

**Аналитический и технологический исследовательский центр
«Высокие технологии и наноструктурированные материалы»
ФФ НГУ: история, становление и достигнутые результаты**

**Павел Викторович Гейдт¹, Андрей Васильевич Аржанников²
Александр Леонидович Асеев³, Александр Андреевич Шкляев⁴
Владимир Алексеевич Володин⁵, Иван Алексеевич Азаров⁶
Владимир Иванович Зайковский⁷, Дмитрий Евгеньевич Уткин⁸
Юрий Васильевич Ларичев⁹, Сергей Юрьевич Чепкасов¹⁰
Сергей Александрович Кузнецов¹¹**

¹⁻¹¹Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

^{3-6,8,11}Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Россия

^{7,9}Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН
Новосибирск, Россия

¹p.geydt@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3266-826X>

²arzhannikov@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

³a.aseev@nsu.ru

⁴a.shklyayev@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7271-3921>

⁵v.volodin@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1431-8242>

⁶i.azarov@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9571-2227>

⁷v.zaikovskii@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6590-7242>

⁸d.utkin@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9510-5427>

⁹i.larichev@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1172-7515>

¹⁰s.chepkasov@post.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9462-0259>

¹¹sakuznetsov@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-8125>

Аннотация

В работе приведена информация об истории образования, становлении, основных направлениях деятельности и результатах работы Аналитического и технологического исследовательского центра физического факультета Новосибирского государственного университета (АТИЦ ФФ НГУ) за 15 лет существования. Основными направлениями физических исследований являются: современное материаловедение, наноматериалы, нанотехнологии и технологические процессы, экспериментальная диагностика структур и веществ, компьютерное моделирование низкоразмерных структур, улучшение характеристик элементов и устройств полупроводниковой электроники, поиск материалов для систем хранения и передачи цифровой информации, исследование и разработка технологии получения низкоразмерных полупроводниковых систем, катализаторов, метаматериалов и органических материалов для электроники, исследование материалов и систем терагерцовой электроники. Благодаря организации в структуре Центра коллективного пользования «Высокие технологии и аналитика наносистем» (ЦКП «ВТАН») АТИЦ успешно сотрудничает с научными, образовательными организациями и предприятиями реального сектора экономики России, Сибирского региона и сопредельных стран. Основной объем научных исследований выполняется сотрудниками молодежной Лаборатории функциональной диагностики низкораз-

мерный структур для нанoeлектроники (ЛабФДНС), что способствует вовлечению обучающихся и молодых сотрудников НГУ в выполнение актуальных и востребованных научно-исследовательских работ, и это обеспечивает им высокий уровень подготовки по избранным направлениям.

Ключевые слова

материаловедение, нанотехнологии, материалы для систем передачи и хранения информации, терагерцовое излучение, методы диагностики материалов, ЦКП

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FSUS-2020-0029. Авторы отмечают, что представленные в данной работе материалы получены в исследованиях на оборудовании ЦКП «ВТАН» НГУ, поддержанным Минобрнауки России по соглашению № 075-12-2021-697. Авторы признательны партнёрам в ОНЦ СО РАН за предоставление образцов и проведение совместных НИР. Особая благодарность сотрудникам АТИЦ и ЦКП «ВТАН» НГУ, коллегам в ИФП СО РАН, ИК СО РАН и ИЯФ СО РАН за предоставление текстовых и иллюстративных материалов для формирования данной публикации. Выражаем благодарность за неоценимую поддержку в работе и становлении отдела АТИЦ: ректору НГУ академику РАН Федоруку М. П., проректору по НИД НГУ д-ру физ.-мат. наук Чуркину Д. В., декану ФФ д-ру физ.-мат. наук Блинову В. Е. и зам. декана ФФ д-ру физ.-мат. наук Цыбуле С. В., а также декану ФФ в 2010–2018 гг. академику РАН Бондарю А. Е. и ректорам НГУ академику РАН Диканскому Н. С. (1997–2007) и д-ру хим. наук Собянину В. А. (2007–2012).

Для цитирования

Гейдт П. В., Аржанников А. В., Асеев А. Л., Шкляев А. А., Володин В. А., Азаров И. А., Зайковский В. И., Уткин Д. Е., Ларичев Ю. В., Чепкасов С. Ю., Кузнецов С. А. Аналитический и технологический исследовательский центр «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» ФФ НГУ: история, становление и достигнутые результаты // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 3. С. 66–88. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-66-88

Analytical and Technological Research Center “High Technologies & Nanostructured Materials”: History, Formation and Achieved Results

**Pavel V. Geydt¹, Andrey V. Arzhannikov², Alexander L. Aseev³,
Alexander A. Shklyayev⁴, Vladimir A. Volodin⁵, Ivan A. Azarov⁶, Vladimir I. Zaikovskii⁷,
Dmitry E. Utkin⁸, Yuri V. Larichev⁹, Sergey Y. Chepkasov¹⁰, Sergey A. Kuznetsov¹¹**

^{1–11}Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russia

²Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russia

^{3–6,8,11}Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS
Novosibirsk, Russia

^{7,9}Boreskov Institute of Catalysis SB RAS
Novosibirsk, Russia

¹p.geydt@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3266-826X>

²arzhannikov@phys.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8074-9737>

³a.aseev@nsu.ru

⁴a.shklyayev@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7271-3921>

⁵v.volodin@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1431-8242>

⁶i.azarov@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9571-2227>

⁷v.zaikovskii@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6590-7242>

⁸d.utkin@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9510-5427>

⁹i.larichev@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1172-7515>

¹⁰s.chepkasov@post.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9462-0259>

¹¹sakuznetsov@nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1627-8125>

Abstract

The article provides information about the history of formation, development, main recent activities and achieved results of the Analytical and Technological Research Center of the Faculty of Physics of Novosibirsk State University (ATRC NSU) during its 15 years of operation. The main areas of physical research are: modern materials science, nanomaterials, nanotechnologies and technological processes, experimental diagnostics of structures and substances, development

of methods for nanostructures fabrication, computer simulation of low-dimensional structures, improvement of the characteristics of solid-state semiconductor electronics, search for materials for storage and transfer of digital information, study of technological properties of low-dimensional semiconductors, catalysts, metamaterials and organic optoelectronics, study of materials and systems for terahertz electronics. Due to the organization of the Shared Research Facilities “High Technologies and Analytics of Nanosystems” (CCU “VTAN”) within the structure, ATRC successfully cooperates with scientific and educational organizations and with industrial companies of the real sector of the economy in the Siberian region, Russia and neighboring countries. The main part of scientific research is carried out by the staff of the youth Laboratory of Functional Diagnostics of Nanoscale Systems for Nanoelectronics (LabFDNS) that contributes to the involvement of students and young employees of NSU into the implementation of relevant in-demand research work, and thus provides them with a high level of training in their chosen specialty.

Keywords

materials science, scientific management, nanotechnologies, information storage, information transmission, terahertz radiation, shared core facilities, methods of material diagnostics

Funding

The work was supported by the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation FSUS-2020-0029. The authors are grateful to the shared research facilities “VTAN” of Novosibirsk State University supported by the Agreement no. 075-12-2021-697 for providing access to the equipment. We are grateful to the colleagues at the Omsk Scientific Center of SB RAS for providing samples and conducting joint research, to the staff of ATRC/CCU “VTAN” NSU and colleagues at the Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Borekov Institute of Catalysis SB RAS and Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS for providing materials for this publication. We appreciate the invaluable support in our work and establishment of the ATRC department of: the NSU Rector, the Academician of RAS M. P. Fedoruk, Vice-rector for Scientific Research, Sc.D. in Physics and Mathematics D. V. Churkin, Dean of the Faculty of Physics, Sc.D. in Physics and Mathematics V. E. Blinov and Deputy Dean of the Faculty of Physics, Sc.D. in Physics and Mathematics S. V. Tsybulya, as well as the Academician of RAS A. E. Bondar (Dean of the Faculty of Physics in 2010–2018), the Academician of RAS N. S. Dikansky (Rector of NSU in 1997–2007) and Sc.D. in Chemistry V. A. Sobyanyan (the NSU Rector in 2007–2012).

For citation

Geydt P. V., Arzhannikov A. V., Aseev A. L., Shklyayev A. A., Volodin V. A., Azarov I. A., Zaikovskii V. I., Utkin D. E., Larichev Yu. V., Chepkasov S. Y., Kuznetsov S. A. Analytical and Technological Research Center “High Technologies & Nanostructured Materials”: History, Formation and Achieved Results. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 3, pp. 66–88. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-3-66-88

Введение: история создания и развитие инфраструктуры

История создания и развития Аналитического и технологического исследовательского центра (АТИЦ) берет начало в 2007 году. На конкурс Министерства образования и науки РФ по развитию классических университетов в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Индустрия наносистем и материалы» был заявлен проект, направленный на создание в НГУ принципиально нового исследовательского центра в области нанотехнологий и наук о наноматериалах. В этом проекте предусматривалась полномасштабная реконструкция правого крыла главного корпуса НГУ (ныне корпус ФФ НГУ) и пристройки к корпусу Высшего колледжа информатики НГУ. Поданная от НГУ заявка с описанием проекта была одобрена к финансированию объемом около 1 млрд рублей, из которых более половины было израсходовано на закупку современного научно-исследовательского оборудования диагностической и технологической направленности.

По результатам выполнения указанного проекта уже в конце 2007 года на отремонтированных площадях было размещено закупленное оборудование и открыт научно-образовательный комплекс «Наносистемы и современные материалы» (НОК НСМ). А. В. Аржанников (д-р физ.-мат. наук, декан ФФ НГУ в 2000–2010 годах), руководитель коллектива, составившего заявку на выполнение данного проекта, возглавил этот отдел в должности директора НОК НСМ. Значительный вклад в разработку этого проекта внесли кандидаты физ.-мат. наук Зарвин А. Е., Мадирбаев В. Ж. и Аржанникова С. А., которые в дальнейшем обеспечивали высокоэффективную организационную работу по становлению и развитию НОК НСМ. В последующие годы были продолжены работы по закупке, монтажу и пуско-наладке оборудования и приборов, размещаемых в НОК НСМ, при поддержке правительства Российской Федерации и Администрации Новосибирской области, контролировавших становление НОК НСМ и процесс обнов-

ления НГУ (рис. 1а). Внимание и поддержку организации АТИЦ оказал нобелевский лауреат (премия по физике 2000 года) Ж. И. Алфёров, избранный почетным доктором НГУ 10 апреля 2007 г. и вновь посетивший АТИЦ 25 ноября 2011 г. (рис. 1б). Направления развития полупроводниковой электроники, в частности, ее практическое развитие в РФ и научные основы полупроводниковых гетероструктур были заложены этим выдающимся отечественным физиком. Базовые работы Ж. И. Алфёрова приведены в ссылках [1–3].

