

Справка с обоснованием статуса уникальности УНУ Нанолаб

№ п\п	Наименование показателя	Информация
1	<p>Уникальные характеристики/возможности УНУ в сравнении с зарубежными и российскими аналогами (указываются аналоги и их сравнение с заявляемой УНУ), ожидаемый период сохранения уникальности/превосходства</p>	<p>Уникальность комплекса «Нанолаб» обусловлена набором инструментов для разработки и реализации методик создания твердотельных низкоразмерных систем и новых композитных наноматериалов, перспективных для использования в современном высокотехнологическом производстве, а также методов исследования их электронной энергетической и кристаллической структуры, таких как</p> <ul style="list-style-type: none"> - рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), - ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия валентной зоны с угловым и спиновым разрешением (ФЭСУР), - сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) и сканирующая туннельная спектроскопия (СТС), - атомно-силовая микроскопия (АСМ) (контактный и бесконтактный режимы с использованием как кремниевых кантилеверов, так и Qplus сенсоров, позволяющих одновременно с АСМ изображениями с атомарным разрешением получать и СТМ изображения), - дифракция медленных электронов (ДМЭ), - Оже-электронная спектроскопия (ЭОС). <p>Главная особенность УНУ «Нанолаб» состоит в том, что в ней реализована комбинация методов сканирующей зондовой микроскопии и фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением. Это две основные группы методов, позволяющие получать наиболее полную информацию об электронной структуре твердых тел, а также на атомном уровне визуализировать строение поверхности нанообъектов.</p> <p>Похожие комплексные установки, направленные на решение экспериментальных задач в области физики и химии поверхности твердых тел, есть в Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (г. Владивосток), в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (г. Москва) и в Институте исследования твердых тел и материалов (г. Дрезден, IFW Dresden). Упомянутые научные установки либо не позволяют проводить весь комплекс исследований без необходимости переноса образцов между различными модулями при атмосферном давлении, либо обладают значительно меньшим числом доступных методов. В УНУ «Нанолаб» подготовка образцов и их передача между модулями осуществляется в условиях сверхвысокого вакуума, что обеспечивает надёжность и достоверность экспериментальных результатов в области физики и химии твёрдого тела и научного материаловедения.</p> <p>В то же время, модули фотоэлектронной спектроскопии и зондовой микроскопии являются полностью автономными с собственными камерами загрузки и подготовки образцов. Ключевыми преимуществами данной концепции построения научно-исследовательской установки являются:</p>

		<p>- возможность одновременного проведения независимых исследований, что позволяет достигать максимально возможной загрузки оборудования;</p> <p>- возможность использования взаимодополняющего оборудования двух независимых подготовительных камер для создания и подготовки образцов перед проведением измерений. Независимость аналитических модулей фотоэлектронной спектроскопии и зондовой микроскопии обеспечивается уникальной системой вибрационной развязки камер.</p> <p>УНУ «Нанолаб» - единственная из всех перечисленных выше, где реализован метод фотоэлектронной спектроскопии со спиновым разрешением. Модуль фотоэлектронной спектроскопии, оборудованный энергоанализатором с высоким угловым ($<0.1^\circ$) и энергетическим ($<2\text{мэВ}$) разрешением, позволяет также одновременно получать информацию о полной проекции спина электронов в исследуемых кристаллах на все три пространственных направления (3D спин-детектор).</p> <p>Среди основных преимуществ – особая конфигурация и взаимное расположение вакуумных камер всего модуля, благодаря которому просто реализуется подсоединение дополнительного вакуумного оборудования к установке, например, камеры быстрой загрузки, ростовой камеры МЛЭ, камеры для скола кристаллов в вакууме, камеры магнетизации, оснащённой катушкой Гельмгольца, и т.п.</p> <p>Модульность конструкции установки Нанолаб позволяет постоянно расширять уникальные возможности комплекса, объединяя все доступные инструменты и методики внутри общей вакуумной системы, и в то же время, благодаря особенной конструкции системы вибрационной развязки, сохраняется независимость модулей друг от друга. На основании этого следует ожидать сохранения уникальности комплекса «Нанолаб» на период в десять лет.</p>
2	<p>Решаемые с использованием УНУ масштабные научные задачи</p>	<p>УНУ «Нанолаб» востребована для решения задач в области физики наноструктур и низкоразмерных систем, физики полупроводников, тонких плёнок, поверхности и границ раздела. Основные направления проводимых исследований соответствуют приоритетной научной задаче «Индустрия наносистем». Результаты этих исследований важны и потенциально применимы для развития критических технологий: технологии наноустройств и микросистемной техники, технологии получения и обработки функциональных наноматериалов, технологии диагностики наноматериалов и наноустройств.</p> <p>Ниже подробно перечислены основные направления исследований, проводимые на УНУ «Нанолаб» в текущий момент:</p> <ul style="list-style-type: none"> - разработка и совершенствование методик формирования высококачественных интерфейсов графена с металлическими и полупроводниковыми материалами; - формирование и исследование гибридных структур на основе

