сверхпроводники как квантовые переключатели, где роль управляющего напряжения играет магнитное поле.

В гибридной системе, состоящей из короткого джозефсоновского перехода, помещенного в неоднородное поле массива субмикронных магнитных частиц, обнаружены эффекты соизмеримости — появление дополнительных резонансных максимумов на зависимости критического тока I_c от внешнего магнитного поля H , объясняемых образованием в сверхпроводящем электроде регулярной решетки пар вихрей Абрикосова противоположного направления. Теоретически показана возможность создания гибридной структуры

8



В исследовательской лаборатории отдела физики сверхпроводников.



В лаборатории сверхпроводниковой электроники.

ферромагнетик–сверхпроводник с управляемым значением разности фаз основного состояния джозефсоновского контакта в условиях формирования в контакте мелкомасштабной фазовой неоднородности, индуцированной полем ферромагнитной наночастицы. Такие структуры могут быть использованы в элементах квантовой логики как инверторы фазы и источники спонтанного магнитного потока.

Установлено, что неоднородность обменного поля ферромагнетика может обеспечить дальнедействующие сверхпроводящие корреляции в гибридных системах сверхпроводник–ферромагнетик–сверхпроводник. Предложен и изучен интерференционный механизм дальнедействующего эффекта Джозефсона в тонком ферромагнитном проводе, вызванный периодической зависимостью обменного поля от направления квазиимпульса из-за спин-орбитального взаимодействия.

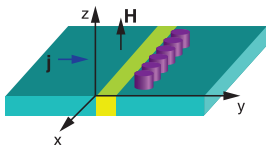
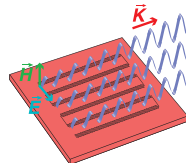


Схема джозефсоновского контакта с нанесенными на него магнитными точками.

Теоретически предсказана возможность макроскопического когерентного излучения из высокотемпературных сверхпроводников с внутренним эффектом Джозефсона и искусственных джозефсоновских сверхрешеток, помещенных во внешнюю волноведущую систему. Предложен новый тип генераторов на распределенных джозефсоновских переходах, которые являются аналогами электронных ламп бегущей и обратной волн. Экспериментально обнаружена черенковская генерация на прямых и обратных волнах в диапазонах 80–120 ГГц и 400–700 ГГц. Исследована синхронизация массивов джозефсоновских контактов Nb/NbSi/Nb с помощью бегущих поверхностных волн, длина которых намного меньше характерных размеров массива. Разработана технология изготовления массивов джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и впервые создан квантовый эталон напряжения на основе джозефсоновских контактов из ВТСП, работающий при температуре жидкого азота (разработано совместно с НИИПИ «Кварц»).



Моделирование направленности антенны с массивом джозефсоновских контактов.



Проекционный литограф экстремального ультрафиолетового диапазона.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗЕРКАЛА РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА И УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

Развиты технологии и создан комплекс технологического оборудования для нанесения многослойных структур из сверхтонких пленок для элементов многослойной оптики рентгеновского и ЭУФ диапазонов с заданным распределением периода по поверхности подложек с диаметром до 350 мм при практически любой форме поверхности. Создан технологически-измерительный комплекс для изготовления и аттестации элементов оптики с субнанометровым отклонением формы поверхности от заданной и оптических систем с абберацией волнового фронта на субнанометровом уровне. Метрологической основой комплекса является разработанный интерферометр с дифракционной волной сравнения, обеспечивающий аттестацию формы светосильных оптических элементов и волновые деформации сложных систем с точностью на уровне $0,2 \div 0,3$ нм. Развиты физические основы методов коррекции формы и созданы стенды суперполировки оптических поверхностей с субнанометровой точностью.

Развиты технологии нанесения и методы диагностики многослойных структур для элементов многослойной оптики коротковолнового спектрального диапазона, $\lambda = 0,05 \div 100$ нм, включая оптику нормального падения

($\lambda = 2 \div 100$ нм), в том числе изображающую оптику дифракционного качества.