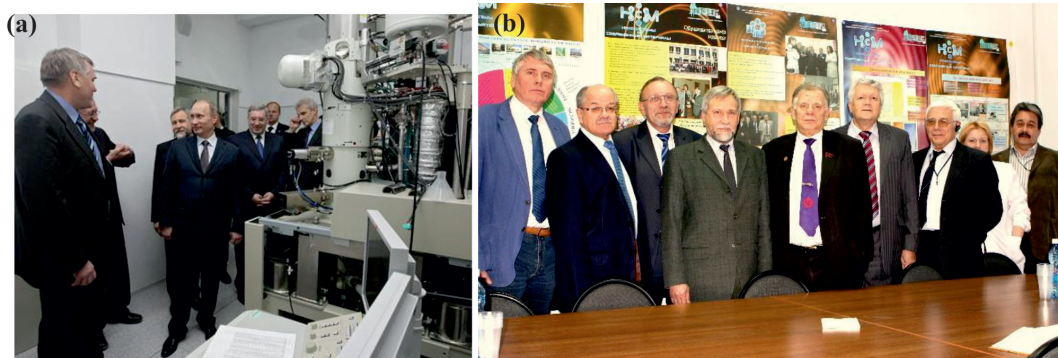


Рис. 1. (а) Визит В. В. Путина в АТИЦ НГУ 8 апреля 2010 г. Слева направо: заведующий кафедрой физики полупроводников ФФ НГУ А. В. Латышев, ректор НГУ В. А. Собянин, директор НОК НСМ А. В. Аржанников, премьер-министр РФ В. В. Путин, губернатор НСО В. А. Толоконский, министр образования и науки РФ А. А. Фурсенко; (б) Визит Ж. И. Алфёрова 24 ноября 2011 г. Слева направо: член-корр. РАН А. В. Латышев, вице-губернатор НСО Г. А. Сапожников, ректор НГУ В. А. Собянин, директор АТИЦ А. В. Аржанников, академик Ж. И. Алфёров, председатель СО РАН А. Л. Асеев, заведующий ОПФ НГУ А. Е. Зарвин, канд. физ.-мат. наук С. А. Аржанникова, канд. физ.-мат. наук В. Ж. Мадирбаев

Fig. 1. (a) Visit of V.V. Putin at ATRC NSU on April 8th 2010. From left to right: Head of the Semiconductor Physics Department of NSU Latyshev A. V., Rector of NSU Sobyenin V. A., Director of NOK NSM Arzhannikov A. V., Prime Minister of the Russian Federation Putin V. V., Governor of the Novosibirsk Region Tolokonksy V. A., Minister of Education and Science of the Russian Federation Fursenko A. A. (b) Visit of Zh. I. Alferov on November 24th, 2011. From left to right: corresponding member of RAS Latyshev A. V., Vice-Governor of the Novosibirsk Region Sapozhnikov G. A., Rector of Novosibirsk State University Sobyenin V. A., Director of ATRC Arzhannikov A. V., Academician of RAS Alferov Zh. I., Chairman of SB RAS Aseev A. L., Head of the NSU General Physics Department Zarvin A. E., Ph.D. Arzhannikova S. A., Ph.D. Madirbaev V. Zh.

Ввиду высокой заинтересованности научно-исследовательских коллективов учреждений Российской Федерации в использовании новых высококласных научных приборов в стране получила развитие программа центров коллективного пользования приборами и оборудованием. В рамках этой программы в 2010 году в НГУ был открыт Центр коллективного пользования «Высокие технологии и аналитика наносистем» (ЦКП «ВТАН») в статусе подразделения АТИЦ, обеспечивающего оказание услуг по проведению научно-исследовательских работ в интересах заказчиков со стороны подразделений НГУ, институтов Сибирского Отделения РАН и профильных индустриальных заказчиков в Сибирском регионе. Более того, в последующие годы в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» ЦКП «ВТАН» обеспечивал возможность проведения научно-исследовательской работы на новом оборудовании для студентов и аспирантов из университетов, расположенных по всей стране. Для реализации широкого охвата территорий РФ в сфере оказания услуг по проведению научно-исследовательских работ ЦКП «ВТАН» был зарегистрирован на национальном портале ЦКП РФ (<https://ckp-rf.ru/ckp/3209/>). К 2021 году средняя загрузка оборудования этого ЦКП составила более 80 %, а ежегодное количество заказчиков услуг превысило 25.

Следует отметить, что в рамках первой очереди объявляемого регулярного конкурса на выделение мегагрантов РФ, предназначенных для приглашения ведущих зарубежных ученых,

в 2010 году получил финансирование проект #11.G34.31.0003, сформулированный коллективом под руководством А. В. Аржанникова и поданный от НГУ под названием «Лаборатория перспективных исследований по миллиметровому и терагерцовому излучению» (ЛПИМТИ). На роль руководителя этого проекта был приглашен ученый мирового уровня, профессор М. А. Тумм, который в тот год возглавлял институт с аналогичной направленностью исследований в Центре научно-технологических исследований города Карлсруэ (Германия). За время реализации этого проекта (в 2010–2012 годах) было сформировано ядро коллектива по исследованию ТГц-технологий и ТГц-материалов, а также развиты принципы, которые легли в основу работы сектора микроволновых физико-химических технологий, расположенного в цокольном этаже помещений АТИЦ. В 2014 году был введен в работу современный электронный литограф на основе РЭМ фирмы Raith для развития сектора производства наноструктур с латеральными размерами до 20 нм, в том числе для создания элементов нанoeлектроники и для ТГц-систем.

В 2018 году приказом ректора было утверждено Положение об АТИЦ «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» ФФ НГУ, которое фиксировало перечень основных направлений деятельности центра, состав АТИЦ и основные функции подразделений. Исполняющим обязанности руководителя отдела был назначен академик РАН, д-р физ.-мат. наук А. Л. Асеев. Были обновлены сайты АТИЦ и ЦКП «ВТАН» в его составе [4], произведен ремонт неисправных приборов и сформированы заявки на конкурсы Минобрнауки РФ по финансированию НИР по актуальным направлениям исследований.

Большим шагом в развитии АТИЦ стало создание в 2020 году Лаборатории функциональной диагностики низкоразмерных структур для нанoeлектроники (ЛабФДНС) для выполнения проекта конкурсного Государственного задания на фундаментальные исследования по СНТР РФ на 2020–2023 годы. В соответствии с условиями конкурса и имеющимся финансированием, была утверждена численность лаборатории в составе 25 сотрудников, преимущественно молодых, а заведующим лабораторией стал канд. физ.-мат. наук Гейдт П. В. Целями лаборатории определены: разработка систем и поиск новых материалов для перспективных систем хранения цифровых данных (information storage; memory elements) и передачи информации (data transfer; transmitting systems), в том числе для оперирования большими данными (Big Data). Также в 2020 году АТИЦ ФФ НГУ стал членом консорциума академических институтов и университетов «Посткремниевая нанoeлектроника» (во главе с ИФП СО РАН) для выполнения исследовательского проекта в 2020–2022 годах. В 2021 году благодаря выигранному конкурсу ФЦП Минобрнауки РФ началась модернизация ЦКП «ВТАН», в рамках которого был введен в строй новый атомно-силовой микроскоп Dimension Icon производства компании Bruker (США) с набором дополнительных модулей уникальной для РФ комплектации.

Созданный комплекс уникальных приборов и научно-исследовательского, технологического оборудования, который служит сейчас основой инфраструктуры АТИЦ, обеспечивает выполнение учебных, курсовых, дипломных работ студентами ФФ и ФЕН НГУ, стажировки обучающихся из НГТУ и проведение исследований аспирантами НГУ и институтов СО РАН. Кроме того, в этих исследованиях участвуют соискатели научной степени из числа сотрудников предприятий-соисполнителей по совместным проектам со стороны высокотехнологического сектора экономики (OCSiAL, НЭВЗ, НЗПП, ОНИИП). Число таких учебных и исследовательских работ порядка десяти в год.

Диагностические и технологические инструменты АТИЦ и ЦКП «ВТАН» обеспечивают проведение НИОКТР с применением следующих диагностических, аналитических и технологических методов:

- сканирующая зондовая микроскопия;
- растровая электронная микроскопия;
- просвечивающая электронная микроскопия;
- рентгеновская дифрактометрия;

- спектрометрия в широком (0,19-2000 мкм) диапазоне длин электромагнитных волн;
- спектральный анализ от терагерцового до микроволнового диапазона;
- эллипсометрия;
- электрофизические измерения;
- пробоподготовка и локальная модификация нанообъектов;
- электронно-лучевая литография.

Кроме того, в АТИЦ имеется комплекс приборов и оборудования специализированного технологического назначения: гиротронные и магнетронные нагревательные установки, магнетронные напылительные станции и т. п. Часть оборудования, изначально предназначавшегося для НОК, с 2007 года перешла в ведение других подразделений НГУ – например, в Отдел прикладной физики ФФ и кафедру физиологии ФЕН. В общей сложности балансовая стоимость оборудования и приборов в АТИЦ составляет в 2022 году порядка 400 млн рублей.

Результаты научных исследований и подготовки научно-инженерных кадров по различным направлениям

1. Эпитаксиальный рост и сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)

Приборную основу этого направления исследований в АТИЦ составляет сверхвысоковакуумный прибор VT STM фирмы Scienta Omicron (Германия) (рис. 2а). Данный прибор позволяет получать изображения поверхностей различных материалов с атомарным разрешением (рис. 2б), что позволяет изучать эволюцию состояния поверхностей при температурном воздействии или в результате нанесения на них тонких слоев различных материалов, которое осуществляется внутри вакуумной системы самого прибора. Используя изображения СТМ чистых граней (110) кремния, а также поверхностей, наклоненных к этой грани, в сочетании с проведением квантово-химических расчетов из первых принципов (*ab initio*), удалось расшифровать атомную структуру чистых реконструированных поверхностей кремния. Было установлено (см.: [5]), что структура поверхностей кремния формируется с помощью универсальных блоков, показанных на рисунке 1в.