		<p>графена и сверхтонких плёнок силицидов ферромагнитных металлов;</p> <ul style="list-style-type: none">- разработка методик синтеза графена, легированного примесями лёгких элементов (B, N, S), с возможностью управления локальной структурой примесных центров;- изучение влияния примесных дефектов (B, N) графена на кинетику реакции восстановления кислорода, протекающую в химических источниках тока – топливных элементах и металл-воздушных аккумуляторах;- исследование электрон-фононного взаимодействия в легированном графене для понимания и предсказания сверхпроводимости в двумерных материалах на основе углерода;- разработка подходов к управлению электронной спиновой структурой топологических изоляторов, графена и Рашба систем с высоким спин-орбитальным взаимодействием для эффективного формирования спиновых токов с высокой степенью спиновой поляризации и использования данных систем в наноэлектронике и спинтронике;- исследование сверхтонких сегнетоэлектрических туннельных контактов, потенциально применимых как в цифровых, так и в аналоговых устройствах микро- и наноэлектроники, в первую очередь, в качестве быстродействующей энергонезависимой памяти и логических элементов; в аналоговой технике - для обработки сигналов, при построении нейронных сетей, в генераторах шума;- изучение структуры и пространственного распределения высокоагрегированных центров окраски в кристаллах фторида кальция, представляющих интерес в качестве материалов фотолитографии, используемых совместно с эксимерными лазерами в производстве полупроводниковых чипов;- исследование электронной структуры монокристаллических плёнок халькогенидов переходных металлов, которые могут служить основой для полевого транзистора с комбинированным спиновым и зарядовым управлением.
--	--	---

3	<p>Полученные за последние 5 лет с использованием УНУ значимые научные результаты (приводится краткое описание полученных результатов)</p>	<p>В период 2013-2017 г.г. на установке Нанолаб были получены следующие значимые научные результаты.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Проведено сравнительное исследование графена, полученного методом крекинга пропилена (C_3H_6) на поверхностях никеля с различной ориентацией: Ni(111) и Ni(100). Показано, что графен на Ni(111) является хорошо упорядоченным на большой площади поверхности, в то время как графен на поверхности Ni(100) имеет ярко выраженную доменную структуру. Установлено, что электронная структура обеих систем схожа, графен сильно связан с подложкой Ni. Показано, что интеркаляция монослоя Au для двух систем приводит к формированию электронной структуры, свойственной для квазисвободного графена [D. A. Pudikov et al. Electronic structure of graphene on Ni surfaces with different orientation, <i>Materials Chemistry and Physics</i> 179 189 (2016); Д. А. Пудиков и др. Электронная структура графена на поверхностях Ni(111) и Ni(100), <i>Физика твёрдого тела</i>, том 58, вып. 12, 2459 (2016)]. 2. Был предложен новый перспективный низкотемпературный метод синтеза графена, суть которого заключается в создании слоя графена на поверхности металлической пленки никеля сегрегацией атомов углерода из подложки высокоориентированного пиролитического графита через пленку никеля. Было установлено, что синтез графена происходит через фазу преобразования поверхностного карбида Ni_2C в графен путем его разложения. Установлено, что формирование эпитаксиального слоя графена начинается при прогреве $180\text{ }^\circ\text{C}$, при температурах $260\text{--}270\text{ }^\circ\text{C}$ практически полностью покрывающим всю поверхность [E. V. Zhizhin et al. Growth of graphene monolayer by “internal solid-state carbon source”: Electronic structure, morphology and Au intercalation, <i>Materials & Design</i> 104 284 (2016)]. 3. Было продемонстрировано, что графен, сформированный при определенных условиях на поверхности Co(0001), обладает выдающимися структурными свойствами и сильно спин-поляризованными носителями заряда, что было подтверждено наблюдением конуса Дирака вблизи уровня Ферми с определенным спиновым состоянием [D. Usachov et al. Observation of Single-Spin Dirac Fermions at the Graphene/Ferromagnet Interface, <i>Nano Lett.</i> 15 2396 (2015)]. 4. Была продемонстрирована возможность получения высоко ориентированного графена на поверхности Co(0001), когда атомы углерода занимают две неэквивалентные позиции относительно решетки кобальта, называемые «top sites» и «hollow sites». С помощью фотоэлектронной дифракции и спектроскопии был установлено, что преимущественное внедрение атомов бора происходит в одну подрешетку графена, примесные атомы занимают позиции «hollow sites», что обусловлено спецификой их взаимодействия с нижележащим слоем кобальта. Теоретические расчеты допированного бором графена показали возможность
---	--	---