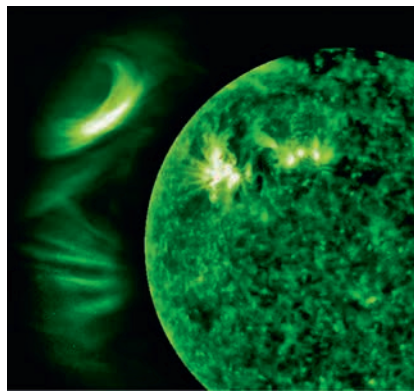
Создана лабораторная технология изготовления свободновисящих многослойных пленок (фильтры, защитные пленки, аноды микрофокусных рентгеновских трубок) для ЭУФ-литографии и рентгеновской астрономии. Разработаны и изготовлены термостойкие свободновисящие спектральные фильтры и элементы пленочной защиты маски для применений в стендах проекционной нанолитографии, свободновисящие фильтры для космических рентгеновских телескопов. Впервые на основе пленочных фазовращателей для диапазона $\lambda = 1,5 \div 4,5$ нм изготовлены аналоги четвертьволновой пластинки в мягком рентгеновском диапазоне.

Для изготовления оптических систем дифракционного качества для коротковолнового (мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового) диапазона развиты методы бездеформационного монтажа элементов изображающей оптики дифракционного качества. На основе развитых технологий нанесения градиентных многослойных структур с компенсацией стресса и методов бездеформационного монтажа создан

12



Фрагмент проекционного литографа экстремального ультрафиолетового диапазона.



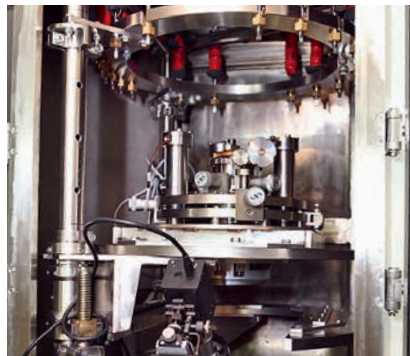
Эрупция протуберанца Солнца.
Наблюдения телескопа ТЕСИС в 2009 г. в линиях H α 30,4 нм и Fe IX–XI 17,1 нм.

стенд нанолитографии ($\lambda = 13,5 \text{ нм}$) с проектным разрешением 30 нм, что продемонстрировало появление технологий, позволяющих разрабатывать и производить современное литографическое оборудование, изготавливать оптические системы сверхвысокого пространственного разрешения для астрономии и микроскопии коротковолнового диапазона.

Создан контактный рентгеновский микроскоп, обеспечивающий нанометровое пространственное разрешение при регистрации изображений на фоторезисте и субмикронное — при цифровой регистрации. Детектор микроскопа для цифровой регистрации преобразует рентгеновское излучение в видимое и строит увеличенное изображение на ПЗС-матрице. Благодаря естественному разделению на «рентгеновскую» и «видимую» части конструкция микроскопа позволяет легко перестраивать увеличение и поле зрения микроскопа без перенастройки рентгенооптических элементов. Рабочая длина волны может изменяться в пределах 3–40 нм путем замены многослойных зеркал. В основе результата лежат прорывные разработки в области первопринципных методов изучения шероховатости супергладких поверхностей и формы