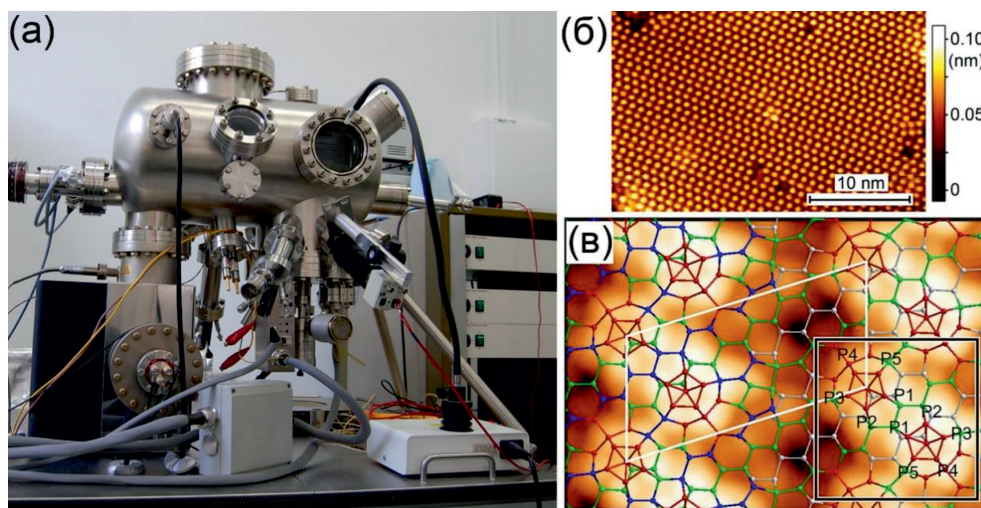


Рис. 2. (а) Фотография экспериментальной установки, оснащенной СТМ. (б) СТМ-изображение чистой поверхности германия с ориентацией (111) и реконструкцией с (2×8) . (в) Модель поверхности кремния со структурой $\text{Si}(17\ 15\ 1)-(2 \times 1)$, которая содержит универсальный структурный блок, формирующий реконструкцию поверхности кремния и германия, ориентированные вблизи грани (110)

Fig. 2. (a) Photograph of the experimental setup equipped with STM. (b) STM image of a clean germanium surface with (111) orientation and reconstruction with (2×8) . (c) Model of a silicon surface with the $\text{Si}(17\ 15\ 1)-(2 \times 1)$ structure, which contains a universal structural block that forms a reconstruction of the silicon and germanium surfaces oriented near the (110) face

При исследовании изменений морфологии поверхности в процессе осаждения германия на подложку из кремния было обнаружено новое явление в системе Si–Ge (рис. 3). Было установлено, что при сравнительно высоких температурах (750 °C и выше) в этой системе реализуется явление твердотельной несмачиваемости подложки кремния слоями SiGe. Показано, что подложки кремния, покрытые частицами SiGe, демонстрируют сильные широкополосные антиотражающие характеристики [6]. Результаты исследования резонанса Ми в структурах Ge и перспективы полупроводниковой электроники в этом направлении подробно описаны в публикациях [7; 8].

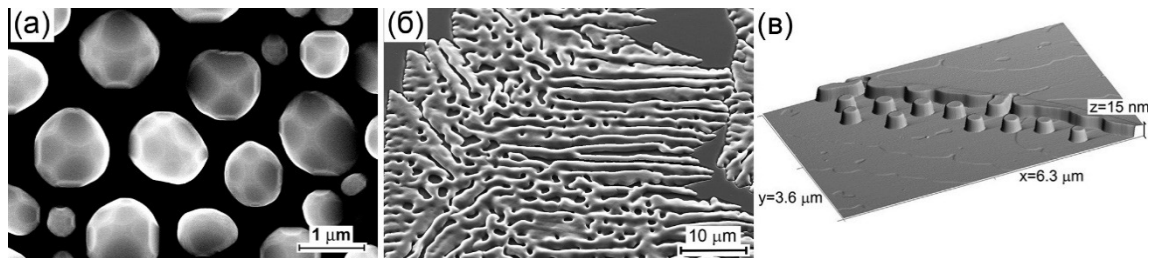


Рис. 3. (а) и (б) РЭМ-изображения структур SiGe на поверхностях кремния с ориентацией (100) и (111) соответственно, полученные в результате реализации явления твердотельной несмачиваемости. (в) СТМ-изображение поверхности слоя SiGe на Si(111), сформированной под действием направленной электромиграции
 Fig. 3. (a) and (b) SEM images of SiGe structures on silicon surfaces with (100) and (111) orientations, respectively, obtained as a result of the implementation of the solid-state nonwettability phenomenon; (c) STM image of the surface of the SiGe layer on Si(111) formed under the action of directed electromigration

2. Колебательная спектроскопия

Вибрационная (колебательная) спектроскопия в АТИЦ включает две методики: спектроскопию комбинационного (неупругого) рассеяния света (также называемая RAMAN) и Фурье-спектроскопию инфракрасного поглощения (FTIR). Приборную базу этого направления обеспечивает спектрометр комбинационного рассеяния света (КРС) фирмы Horiba Jobin Yvon (Франция) модели T64000 (рис. 4а), который представляет собой наиболее совершенную разработку дисперсионного спектрометра КРС класса А. Приборы класса А позволяют исследовать спектры КРС в широком спектральном диапазоне (300–1100 нм) с применением различных возбуждающих линий, различных типов лазеров, в УФ, видимой и ближней ИК областях. Эти приборы обладают высоким ($0,1\text{--}0,15\text{ см}^{-1}$) разрешением с высокой воспроизводимостью положения по длинам волн, что дает возможность исследовать низкочастотную (акустическую) область спектра (спектр колебаний решетки). Наличие конфокальной оптики и техники микро-Раман-картографирования позволяет анализировать поверхность исследуемого объекта и проводить его послойный анализ. Примером использования такого преимущества T64000, как работа в акустической области спектра (от нескольких обратных сантиметров от лазерной линии), является возможность записи акустических свернутых колебаний в полупроводниковых сверхрешетках либо акустических мод в молекулярных кристаллах. На рисунке 4б приведен пример спектра КРС для многослойных структур Ge/GeSn в области оптических колебаний. Наличие конфокального микроскопа позволяет получать спектры КРС с субмикронным латеральным разрешением. В этих условиях удалось собрать сигнал с «торца» тонких многослойных структур Ge/GeSn (рис. 4б) и исследовать эффект расщепления фононного дублета по частоте при двусосных механических напряжениях в слоях Ge [9].

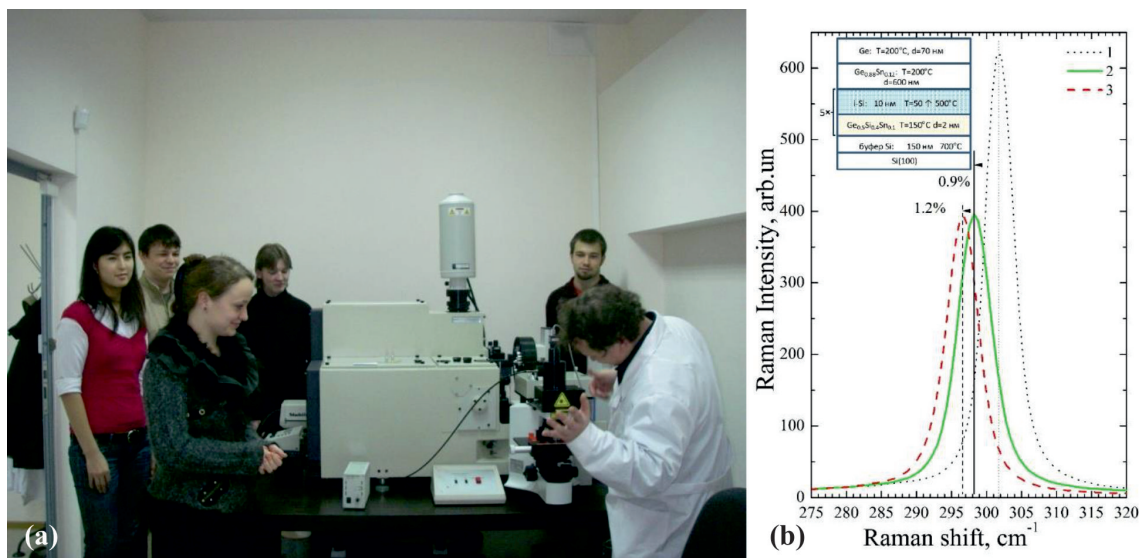


Рис. 4. (а) Демонстрация д-ром физ.-мат. наук Володиным В. А. (справа) функциональных характеристик КРС спектрометра T64000 студентам (слева), заинтересовавшимся данным направлением исследований. (б) Спектры комбинационного рассеяния света монокристаллического германия (кривая 1) и гетероструктуры Ge/GeSnSi при возбуждении фотонами с энергией 2,41 эВ (кривая 2) и 1,89 эВ (кривая 3). Геометрия рассеяния Z(XY)-Z разрешена для синглета. На вставке схематическое изображение многослойной структуры

Fig. 4. (a) Demonstration by Doctor of Physics and Mathematics Volodin V. A. (right) of functional characteristics of the Raman spectrometer T64000 to students (left) interested in this area of research. (b) Raman spectra of single-crystal germanium (curve 1) and Ge/GeSnSi heterostructure upon excitation by photons with energies of 2.41 eV (curve 2) and 1.89 eV (curve 3). The scattering geometry Z(XY)-Z is allowed for the singlet. The inset shows a schematic representation of a multilayer structure

Спектроскопию КРС в АТИЦ комплексно дополняет спектроскопия ИК-поглощения, поскольку некоторые моды, неактивные в КРС, активны в ИК-поглощении, и наоборот. В АТИЦ НГУ есть отечественный Фурье ИК-спектрометр модели ФТ-801 с микроскопической приставкой «Микран», изготовленной малым научным предприятием «Симекс» (ИФП СО РАН, Новосибирск). Рабочий диапазон прибора перекрывает широкий интервал $550\text{--}5\,500\text{ см}^{-1}$ с возможностью его дальнейшего расширения. Это позволяет исследовать составы и структуру множества классов веществ, например, диэлектрических пленок, органических веществ и др. Измерения спектров поглощения проводятся в режиме отражения или пропускания излучения в зависимости от типа образцов.