создания запрещенной зоны, величину которой можно изменять при изменении концентрации допирующей примеси, что значительно увеличивает перспективы создания электронных приборов на основе графена [D. Yu. Usachov et al. Epitaxial B-Graphene: Large-Scale Growth and Atomic Structure, ACS Nano 9 (7) 7314–7322 (2015) ; D. Yu. Usachov et al. Large-Scale Sublattice Asymmetry in Pure and Boron-Doped Graphene, Nano Lett. 16(7) 4535 (2016); D. Yu. Usachov et al. Epitaxial B-Graphene: Large-Scale Growth and Atomic Structure, ACS Nano 9 (7) 7314–7322 (2015)].

5. Был предложен метод управления примесями азота в графене, который позволяет эффективно преобразовывать пиридиновые дефекты, содержащие атомы азота, в дефекты замещения атомов углерода атомами азота. Указанный метод позволяет осуществлять точное управление концентрацией носителей заряда. Было показано, что эффект допирования графитоподобными вакансиями значительно понижается при наличии пиридиновых вакансий. После конвертации примесных вакансий в графитоподобные вакансии эффективность допирования возрастает вплоть до половины заряда электрона на один атом азота [D. Usachov et al. The chemistry of imperfections in N-graphene, Nano Lett 14 4982 (2014)].

6. Разработана методика создания гибридных материалов на основе графена и силицидов переходных металлов (Fe, Co), а также исследованы особенности их электронной и кристаллической структуры. Изучен процесс интеркаляции кремния под графен на поверхности кобальта и железа, сопровождающийся образованием твёрдого раствора кремния в кобальте (железе) и формированием поверхностных кристаллических фаз Co_2Si и Fe_3Si . Fe_3Si образует упорядоченную структуру под графеном с ферромагнитным порядком параллельно плоскости графенового слоя [Applied Surface Science **392**, 715 (2017)]. Показано, что образование силицидов приводит к существенному ослаблению гибридизации электронных состояний графена и кобальта (железа) и восстановлению дираковского спектра электронных состояний графена вблизи уровня Ферми. Последнее позволило изучить процесс электронного допирования графена на подложке силицида кобальта при осаждении лития на его поверхность. Обнаружено, что легирование литием приводит к значительному переносу заряда на графен. При этом концентрация электронов достигает $3.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Более того, особая форма поверхности Ферми создает благоприятные условия для усиления электрон-фононного взаимодействия, благодаря чему сформированная система может рассматриваться в качестве кандидата для получения сверхпроводимости в однослойном графене [Физика твёрдого тела **57**, 1024 (2015)].

7. По результатам комплексных исследований была установлена связь структурных, химических и электронных характеристик графеновых плёнок, выращенных методом термического разложения поверхности $6\text{H-SiC}(0001)$, с технологическими режимами роста. Это позволило осуществить оптимизацию

технологических параметров и создать воспроизводимую технологию роста однослойной пленки графена с небольшой долей мелких включений двухслойного графена на Si-границы подложки 6H-SiC. Полученные образцы высококачественного графена на поверхности полупроводникового кристалла SiC предполагают возможность создания элементов электроники на их основе [Физика и техника полупроводников **51**, 1116 (2017)].