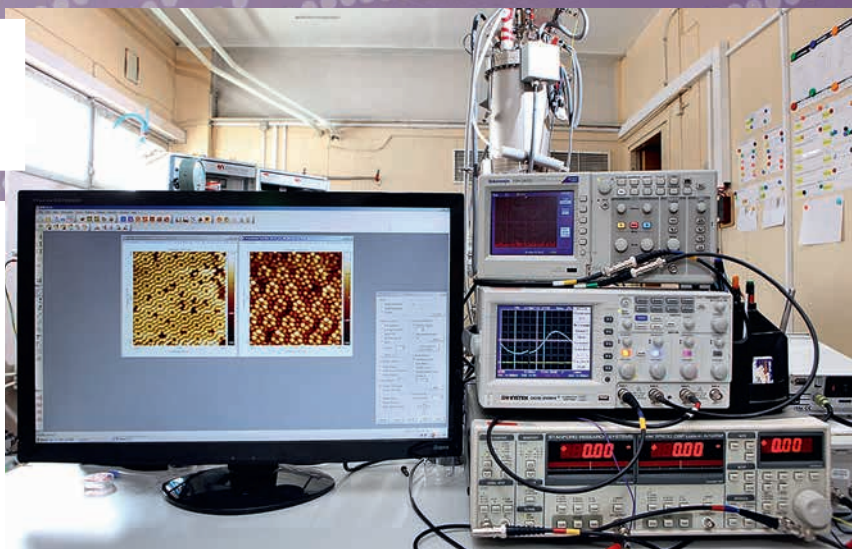
зеркал, ионно-пучковых методов коррекции локальных ошибок и асферизации подложек, позволившие изготовить многослойные зеркала дифракционного качества для мягкого рентгеновского диапазона.

Развиты технологии изготовления и методы аттестации многослойных формирователей жесткого рентгеновского излучения, включая фокусирующие (эллиптические) и коллимирующие (параболические) цилиндрические зеркала. Разработанные элементы нашли применение в рентгеновских дифрактометрах, производимых промышленностью.

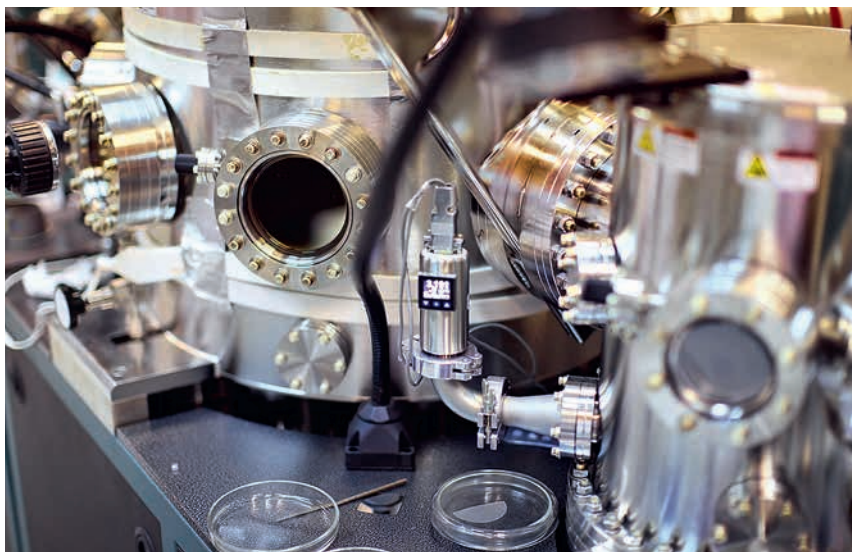


Вакуумный интерферометр с дифракционной волной сравнения для измерения формы поверхности и aberrаций оптических систем с субнанометровой точностью.

14



Магнитно-силовое изображение решетки вихревых частиц и античастиц.



Многокамерная установка магнетронного напыления AJA.

МАГНИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ И СПИНТРОНИКА

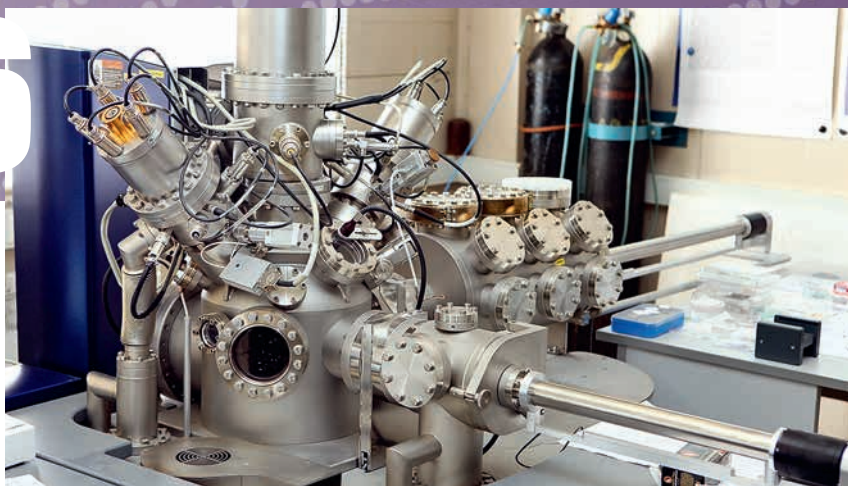
Развиты методы нанолитографии и зондовой микроскопии для создания и управления магнитным состоянием ферромагнитных наноструктур, позволившие исследовать коллективные эффекты в решетках ферромагнитных наночастиц, обусловленные их магнитодипольным взаимодействием, продемонстрировать эффективность использования системы ферромагнитных наночастиц в качестве управляемого источника неоднородного магнитного поля, создать туннельные магнитные контакты нанометровых латеральных размеров и показать принципиальную возможность записи информации со сверхвысокой ($\sim 10^{11}$ бит/см²) плотностью, реализовать новые киральные распределения намагниченности в ферромагнитных наноструктурах, такие, как магнитные вихри, антивихри и спирали.

Развита теория транспортных, оптических и нейтронооптических свойств ферромагнетиков с некомпланарной магнитной структурой. Для этих систем предсказаны диодный и фотогальванический эффекты, явление естественной оптической активности и невзаимность рассеяния холодных нейтро-

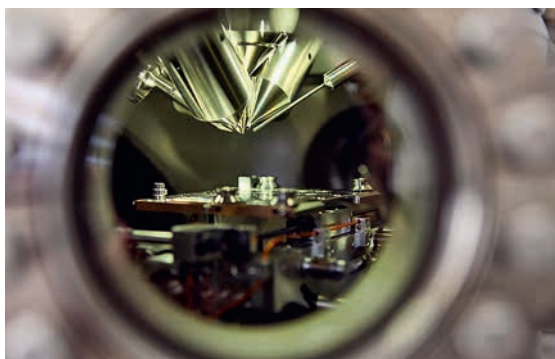
нов. Впервые экспериментально измерена величина невзаимности при прохождении нейтронов через систему из двух магнитных зеркал, находящихся во внешнем поле.

Разработаны методы управления процессами зарождения, пиннинга и депиннинга магнитных доменных стенок в планарных ферромагнитных нанопроволоках с помощью переключаемых полей рассеяния ансамблей наночастиц, позволившие реализовать магнитные логические ячейки, выполняющие основные логические операции.

Предложены и реализованы методы создания топологически заряженных распределений намагниченности (скирмионов) в пленках с перпендикулярной магнитной анизотропией. Стабилизация скирмионов обусловлена локальным изменением соотношения энергии магнитостатического взаимодействия и энергии доменных границ в наноструктурированной системе. Экспериментально достигнутая поверхностная плотность топологического заряда составляет $100 \mu\text{м}^{-2}$.



Масс-спектрометр вторичных ионов TOF.SIMS 5 и его фрагмент (на фотографии справа), для элементарного анализа по глубине и площади образца.



Основной блок системы измерения толщины стекла in situ и оптические головки, установленные на своде печи отжига.



ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И УСТРОЙСТВА

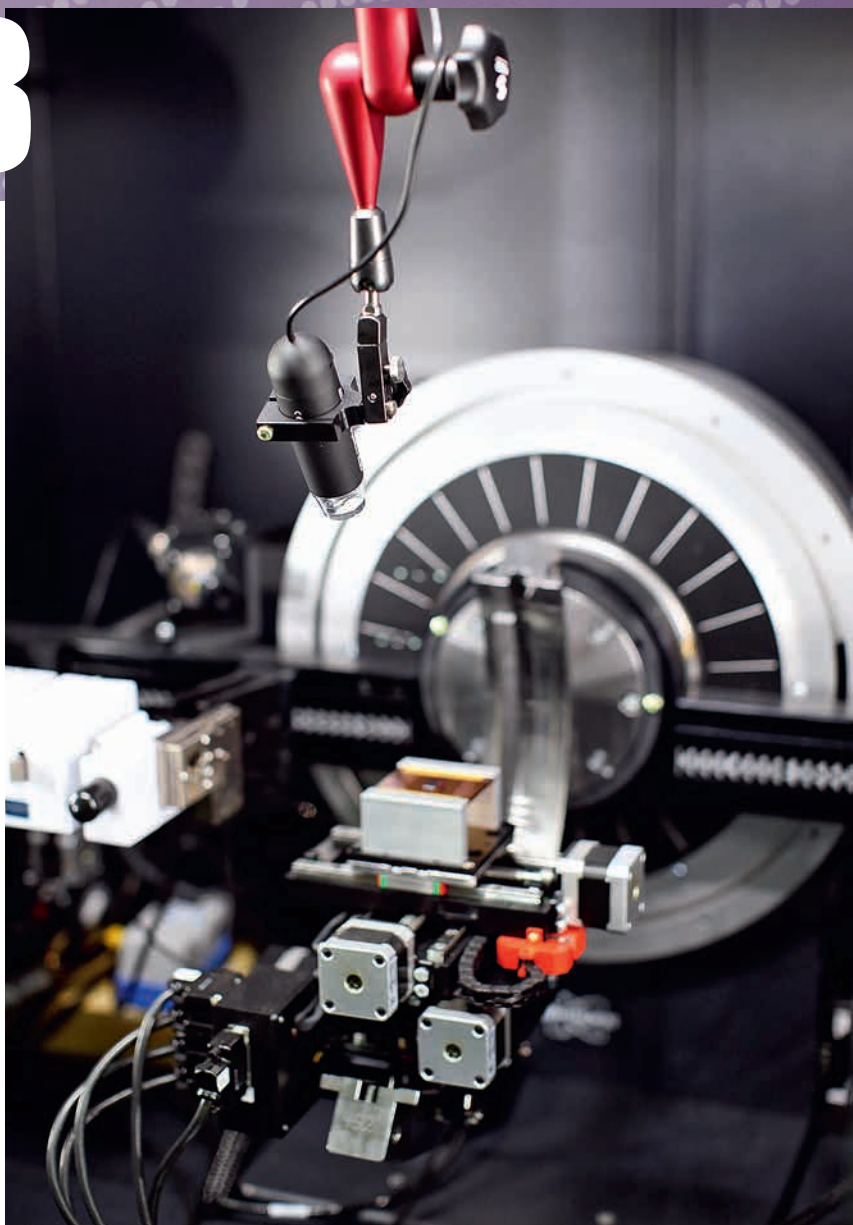
Предложен способ управления эффективной высотой барьера Шоттки (Мотта) (Al)GaAs за счет дельта-легирования кремнием GaAs в нескольких нанометрах от границы с металлом, что изменяет характер токопереноса с термоэмиссионного на термополевой/туннельный. Разработана технология изготовления структур методом низкотемпературного осаждения слоя алюминия в едином процессе газовой эпитаксии, что обеспечивает чистоту, атомарную резкость и совершенство интерфейса металл–полупроводник.