С использованием данных приборов ежегодно выполняется несколько курсовых и дипломных работ (в том числе иностранными студентами). Результаты, полученные с помощью этих приборов в течение последних пяти лет [10], были использованы при написании одной докторской и четырех кандидатских диссертаций.

3. Высокоразрешающая просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ ВР)

При проведении исследований по этому направлению в АТИЦ используется прибор JEM-2200FS компании JEOL (Япония), который обеспечивает получение изображений объектов посредством просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР, англ. HR-TEM), а также позволяет определить элементный состав методикой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS). Внешний вид этого прибора представлен на рисунке 1а. Пример электронно-микроскопических изображений катализатора Ag/MCM-41 на основе мезопористого алюмосиликата (так называемого MCM-41) с наночастицами серебра представлен

на рисунке 5. Анализ изображений показал, что наночастицы с размерами 1–2 нм расположены внутри каналов МСМ-41, в то время как частицы размером более 4 нм расположены на внешней поверхности. Доля фракции малых наночастиц Ag в МСМ-41 значительно больше количества крупных частиц (см. выноски на рис. 1а), локализованных на внешней поверхности МСМ-41. Это позволило глубже понять механизм каталитического действия данного материала, улучшить его характеристики и расширить область применения данного катализатора [11].

По ПЭМ-изображению пленки AlN на подложке ситалла (рис. 5b) удалось определить толщину пленки, качество интерфейсов «подложка/Al» и «Al/AlN», оценить направленность и размеры кристаллитов AlN в толще поликристаллической текстурированной пленки, а по карте электронной дифракции ПЭМ (SAED) для AlN (см. выноски на рис. 5b) установить, что направление кристаллитов $\langle 001 \rangle$ лежит в диапазоне ± 13 градусов от нормали к поверхности [12]. Исследование проведено при сотрудничестве с Омским научным центром СО РАН. Для изготовления поперечных срезов требуется провести трудоемкую процедуру пробоподготовки и нанесения образцов на медную сетку с аморфным кремнием, затем производится съемка при высоком увеличении ПЭМ.

Высокое разрешение ПЭМ позволяет определить параметры кристаллической решетки также в диспергированных материалах. На рисунке 5c представлено изображение структуры материала в образце порошка электрида вида составов C12A7 (см. описание в пункте 9). Комбинирование результатов ПЭМ с данными методик ПЭМ (SAED) и дифрактометрией РФА в АТИЦ позволяют характеризовать структурное качество кристаллов и наноматериалов.

В качестве добавки для повышения прочностных характеристик материалов широко применяются углеродные нанотрубки (УНТ, англ. CNT). Для исследования свойств УНТ в АТИЦ активно используется методика ПЭМ. В результате исследований были определены параметры роста, включая влияние катализаторов на рост, распределение УНТ по длинам, диаметры, бездефектность, количество индивидуальных слоев (рис. 5d) в многостенных УНТ (МУНТ, англ. MWCNT). Данные работы ведутся в АТИЦ в течение нескольких лет при тесной кооперации с успешным мировым производителем нанотрубок OCSiAl (ООО «Тюбол Центр НСК»).

В области современных полупроводниковых наноструктур (рис. 5e), используя наработки по синтезу сверхрешеток GaAs-AlAs и напряженных сверхрешеток InAs-GaAs, в ИФП СО РАН были выращены и далее в АТИЦ визуализированы гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs между барьерами AlAs в широкозонной матрице GaAlAs. Подробнее об анализе сверхрешеток можно прочесть в [13, с. 182].

Наличие в АТИЦ столь высококлассного многофункционального оборудования, в особенности ПЭМ, позволяет коллективу отдела активно сотрудничать с научными и образовательными организациями стран СНГ, Юго-Восточной Азии и Европы. Примером такого интереса к сотрудничеству служит визит в АТИЦ в марте 2019 года (рис. 6) нобелевского лауреата 2014 года Хироси Амано (университет Нагои, Япония).

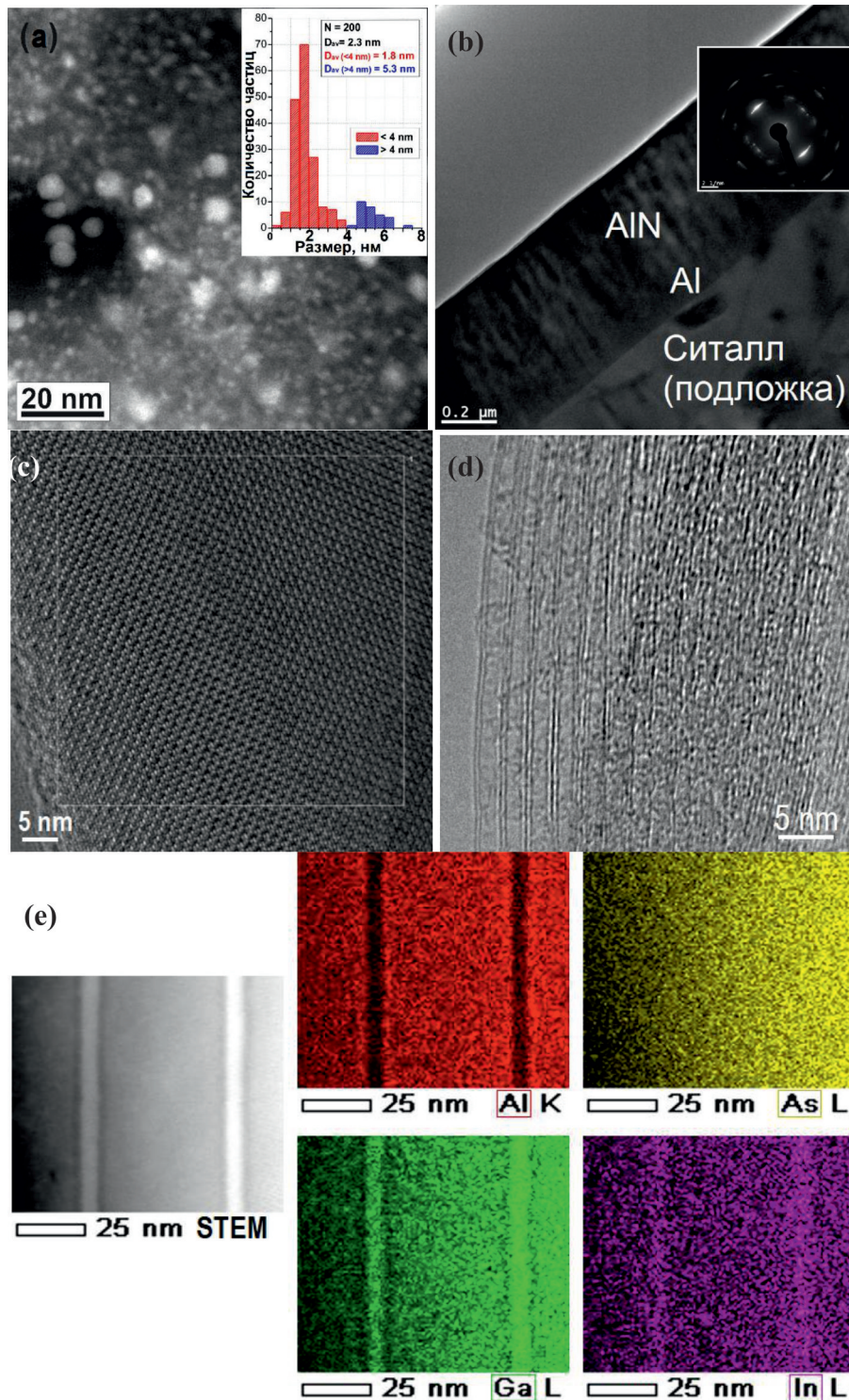


Рис. 5. (a) ПЭМ ВР для катализатора Ag, в выноске – гистограмма распределения диаметров частиц катализатора в мезопористом алюмосиликате MCM-41; (b) ПЭМ изображение поперечного среза пленки AlN, в выноске – электронная дифракция SAED от участка AlN в ПЭМ; (c) ПЭМ ВР изображение атомной решетки электрида Si2A7, прокаленного при 1450 °C; (d) микроскопическое изображение с различными стенками единичных МУНТ получено Кривякиным Г. К. для TUBALL™; (e) HAADF STEM-изображение и карты распределения элементов (подписаны): алюминия (К-линия), мышьяка (L-линия), галлия (L-линия) и индия (L-линия), полученные цифровой обработкой EDX-спектров на JEOL JEM-2200FS с корректором aberrаций осветительной системы при ускоряющем напряжении 200 кВ. Шкала на картах элементов – 25 нм

Fig. 5. (a) HR-TEM for Ag catalyst, in the inset a histogram of the distribution of catalyst particle diameters in mesoporous aluminosilicate MCM-41 is shown. (b) TEM image of a cross section of an AlN film; in the inset, SAED electron diffraction from an AlN region in TEM is shown. (c) HR-TEM image of the atomic lattice of C12A7 electride calcined at 1450°C. (d) Microscopic image with distinguishable walls of single MWCNTs obtained by G. K. Krivyakin for TUBALL™. (e) HAADF STEM image and element distribution maps (signed): aluminum (K-line), arsenic (L-line), gallium (L-line) and indium (L-line), obtained by digital processing of EDX spectra on JEOL JEM-2200FS with lighting system aberration corrector at 200 kV accelerating voltage. The scale on the element maps is 25 nm



Рис. 6. А. Л. Асеев рассказывает о научных исследованиях в АТИЦ и перспективах их дальнейшего развития лауреату Нобелевской премии по физике 2014 года Х. Амано 15 марта 2019 г. рядом с ПЭМ JEOL JEM-2200FS. Слева направо: оператор ПЭМ м. н. с. Кривякин Г. К., почетный доктор НГУ Амано Х., ректор НГУ Федорук М. П., директор АТИЦ Асеев А. Л., заведующий ЛабФДНС Гейдт П. В.

Fig. 6. Academician of RAS A. L. Aseev talks about scientific research at the ATRC and the prospects for their further development to the 2014 Nobel Prize in Physics Laureate H. Amano on March 15th, 2019 next to the JEOL JEM-2200FS TEM. From left to right: TEM operator, junior researcher Krivyakin G. K., Honorary Doctor of NSU Amano H., Rector of NSU Fedoruk M. P., Director of ATRC Aseev A. L., Head of LabFDNS Geydt P. V.