8. Проведена серия исследований, посвящённых методикам формирования графена на кристаллических поверхностях металлов и изучению особенностей взаимодействия графена с металлическими подложками. В частности, изучались причины возникновения спин-орбитального расщепления электронных состояний графена при контакте с металлами Ni, Ir, Pt, Au, Pb, Bi. Для графена на поверхности Pt(111) обнаружены спин-зависимые эффекты гибридизации состояний графена и платины, приводящие к снятию вырождения состояний дираковского конуса в графене и спин-орбитальному расщеплению π -состояний на величину 80-200 мэВ в зависимости от направления в зоне Бриллюэна [Appl. Phys. Lett. **105**, 042407 (2014)]. Усиление спин-зависимых эффектов гибридизации между состояниями подложки и графена было также обнаружено при интеркаляции Pt под графен на Ir(111) [Phys. Rev. B **92**, 165402 (2015)]. При интеркаляции монослоя атомов Pb под графен на Pt(111) наблюдается эффект n-допирования графена и открывается запрещённая зона шириной около 200 мэВ, при этом спиновая структура состояний дираковского конуса описывается моделью Кэйна-Мила для графена в топологической фазе [ACS Nano **11**, 368 (2017)]. Была исследована возможность управления величиной спин-орбитального расщепления π -состояний графена при одновременной интеркаляции золота и висмута под графен на Ni(111). Было показано, что постепенное замещение интеркалированного золота на атомы висмута уменьшает расщепление дираковского конуса графена, позволяя таким образом контролируемо воздействовать на электронную спиновую структуру графена [Carbon **93**, 984 (2015)]. На основании исследований графена на поверхности Ni(111) с интеркалированным слоем золота была предложена простейшая модель спинового фильтра на базе графена [Nanotechnology **24**, 295201 (2013)].

9. Исследованы особенности электронной и спиновой структуры тройного топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$, характеризующегося высокоэффективными термоэлектрическими свойствами, с использованием фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением, в сравнении с теоретическими расчетами, проведенными в рамках теории функционала плотности. Показано, что уровень Ферми для $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ располагается в энергетической запрещенной зоне и пересекает топологическое поверхностное состояние (конус Дирака). Теоретические расчеты электронной структуры поверхности демонстрируют, что характер распределения атомов Se на подрешетке Te-Se фактически не влияет на вид дисперсии поверхностного топологического электронного состояния.

Спиновая структура этого состояния характеризуется геликоидальной спиновой поляризацией. Исследования поверхности $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ методом сканирующей туннельной микроскопии выявили атомарную гладкость поверхности образца, сколотого в условиях сверхвысокого вакуума, с величиной постоянной решетки ~ 4.23 Å. Показана стабильность дираковского конуса соединения $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ к напылению монослоя Pt на поверхность [А. М. Shikin et al. Electronic and spin structure of the topological insulator $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$, Phys. Rev. B 89 125416 (2014); М. В. Филянина и др. Особенности электронной, спиновой и атомной структуры топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$, Физика твёрдого тела, том 58, вып. 4, 754 (2016)].

10. Предложен и исследован новый метод генерации спин-поляризованных токов в топологических изоляторах, связанный со спин-зависимой асимметрией генерации дырок на уровне Ферми для ветвей топологических поверхностных состояний с противоположной спиновой ориентацией при воздействии циркулярно поляризованным синхротронным излучением. Исследованы топологические изоляторы с различным стехиометрическим составом ($\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.8}\text{Se}_{1.2}$ и $\text{PbBi}_2\text{Se}_2\text{Te}_2$) и выявлена корреляция в величине сдвигов и генерируемых спин-поляризованных токов с особенностями электронной спиновой структуры. [А. М. Шикин и др. Поверхностные спин-поляризованные токи, генерируемые в топологических изоляторах циркулярно-поляризованным синхротронным излучением, и их индикация методом фотоэлектронной спектроскопии, Физика твёрдого тела, том 58, вып. 8, 1617 (2016)].

11. Методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением были изучены электронная и спиновая структуры системы бислоем $\text{Bi}/3\text{D}$ топологический изолятор, сформированной после кратковременного прогрева $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$. Благодаря вызванной под действием температуры перестройке верхних приповерхностных слоев топологического изолятора наблюдались характерные для дырок зоны со спиновым расщеплением бислоя висмута и параболические состояния вместо конуса Дирака. Проведенные методами сканирующей туннельной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследования выявили наличие террас Bi_2 на поверхности системы, возникших после прогрева. Экспериментальные результаты соответствуют расчетам, проведенным с использованием теории функционала плотности, которые подтвердили наличие спин-поляризованных зон, связанных с наличием бислоя висмута. Сформированные таким простым методом гетероструктуры открывают значительные возможности для изготовления электронных приборов с низким потреблением энергии, основанных на принципах спин-поляризованного транспорта [I. I. Klimovskikh et al. Spin-resolved band structure of heterojunction Bi-bilayer/3D topological insulator in the quantum dimension regime in annealed $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$, Scientific Reports 7 45797 (2017)].