Разработана технология изготовления планарных диодов СВЧ с микронными размерами анодного контакта Шоттки. Изготовлено семейство низкобарьерных диодов и широкополосных высокочувствительных волноводных детекторов на их основе с чувствительностью $1000 \div 5000$ В/Вт и эквивалентной мощностью шума (NEP) $10^{-12} \div 10^{-11}$ Вт Гц^{-1/2} в диапазоне до 150 ГГц, работающих без постоянного смещения. Параметры близки к предельно достижимым для неохлаждаемых СВЧ-детекторов. Разработаны и изготовлены макеты высокочувствительных линеек (от 8 до 64 элементов) и матричных детекторов (8 x 8) для частотного диапазона 90–100 ГГц. Среднее значение чувствительности по 64 каналам составило ~ 9000 В/Вт, NEP $\sim 5 \cdot 10^{-12}$ Вт Гц^{-1/2}.

Разработаны и изготовлены макеты силовых p-i-n-диодов на основе гетероструктур (Al) GaAs, выращенных методом жидкофазной эпитаксии. Экспериментальные образцы диодов имеют следующие характеристики: рабочий ток 5 А, обратное пробивное напряжение >610 В, время обратного восстановления <23 нс, предельная частота коммутации >3,1 МГц, максимальная рабочая температура 250 °С. Внедрено в АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов».

Разработана технология изготовления ВТСП-элементов на основе пленок YBCO, осаждаемых на одну или обе стороны подложек из различных материалов: сапфир с подслоями флюорита и оксида церия, галата неодима, алюмината лантана, титаната стронция. Параметры пленок соответствуют мировому уровню: критическая температура $T_c = 88 - 91$ К, критическая плотность тока при 77 К $J_c = (3 - 5) \times 10^6$ А/см², поверхностное сопротивление пленки на частоте 10 ГГц при 77 К $R_s < 1$ мОм. Разработаны и изготовлены макеты ряда устройств на основе ВТСП: механически перестраиваемый высокочастотный контур ВЧ-диапазона с диапазоном перестройки резонансной частоты (30–80 МГц) и собственной доброт-

18



Элемент рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discover.

ностью 110 000±180 000 при T = 77 K; полосовой фильтр 4-го порядка на частоту 3 ГГц с полосой пропускания 1%; болометр терагерцового диапазона (NEP ~ 3,5 × 10⁻⁹ Вт/Гц^{1/2} на частоте 2,5 ТГц); дисковый резонатор на частоту 7,5 ГГц с рекордно высокой собственной добротностью Q = 58 000 при 77 K, что обеспечивает низкий уровень фазовых шумов СВЧ-генератора на его основе (≤ -136 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц от резонансной частоты).

На основе методов низкокогерентной тандемной интерферометрии разработана промышленная автоматизированная волоконно-оптическая система для дистанционного измерения толщины листового стекла в горячей зоне его производства, обеспечивающая непрерывный контроль качества стекла, значительное повышение производительности. К настоящему времени на стекольных заводах по всему миру (Россия, Белоруссия, Киргизия, Азербайджан, Казахстан, Бразилия, Франция) установлено 20 систем. На принципах низкокогерентной тандемной интерферометрии разработана система оптического мониторинга температуры, изгиба подложек и толщины полупроводниковых структур в ходе технологических процессов их формирования (эпитаксии,

осаждения и плазмохимического травления). Система пригодна для работы со всеми типами подложек, прозрачных на длине волны 1,5 мкм. Точность измерений температуры подложек достигает ±1 °С. Погрешность измерения толщины слоев — до 2 нм. Применено для мониторинга процессов осаждения/травления структур алмаза, GaAs, Si, GaN и др.



В исследовательской лаборатории отдела технологии наноструктур и приборов.

20



В лаборатории отдела терагерцовой спектроскопии.



Элемент терагерцового спектрометра для анализа газовых смесей.