4. Электронная литография

Для проведения исследований по электронной литографии (Electron Beam Lithography, EBL) в АТИЦ используется установка Pioneer фирмы RAITH (Германия), показанная на рисунке 7а. Эта установка позволяет с высокой геометрической точностью облучать остросфокусированным пучком электронов чувствительный к электронам материал – резист, нанесенный на поверхность подложек в виде сплошных пленок толщиной, как правило, около 200 нм. Участки резиста, подвергнутые такому воздействию, называемому экспонированием, изменяют свою растворимость, поэтому после помещения подложки с экспонированной пленкой резиста в растворитель (проявитель) на ее поверхности образуется маска, соответствующая заданной геометрии. Применение различных методов травления подложки через сформированную маску и/или осаждения материала на ее поверхность позволяет решать разные задачи по структурированию и модификации поверхности в планарной технологии и при создании метаматериалов. В частности, используя метод сверхвысоковакуумного осаждения, возможно получение востребованных покрытий из упорядоченных частиц германия (Ge) на поверхности кремниевой (Si) подложки: конусообразной формы (рис. 7б), в форме диска (рис. 7в). Такие структуры в зависимости от формы частиц способны изменять оптоэлектронные свойства под-

ложки и служить в качестве антиотражающих покрытий. Было показано сильное влияние геометрических параметров Ge-частиц на их спектры отражения в ИК и видимой области спектра за счет возбуждения Ми-резонансов [14]. Структуры, показанные на рисунке 7г, которые представляют собой двумерный фотонный кристалл, были получены методом плазмохимического травления КНИ-подложки через маску резиста [15].



Рис. 7. (а) Установка Pioneer (RAITH) и РЭМ изображения двумерных регулярных структур Ge, выращенных и визуализированных с ее помощью: (б) конусообразные, (в) в форме диска; (г) двумерный фотонный кристалл, см. шкалу 5 мкм внизу; (д) гетероструктура образца с квантовыми точками Ge с перфорированной пленкой золота на поверхности
 Fig. 7. (a) Pioneer lithography apparatus (RAITH) and SEM images of two-dimensional regular Ge structures grown and visualized with its help: (b) cone-shaped, (c) disk-shaped. (g) 2D photonic crystal, see 5 μm scale below. (d) Heterostructures of a sample with Ge quantum dots with a perforated gold film on the surface

В свою очередь такие структуры способны избирательно излучать свет (фотолюминесценция) в зависимости от геометрических параметров: периода, глубины и диаметра отверстий. Они могут применяться в лазерах, волноводах, усилителях и т. д. Еще одним широко распространенным технологическим приемом, применяемым совместно с электронной литографией, является металлизация. На поверхности подложки в результате процесса металлизации, схожего с формированием частиц из Ge, образуются металлические структуры. Создание массива упорядоченных, фиксированного размера золотых или алюминиевых дисков широко используется в плазмонике [16]. Пример плазмонной структуры с перфорированной пленкой золота на поверхности гетеросистемы с квантовыми точками Ge в кремнии приведен на рисунке 7д. Такие структуры при воздействии ИК-излучения приводят к генерации поверхностных плазмонных резонансов проводящих электронов и востребованы в современных ИК-детекторах и системах визуализации.

5. Малоугловое рентгеновское рассеяние

Уже почти 15 лет в АТИЦ развивают метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР, в англоязычной литературе SAXS), становление которого было инициировано д-ром биол. наук Тузиковым Ф. В.[†] [17]. Метод МУРР на приборе S3 Micro производства компании Hecus (Австрия) (рис. 8) используется в АТИЦ для анализа размеров и формы различных объектов, изучаемых в таких научных направлениях, как катализ, неорганическая химия и биология. В частности, весьма распространенным объектом для МУРР является суспензия коллоидных наночастиц в растворе. Для данного метода нет ограничений по агрегатному состоянию объектов, как, например, для рентгеновской дифрактометрии (РФА, англ. XRD), и с его помощью можно эффективно изучать жидкие, аморфные материалы и полимерные наноматериалы.



Рис. 8. Фотография малоуглового рентгеновского дифрактометра S3 Micro фирмы Hecus
Fig. 8. Photograph of a small-angle X-ray diffractometer (SAXS) Hecus S3 Micro

АТИЦ совместно с кафедрой химии твердого тела НГУ готовит студентов к работам на пучках синхротронного излучения, обучая их методикам работы на современных приборах в последовательности от РФА и МУРР до синхротрона. В настоящее время ведутся разработки в области материаловедения, а с повышением доступности синхротрона в Сибирском регионе становятся все более востребованными исследования свойств биологических объектов. Так, с помощью метода МУРР проводятся исследования процессов агрегации различных функциональных материалов, к которым относятся полимерные композиты для регенеративной медицины [18], а также упорядоченные мезопористые материалы (SBA-15, MCM-41 и др.) и различные каркасные металл-органические структуры (metal-organic framework) [19].

6. Эллипсометрия широкого оптического диапазона

Сектор эллипсометрии (ellipsometry) в АТИЦ активно работает с 2008 года. В приборном парке АТИЦ используются три разновидности эллипсометров исследовательского класса, построенные по статической фотометрической схеме. К ним относятся: 1) спектральный эллипсометр для диапазона длин волн 250–1 000 нм и углов падения 45–70 градусов, 2) сканирующий эллипсометр для построения карт поверхности образца размером до 150 × 150 мм с разрешением вдоль поверхности 5 мкм и 3) высоковакуумный эллипсометр для измерения поверхностных процессов в вакууме с частотой повторения измерений от 1 мс. Эллипсометры показаны на рисунке 9.

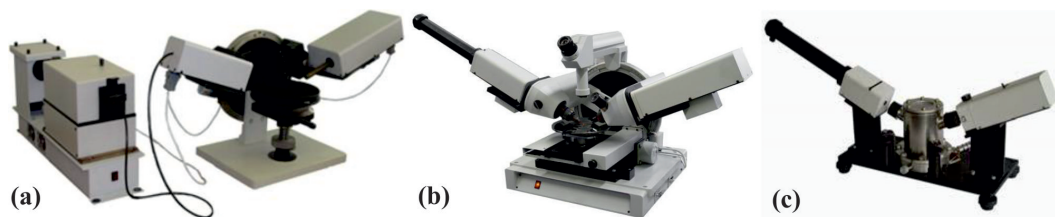


Рис. 9. Научные приборы отечественного производства ИФП СО РАН, изготовлены и используются при активном участии сотрудников ИФП СО РАН: С. В. Рыхлицкого, В. А. Швеца и И. А. Азарова (по совместительству м. н. с. в АТИЦ ФФ НГУ): (а) спектральный эллипсометр, (b) лазерный сканирующий микроэллипсометр, (c) вакуумный эллипсометр

Fig. 9. Scientific instruments of domestic production of the ISP SB RAS, manufactured and used with the active participation of the staff of ISP SB RAS: S. V. Rykhilitsky, V. A. Shvets and I. A. Azarov (junior researcher at ATRC NSU): (a) spectral ellipsometer, (b) laser scanning microellipsometer, (c) vacuum ellipsometer

Унифицированные программные продукты позволяют быстро обучать новых пользователей работе и получать результаты оптических измерений. Чувствительность метода позволяет определять толщины и оптические свойства плёнок, диэлектрические функции объёмных материалов, строить карты распределения свойств по поверхности пластин, в отдельных случаях, наблюдать субмонослойные покрытия. Совместно с другими методами оптических исследований (фотометрия, КР- и ИК-спектроскопия) эллипсометрия образует кластер оптических исследований, позволяющий многосторонне описывать новые материалы и структуры. Преимущества этих оптических методов – невозмущающий контроль, быстрота проведения измерения и предварительного анализа, относительно невысокая стоимость оборудования. Примером проводимых исследований служат: контроль прецизионного нанесения слоев GeO методом термического испарения нанокристаллического гетероматериала Ge:GeO₂ при контроле толщины с помощью эллипсометра в высоковакуумной камере [20], исследование разреженных высокопористых столбчатых покрытий на основе оксидов циркония и титана для сцинтилляторов нового поколения [21] и т. д.

7. Технологии создания объектов и их диагностика в частотном интервале от микроволнового до терагерцового диапазона

В качестве одной из важных работ технологической направленности, проводимых АТИЦ в области использования мощного микроволнового излучения, следует выделить исследование спекания нанокompозитных материалов для катодов твердооксидных топливных элементов с использованием гиротронного генератора на частоте 24 ГГц с мощностью 5 кВт. В отличие от традиционного использования генераторов промышленной частоты 2,45 ГГц (при длине волны 12,5 см), которая не позволяет сформировать равномерное облучение объектов сантиметровых размеров, в нашем случае повышенная на порядок величины частота обеспечивает повышенный однородный энерговклад в локальных пространственных областях, что принципиально необходимо для достижения требуемых функциональных свойств создаваемых материалов [22]. Более того, по сравнению с термическим спеканием в традиционных печах, микроволновый нагрев позволяет получить плотные функциональные слои при рабочих температурах на 200–300 °С ниже. В этих условиях удастся избежать образования побочных фаз, растрескивания и отслаивания функциональных слоев, а также до двух порядков повысить кислородную подвижность в нанокompозитах. Это позволило довести удельные мощности топливных элементов до 500 мВт/см² при 700 °С с использованием в качестве топлива влажного H₂ или смеси CH₄ + H₂O, и эти параметры в полной мере соответствуют требованиям к изделиям с позиции их практического применения [23].

Другой комплекс работ по микроволновому направлению – исследования частотно-селективных свойств объектов по отношению к воздействию потоков излучения, генерируемых в широком интервале частот: от терагерцового до микроволнового диапазона. Эти работы включают: спектроскопию материалов в области миллиметровых и субмиллиметровых (мм/субмм) волн в интервале частот 0,05–20 ТГц; разработку функциональных оптических элементов мм/субмм-фотоники на основе искусственно структурированных материалов – так называемых метаматериалов или метаструктур (см. рис. 7); разработку новых методик и приборных решений для исследования оптически непрозрачных материалов и сред на мм/субмм-волнах, включая методы визуализации объектов с применением новых физических принципов. Развитие этих направлений работы вызвано большой практической значимостью получаемых результатов. Это связано с уникальными свойствами такого излучения: высокой способностью проникать через оптически непрозрачные материалы без ионизирующего эффекта, высокой чувствительности к характеристикам жидких и аморфных сред, достижимостью высокого пространственного разрешения при визуализации скрытых объектов, наличием переходов в органических молекулах и молекулярных кристаллах, высокой информационной ёмкостью при беспроводной передаче данных.