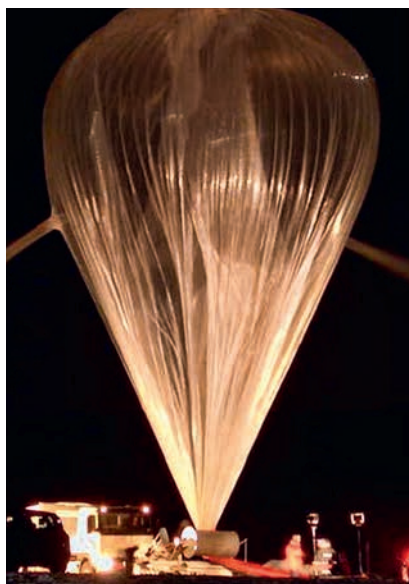
ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ

Разработан и реализован полетный вариант малогабаритного высокостабильного генератора диапазонов 19–21, 3,8–4 ГГц и 800 МГц с малым энергопотреблением для работы в качестве опорного и задающего генератора в радиоизмерительных и спектроскопических комплексах при проведении аэрокосмических исследований. Выходная мощность от –5 до +15 dBm в температурном диапазоне от –40 до +55 °С.

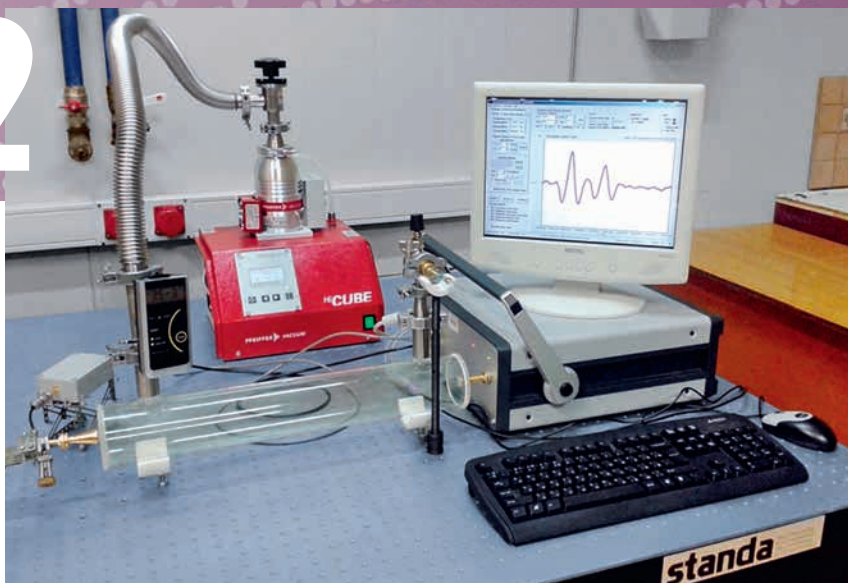
Разработан и в рамках программы TELIS успешно испытан полетный вариант интегрального спектрометра на основе SIS-смесителя и FFO-гетеродина. Проведены демонстрационные измерения молекулярных спектров атмосферных газов H_2O , HDO , BrO , ClO , O_3 , HCl .

Разработан ряд приборов терагерцового диапазона: семейство спектрометров высокого разрешения с фазовой манипуляцией воздействующего излучения на основе ламп обратной волны, устройств полупроводниковой электроники и квантово-каскадных лазеров; синтезаторы частот на диапазоны 667–857, 789–968, 882–1100 ГГц с кварцевой стабильностью частоты, использующие в качестве умножителей и гармонических смесителей полупроводниковые сверхрешетки; высокостабильные, спектрально чистые источники

излучения на основе квантово-каскадных лазеров, перекрывающие область частот от 1 до 4,7 ТГц. Обнаружительная способность спектрометров по ряду основных молекул не хуже 1 ppb, спектральное разрешение ограничивается эффектом Доплера. Области применения разработанных приборов — прецизионная спектроскопия, радиоастрономия, метрология, экология, неинвазивная диагностика в медицине.



Испытания интегрального спектрометра в рамках программы TELIS-MIRAS (Швеция, март 2011 г.).



Широкодиапазонный ТГц газовый спектрометр с источником излучения на основе лампы обратной волны для детектирования состава многокомпонентных газовых смесей.

На основе подходов и средств спектроскопии высокого разрешения терагерцевого частотного диапазона разработан метод двухканальной спектроскопии и создан лабораторный макет прибора с использованием двух независимых источников и единого приемника ТГц-излучения. Данный метод может найти применение для исследования быстротекущих процессов, детектирования короткоживущих продуктов химических реакций. На тех же принципах разработан аналитический метод идентификации паров высокоэнергетических веществ (ВЭВ), включая бризантные взрывчатые вещества, и продуктов их естественного и термического разложения, в том числе и в следовых количествах.

Выявлены характерные продукты разложения, являющиеся потенциальными маркерами для детектирования конкретных ВЭВ в атмосфере в режиме реального времени.

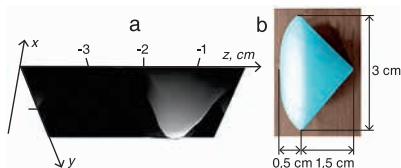
Показана принципиальная возможность использования методов и аппаратных средств ТГц нестационарной спектроскопии для изучения метаболического профиля человека на примере исследования динамики концентрации окиси азота в выдыхаемом воздухе онкологических больных при проведении лучевой терапии, а также динамики концентрации ацетона, метанола и этанола в выдыхаемом воздухе больных диабетом в зависимости от приема пищи и лекарственных препаратов.

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СЛОЖНЫХ СРЕД

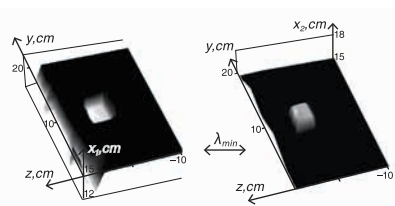
Разработаны методы подповерхностной электромагнитной томографии и голографии субволнового разрешения, основанные на решении обратных задач ближнепольного рассеяния по данным измерений рассеянного сигнала над поверхностью среды с диэлектрическими неоднородностями. В основе методов лежит влияние неоднородностей на характер зависимости измеряемого на поверхности полупространства сигнала от поперечных координат и параметра, определяющего глубину его формирования: частоты сигнала, высоты или размера электрически малых антенн-зондов или формы импульса. Для решения одномерных задач профилирования разработан новый в теории некорректных задач, свободный от ограничений теории возмущений метод двойственной регуляризации. Методы многочастотной, импульсной и импедансной СВЧ-томографии и голографии подповерхностных неоднородностей комплексной диэлектрической проницаемости апробированы в экспериментах.

Теоретически изучены нелинейные свойства левосторонних метаматериалов, представляющих собой вложенные субволновые решетки металлических прямых проводов и резонаторов типа разорванного кольца в матрице нелинейного диэлектрика. Показана особая роль магнитной нелинейности, позволяющей переключать метаматериал из правостороннего в лево-

стороннее состояние и обратно. Установлено, что с помощью слоя нелинейного левостороннего метаматериала можно получать изображения объектов со сверхразрешением на второй гармонике частоты источника излучения в условиях, когда на фундаментальной частоте слой непрозрачен. Продемонстрирована возможность трехмерной субволновой локализации света в металло-диэлектрических нановолноводах с выпуклостью стенки волновода, образующей «нанолинзу», а также за счет нелинейной самофокусировки плазмонов.



(a) Голографическое изображение нижней части тefлонового образца (b) в песчаной среде, восстановленное по двумерному распределению рассеянного импульсного сигнала со средней частотой спектра 3,5 ГГц над поверхностью среды ($z = 0$).



Результат голографии для полиэтиленового тестового объекта $4 \times 3 \times 2 \text{ см}^3$ в песчаном грунте.