К используемым в АТИЦ спектральным приборам в диапазоне миллиметровых волн относятся квазиоптический субтерагерцовый ЛОВ-спектрометр, разработанный в ИОФ АН (г. Москва) и Фурье-спектрометр «Vertex 80v» фирмы Bruker (Германия). ЛОВ-спектрометр на основе ламп обратной волны (ЛОВ) реализован по схеме интерферометра Маха – Цендера, снабжен плавно перестраиваемыми монохроматическими источниками излучения, перекрывающими диапазон частот 0,05–1,1 ТГц, а также широкополосным детектором на основе оптоакустического преобразователя (ячейки Голя). Этот оптоакустический преобразователь по своим характеристикам в субмиллиметровом и терагерцовом диапазонах близок к другим типовым болометрическим регистраторам терагерцового и инфракрасного диапазонов [24]. Прибор оснащен автоматизированным 2D-сканером, что позволяет получить 2D-изображения объектов по амплитудным и фазовым спектрам пропускания и отражения [25–27] (рис. 10а,б).

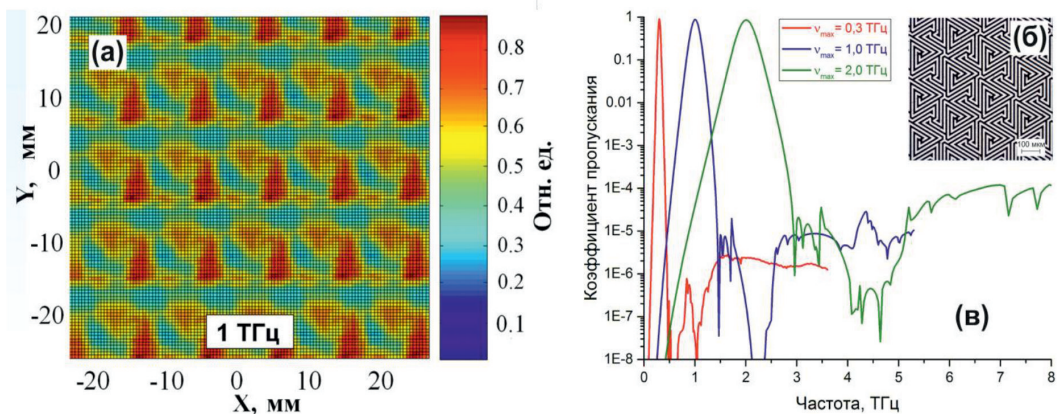


Рис. 10. (а) Пример изображения «на пропускание» на длине волн $\lambda = 0,3$ мм (1 ТГц) для кремниевой пластины с изготовленными на ней чипами, демонстрирующий чувствительность субмм-излучения к концентрации носителей заряда в полупроводнике; (б) микрофотография метаструктуры с заданными электродинамическими свойствами (черный цвет соответствует алюминию); (в) спектры пропускания разработанных в АТИЦ высококонтрастных полосовых фильтров на основе метаструктур с максимумами пропускания на 0,3, 1,0 и 2,0 ТГц соответственно

Fig. 10. (a) an example of a “transmission” image at a wavelength of $\lambda = 0.3$ mm (1 THz) for a silicon wafer with chips fabricated on it, demonstrating the sensitivity of sub-mm radiation to the concentration of charge carriers in a semiconductor; (b) micrograph of a metastructure with given electrodynamic properties (black color corresponds to aluminum); (c) transmission spectra of high-contrast band-pass filters based on metastructures with transmission maxima at 0.3, 1.0, and 2.0 THz, respectively, developed at ATRC

Разработанные в АТИЦ высококонтрастные полосовые фильтры на основе частотно-селективных структур позволили создать уникальный восьмиканальный полихроматор для интервала частот 0,1–0,8 ТГц, который используется в ИЯФ СО РАН для спектральных исследований мультимегаваттного потока излучения [28].

Особо отметим Фурье-спектрометр Vertex 80v, который позволяет проводить в АТИЦ измерения амплитудных спектров пропускания и отражения образцов в широком диапазоне частот 1–20 ТГц при использовании одного источника излучения и DTGS-детектора (на основе дейтерированного сульфата триглицина, англ. Deuterated triglycine sulfate). В случае использования криогенного кремниевого болометра обеспечивается возможность проводить измерения в интервале частот 0,2–20 ТГц.

8. Технологии по вакуумному синтезу покрытий

В АТИЦ ФФ НГУ в настоящее время проводятся работы по вакуумному синтезу покрытий на основе металлов и их нитридов, являющихся частью разрабатываемых и создаваемых в АТИЦ микроэлектронных резонаторов, которые работают на объемных акустических волнах (ОАВ). Данные резонаторы представляют собой многослойные структуры пьезоэлектрического преобразователя и акустического брэгговского отражателя. Базовыми элементами таких резонаторов являются пленка алюминия, выполняющая роль электрода, и пленка нитрида алюминия (кристалл или поликристалл, имеющий структурный тип вюрцита), которая способна работать на частотах от 2 до 20 ГГц в качестве пьезоэлектрического преобразователя. Осаждение покрытий алюминия и нитрида алюминия осуществляется в вакуумной камере установки «Спутник» (рис. 11а,б), разработанной и созданной в НГУ А. С. Золкиным† и С. Ю. Чепкасовым. Эта установка позволяет формировать различные функциональные покрытия (металлические, нитридные, карбидные, карбонитридные и т. д.) методами реактивного магнетронного распыления и ионно-лучевого осаждения.

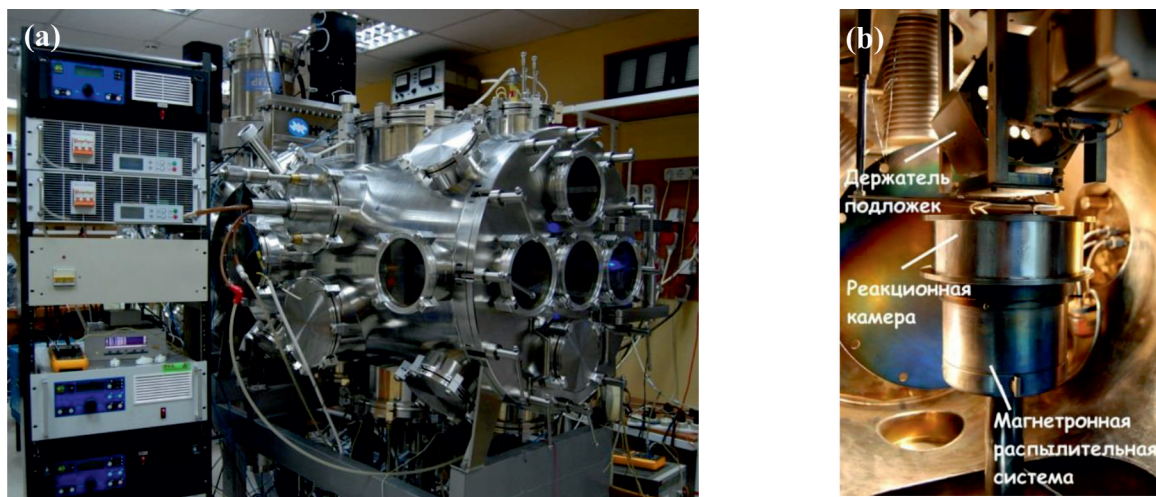


Рис. 11. Вакуумная установка «Спутник»: а – внешний вид с блоком электроники (производства ООО «Прикладная электроника», г. Томск); б – магнетронная распылительная система (МРС), расположенная внутри камеры установки

Fig. 11. Vacuum unit “Sputnik”: (a) external view with the electronics unit (manufactured by Applied Electronics, LLC, Tomsk); (b) magnetron sputtering system (MSS) located inside the installation chamber

Проводимые на этой установке исследования направлены на решение таких задач, как нахождение оптимального режима работы магнетронной распылительной системы (МРС) и условий синтеза пленок, снижение их шероховатости, повышение степени их кристалличности,

обеспечение их определенного химического состава и формирование равномерной толщины пленок на всей поверхности подложки. Для изучения этих характеристик пленок используются различные методы исследования поверхности, такие как: спектроскопия комбинационного рассеяния света, рентгенофазовый анализ, эллипсометрия и спектрофотометрия, имеющиеся в подразделении АТИЦ и описанные выше.

9. Исследования электрида типа C12A7 на базе майенитной керамики

Коллективом Лаборатории ФДНС по основообразующему для АТИЦ проекту госзадания в 2020–2022 годах проведены работы в области поиска, роста и характеристики материалов [29] для новых перспективных систем хранения [30] и передачи [31] информации.

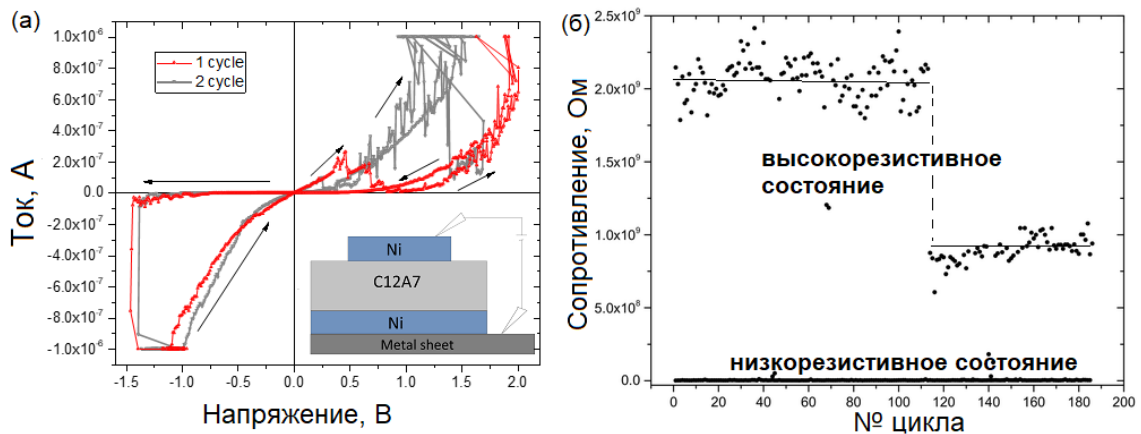


Рис. 12. (а) Гистерезис ВАХ электрида для двух циклов измерения с мемристивным эффектом. Схема измерения элемента показана внизу. (б) Циклические переключения резистивных состояний для образца электрида, прокаленного при 1450 °С

Fig. 12. (a) Hysteresis of the I–V characteristic of the electrider for 2 measurement cycles with the memristive effect. The element measurement scheme is shown below. (b) Cyclic switching of resistive states for an electrider sample calcined at 1450 °C

Одним из наиболее интересных материалов, исследуемых сейчас в АТИЦ, является электрид семейства составов C12A7 с формулой $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}(\text{e}^-)_4$, иначе записываемой (C12A7:e⁻), которая эквивалентна стехиометрии гидроксидных форм прекурсоров при получении керамики термическим спеканием в корундовой ампуле: $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$. В обогащенном кислородом состоянии майенита (аналогичен природному минералу) материал является изолятором, в то время как при замещении двух ионов кислорода O^{2-} на четыре электрона e^- образец при сохранении электронейтральности изменяет цвет от белого до черного через серо-зеленый, а его электрическое сопротивление падает на 14 порядков величины за счет формирования электронного газа вокруг твердого анионного каркаса $[\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64}]^{4+}$. При этом в роли анионов выступают электроны. Одним из существенных плюсов данного материала для электроники является возможность перезаписи информации значительное количество раз – порядка (оценочно) $> 10^{12}$, низкая работа, требуемая для переключения, и при этом высокая скорость переключения и возможность сохранять состояние в течение нескольких лет. Такими характеристиками обладает монокристаллический электрид в системах ReRAM памяти, в то время как в АТИЦ исследуется менее изученная поликристаллическая модификация электрида C12A7, и на ней удалось пронаблюдать как гистерезис ВАХ, отображающий эффект памяти (мемристивный эффект, рис. 12а), так и цикличность перезаписи (рис. 12б). Таким образом, в АТИЦ была доказана принципиальная возможность построения элемента памяти на поликристаллическом электриде вида составов C12A7. Фазовый состав электрида и его

дифференциация от непроводящего майенита была подтверждена результатами рентгенофазового анализа на рентгеновский порошковом дифрактометре ARL X'TRA производства Thermo Fisher Scientific (Швейцария). Работоспособность элемента была экспериментально протестирована во ВКЛ (низкоомное состояние, точки внизу) и ВЫКЛ (высокоомное состояние, точки порядка 1–2 МОм) состояниях вплоть до 190 циклов, но наблюдалось падение сопротивления ВЫКЛ после 110 циклов перезаписи. Тем не менее различия в резистивных состояниях достаточно для хранения информации в элементах памяти [30].

Сотрудниками Лаборатории ФДНС были исследованы структуры, составы и свойства материалов, включая пьезоэлектрические характеристики [32] поликристаллических текстурированных пленок AlN (ПЭМ данной структуры показан на рисунке 5b), полученных методом магнетронного осаждения в высоком вакууме при активном сотрудничестве с Омским научным центром СО РАН. В 2023–2024 годах планируется объединить наработки в области систем хранения и систем передачи информации для разработки комплексных решений при создании современных отечественных систем оперирования большими данными (Big Data).

Заключение

АТИЦ физического факультета НГУ в партнерстве с институтами Новосибирского научного центра обеспечивает проведение исследований высокого международного уровня по различным направлениям физики и химии в интересах Сибирского отделения РАН и предприятий высокотехнологического сектора региональной и общероссийской экономики. К важнейшим направлениям этих исследований относятся: реализация нанотехнологических процессов для получения полупроводниковых и каталитических функциональных материалов, создание микроструктурированных метаповерхностей и метаматериалов для терагерцовой спектральной области излучения, разработка систем хранения и быстрой передачи больших потоков информации.

В ходе проведения исследований обучающиеся в Новосибирском государственном университете, а в последующем его выпускники, приобретают необходимый опыт для достижения высоких научных результатов в вышеуказанных областях и становятся высококвалифицированными специалистами, востребованными в настоящее время для научно-технологического развития в Российской Федерации. Спрос на эти научно-инженерные кадры высок в академических институтах, инновационных промышленных предприятиях и наукоемком бизнесе. АТИЦ ФФ НГУ заинтересован в сотрудничестве при выполнении совместных исследований и проведении работ по направлениям науки и образования, указанным в настоящей статье.

Список литературы

1. Алфёров Ж. И., Казаринов Р. Ф. Полупроводниковый лазер с электрической накачкой // Авторское свидетельство на изобретение. № 181737. 30 марта 1963.
2. Алфёров Ж. И. Физика и жизнь. М.: СПб.: Изд-во Наука, 2001. 287 с.
3. Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures // Semiconductors. 1998. Vol. 32, no. 1. Pp. 1–14.
4. Сайт отдела АТИЦ [Электронный ресурс]: <https://research.nsu.ru/ru/organisations/аналитический-и-технологический-исследовательский-центр-высокие-т/persons/> (дата обращения: 20.05.2022 г.).
5. Zhachuk R. A., Shklyayev A. A. Universal building block for (1 1 0)-family silicon and germanium surfaces // Applied Surface Science. 2019. Vol. 494. Pp. 46–50.
6. Shklyayev A. A., Tsarev A. V. Broadband antireflection coatings made of resonant submicron-and micron-sized SiGe particles grown on Si substrates // IEEE Photonics Journal. 2021. Vol. 13. Pp. 1–12.

7. **Dabard C., Shklyayev A. A., Armbrister V. A., Aseev A. L.** Effect of deposition conditions on the thermal stability of Ge layers on SiO₂ and their dewetting behavior // *Thin Solid Films*. 2020. Vol. 693, no. 7. P. 137681.
8. **Shklyayev A. A., Utkin D. E., Tsarev A. V., Kuznetsov S. A., Anikin K. V., Latyshev A. V.** Interdisk spacing effect on resonant properties of Ge disk lattices on Si substrates // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. P. 8123.
9. **Володин В. А., Тимофеев В. А., Туктамышев А. Р., Никифоров А. И.** Расщепление частот оптических фононов в растянутых слоях Ge // *Письма в ЖЭТФ*. 2017. Т. 105, № 5. С. 305–310.
10. **Володин В. А.** Локализация фононов и фонон-плазмонное взаимодействие в полупроводниковых наноструктурах / Дис... д. ф.-м. н. 20.06.2017 г. ИФП СО РАН.
11. **Mamontov G. V., Gorbunova A. S., Vyshegorodtseva E. V., Zaikovskii V. I., Vodyankina O. V.** Selective oxidation of CO in the presence of propylene over Ag/MCM-41 catalyst // *Catalysis Today*. 2019. Vol. 333. Pp. 245–250.
12. **Асеев А. Л., Гейдт П. В.** Материалы для систем обработки больших данных. I Российская Научная конференция «Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества» (РФИВ) 6–8 октября 2020, г. Омск, РФ.
13. **Гутаковский А. К., Латышев А. В., Чувилин А. Л.** Структура дефектов и границ раздела в полупроводниковых гетеросистемах. Новосибирск: Изд-во Параллель, 2016. 230 с.
14. **Utkin D. E., Anikin K. V., Veber S. L., Shklyayev A. A.,** Dependence of light reflection of germanium Mie nanoresonators on their aspect ratio // *Opt. Materials*. 2020. Vol. 109. Pp. 110466.
15. **Utkin D. E., Shklyayev A. A., Tsarev A. V., Latyshev A. V.** Formation of 2D-PhCs with missing holes based on Si-layers by EBL // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 917. P. 062030.
16. **Yakimov A. I., Kirienko V. V., Bloshkin A. A., Dvurechenskii A. V., Utkin D. E.** Mid-infrared optical resonances in quantum dot photodetectors coupled with metallic gratings with different aperture diameters // *Current Applied Physics*. 2020. Vol. 20, no. 7. Pp. 877–882.
17. **Тузиков Ф. В.** Анализ биологических наноструктур в системах метаболизма белков и липидов: Строение, дисперсный состав и механизмы равновесных взаимодействий макромолекул / Дис... д. б. н. 20.06.2005 г. ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор» Минздрава РФ.
18. **Chernonosova V. S., Kvon R. I., Stepanova A. O., et al.** Human serum albumin in electrospun PCL fibers: structure, release, and exposure on fiber surface // *Polymers for Advanced Technologies*. 2017. Vol. 28, no. 7. Pp. 819–827.
19. **Ларичев Ю. В.** Исследование упорядоченности пористой структуры мезопористого материала SBA-15 методом малоугловой дифрактометрии // *Журнал структурной химии*. 2021. Т. 62, № 1. С. 151–156.
20. **Астанкова К. Н., Володин В. А., Азаров И. А.** О структуре тонких плёнок монооксида германия // *Физика и техника полупроводников*. 2020. Т. 54, № 12. С. 1296–1301.
21. **Azarov I. A., Kuper K. E., Lemzyakov A. G., Porosev V. V., Shklyayev A. A.** Scintillator surface modification by glancing angle deposition of thin ZrO₂ films // *JINST*. 2022. Vol. 17. P. T05013.
22. **Sadykov V., Usoltsev V., Yermeev N., Mezentseva N., Pelipenko V., Krieger T., Belyaev V. et al.** Functional nanoceramics for intermediate temperature solid oxide fuel cells and oxygen separation membranes // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 33, iss. 12. Pp. 2241–2250.
23. **Sadykov V. A., Mezentseva N. V., Bobrova L. N. et al.** *Advanced Materials for Solid Oxide Fuel Cells and Membrane Catalytic Reactors / Advanced Nanomaterials for Catalysis and Energy* (Ed. V. A. Sadykov), Chpt 12, pp. 435–514. Elsevier Inc., 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814807-5.00012-7>
24. **Demyanenko M. A., Esaev D. G., Ovsyuk V. N., Fomin B. I., Aseev A. L., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A.** Matrix microbolometric receivers for infrared and terahertz ranges // *Optical journal*. 2009. Vol. 76, no. 12. Pp. 5–11.

25. Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А. Особенности дифракции электромагнитных волн на регулярно-периодических индуктивных металлических структурах // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 4. С. 11–24.
26. Kuznetsov S. A., Astafyev M. A., Gelfand A. V., Arzhannikov A. V. Microstructured Frequency Selective Quasi-Optical Components for Submillimeter-Wave Applications / Proc. 44th European Microwave Conf. (EuMC 2014), Rome, Italy, October 6–9, 2014. Article no. 6986576, pp. 881–884.
27. Kuznetsov S. A., Lenets V. A., Tumashov M. A., et al. Self-complementary metasurfaces for designing terahertz deflecting circular-polarization beam splitters // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118, no. 13. P. 131601.
28. Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A., et al. Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. Vol. 62. P. 045002.
29. Kapishnikov A. V., Kenzhin R. M., Koskin A. P., Volodin A. M., Geydt P. V. Mayenite synthesis from hydroxide precursors: Structure formation and active sites on its surface // Materials. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 778.
30. Rybak A. A., Yushkov I. D., Nikolaev N. A., Kapishnikov A. V., Volodin A. M., Krivyakin G. K., Kamaev G. N., Geydt P. V. Electrophysical properties of polycrystalline C12A7:e[−] electride // Electronics. 2022. Vol. 11, no. 4. P. 668.
31. Moreno-Peñarrubia A., Kuznetsov S. A., Beruete M. Ultrathin Subterahertz Half-Wave Plate With High Conversion Efficiency Based on Zigzag Metasurface // IEEE Trans. Antennas Propag. 2020. Vol. 68, no. 11. Pp. 1–5.
32. Nikolaev I. V., Geydt P. V., Korobeishchikov N. G., Kapishnikov A. V., Volodin V. A., Azarov I. A., Strunin V. I., Gerasimov E. Y. The Influence of Argon Cluster Ion Bombardment on the Characteristics of AlN Films on Glass-Ceramics and Si Substrates // Nanomaterials. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 670.

References

1. Alferov Zh. I., Kazarinov R. F. Semiconductor laser with electrical pumping // Author's certificate for the invention. No. 181737. March 30, 1963.
2. Alferov Zh. I. Physics and life. M.: St. Petersburg: Nauka Publishing House, 2001. p. 287
3. Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors*, 1998, Vol. 32, no. 1, pp. 1–14.
4. Website of the ATIC department [Online]: <https://research.nsu.ru/ru/organisations/аналитический-и-технологический-исследовательский-центр-высокие-т/persons/> (accessed on 20.05.2022).
5. Zhachuk R. A., Shklyayev A. A. Universal building block for (1 1 0)-family silicon and germanium surfaces, *Applied Surface Science*, 2019, vol. 494, pp. 46–50.
6. Shklyayev A. A., Tsarev A. V. Broadband antireflection coatings made of resonant submicron- and micron-sized SiGe particles grown on Si substrates. *IEEE Photonics Journal*, 2021, vol. 13, pp. 1–12.
7. Dabard C., Shklyayev A. A., Armbrister V. A., Aseev A. L. Effect of deposition conditions on the thermal stability of Ge layers on SiO₂ and their dewetting behavior. *Thin Solid Films*, 2020, vol. 693, no. 7, 137681.
8. Shklyayev A. A., Utkin D. E., Tsarev A. V., Kuznetsov S. A., Anikin K. V., Latyshev A. V. Interdisk spacing effect on resonant properties of Ge disk lattices on Si substrates. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, 8123.
9. Volodin V. A., Timofeyev V. A., Tuktamyshev A. R., Nikiforov A. I. Frequency splitting of optical phonons in stretched Ge layers. *JETP Letters*, 2017, vol. 105, no. 5, pp. 305–310.

10. **Volodin V. A.** Dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences “Phonon localization and phonon-plasmon interaction in semiconductor nanostructures”. June 20, 2017. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS.
11. **Mamontov G. V., Gorbunova A. S., Vyshegorodtseva E. V., Zaikovskii V. I., Vodyankina O. V.** Selective oxidation of CO in the presence of propylene over Ag/MCM-41 catalyst. *Catalysis Today*, 2019, vol. 333, pp. 245–250.
12. **Aseev A. L., Geydt P. V.** **Materials for big data processing systems.** 1st Russian Scientific Conference “Radiophysics, Photonics and the Study of the Properties of Matter” (RFIS) October 6–8, 2020, Omsk, Russia.
13. **Gutakovskiy A. K., Latyshev A. V., Chuvilin A. L.** Structure of defects and interfaces in semiconductor heterosystems. Novosibirsk: Parallel Publishing House, 2016. p. 230.
14. **Utkin D. E., Anikin K. V., Veber S. L., Shklyayev A. A.** Dependence of light reflection of germanium Mie nanoresonators on their aspect ratio. *Opt. Materials*, 2020, vol. 109, 110466.
15. **Utkin D. E., Shklyayev A. A., Tsarev A. V., Latyshev A. V.** Formation of 2D-PhCs with missing holes based on Si-layers by EBL. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 917, 062030.
16. **Yakimov A. I., Kirienko V. V., Bloshkin A. A., Dvurechenskii A. V., Utkin D. E.** Mid-infrared optical resonances in quantum dot photodetectors coupled with metallic gratings with different aperture diameters. *Current Applied Physics*, 2020, vol. 20, no. 7, pp. 877–882.
17. **Tuzikov F. V.** Dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences “Analysis of Biological Nanostructures in the Systems of Protein and Lipid Metabolism: Structure, Disperse Composition, and Mechanisms of Equilibrium Interactions of Macromolecules”. June 20, 2005. State Research Center of Virology and Biotechnology VECTOR.
18. **Chernonosova V. S., Kvon R. I., Stepanova A. O., et al.** Human serum albumin in electrospun PCL fibers: structure, release, and exposure on fiber surface. *Polymers for Advanced Technologies*, 2017, vol. 28, no. 7, pp. 819–827.
19. **Larichev Yu. V.** Investigation of the ordering of the porous structure of the mesoporous material SBA-15 by small-angle diffractometry. *Journal of Structural Chemistry*, 2021, vol. 62, no. 1, pp. 151–156.
20. **Astankova K. N., Volodin V. A., Azarov I. A.** On the structure of thin films of germanium monoxide. *Physics and Technology of Semiconductors*, 2020, vol. 54, no. 12, pp. 1296–1301.
21. **Azarov I. A., Kuper K. E., Lemzyakov A. G., Porosev V. V., Shklyayev A. A.** Scintillator surface modification by glancing angle deposition of thin ZrO₂ films. *JINST*, 2022, vol. 17, T05013.
22. **Sadykov V., Usoltsev V., Yermeev N., Mezentseva N., Pelipenko V., Krieger T., Belyaev V. et al.** Functional nanoceramics for intermediate temperature solid oxide fuel cells and oxygen separation membranes. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2013, vol. 33, Iss. 12, pp. 2241–2250.
23. **Sadykov V. A., Mezentseva N. V., Bobrova L. N., et al.** Advanced Materials for Solid Oxide Fuel Cells and Membrane Catalytic Reactors, Chapter 12 in Book “Advanced Nanomaterials for Catalysis and Energy” (V.A. Sadykov, Ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814807-5.00012-7>, Copyright 2019 Elsevier Inc., pp. 435–514.
24. **Demyanenko M. A., Esaev D. G., Ovsyuk V. N., Fomin B. I., Aseev A. L., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A.** Matrix microbolometric receivers for infrared and terahertz ranges. *Optical journal*, 2009, vol. 76, no. 12, pp. 5–11.
25. **Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Thumm M. K. A.** Peculiarities of electromagnetic waves diffraction on regular-periodic inductive metallic structures. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2013, vol. 8, no. 4. P. 11–24.
26. **Kuznetsov S. A., Astafyev M. A., Gelfand A. V., Arzhannikov A. V.** Microstructured Frequency Selective Quasi-Optical Components for Submillimeter-Wave Applications. *Proc. 44th European Microwave Conf. (EuMC 2014)*, Rome, Italy, October 6–9, 2014, article no. 6986576, pp. 881–884.

27. **Kuznetsov S. A., Lenets V. A., Tumashov M. A., et al.** Self-complementary metasurfaces for designing terahertz deflecting circular-polarization beam splitters. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, vol. 118, no. 13, 131601.
28. **Arzhannikov A. V., Ivanov I. A., Kasatov A. A., et al.** Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2020, Vol. 62, 045002.
29. **Капишников А. В., Кензхин Р. М., Koskin A. P., Volodin A. M., Geydt P. V.** Mayenite synthesis from hydroxide precursors: Structure formation and active sites on its surface. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 3, p. 778.
30. **Rybak A. A., Yushkov I. D., Nikolaev N. A., Kapishnikov A. V., Volodin A. M., Krivyakin G. K., Kamaev G. N., Geydt P. V.** Electrophysical properties of polycrystalline C12A7:e⁻ electride. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 4, p. 668.
31. **Moreno-Peñarrubia A., Kuznetsov S. A., Beruete M.** Ultrathin Subterahertz Half-Wave Plate with High Conversion Efficiency Based on Zigzag Metasurface. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2020, vol. 68, no. 11, pp. 1–5.
32. **Nikolaev I. V., Geydt P. V., Korobeishchikov N. G., Kapishnikov A. V., Volodin V. A., Azarov I. A., Strunin V. I., Gerasimov E. Y.** The Influence of Argon Cluster Ion Bombardment on the Characteristics of AlN Films on Glass-Ceramics and Si Substrates. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 4, p. 670.

Информация об авторах

Гейдт Павел Викторович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Аржанныков Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Асеев Александр Леонидович, доктор физико-математических наук, академик РАН, заведующий отделом, главный научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Шкляев Александр Андреевич, доктор физико-математических наук, Новосибирский государственный университет, главный научный сотрудник, ИФП СО РАН (Новосибирск, Россия)

Володин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Азаров Иван Алексеевич, младший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Зайковский Владимир Иванович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Уткин Дмитрий Евгеньевич, Новосибирский государственный университет, младший научный сотрудник, ИФП СО РАН (Новосибирск, Россия)

Ларичев Юрий Васильевич, кандидат химических наук, научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Чепкасов Сергей Юрьевич, младший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Кузнецов Сергей Александрович, старший научный сотрудник, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Pavel V. Geydt, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), head of the laboratory, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

- Andrey V. Arzhannikov**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, chief researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Alexander L. Aseev**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Academician of RAS, chief researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Alexander A. Shklyayev**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), chief researcher, ISP SB RAS, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Vladimir A. Volodin**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Docent, leading researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Ivan A. Azarov**, Junior Researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Vladimir I. Zaikovskii**, Candidate of Sciences (Chemistry), senior researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Dmitriy E. Utkin**, junior researcher, ISP SB RAS, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Yurii V. Larichev**, Candidate of Sciences (Chemistry), researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Sergey Y. Chepkasov**, junior researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Sergey A. Kuznetsov**, senior researcher, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022;
принята к публикации 22.07.2022*

*The article was submitted 06.06.2022; approved after reviewing 15.07.2022;
accepted for publication 22.07.2022*