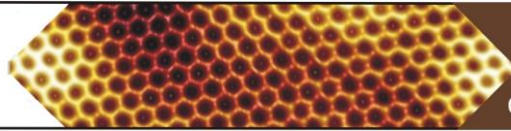




ИФТТ РАН  
ISSP RAS



Applications of scanning  
probe microscopy  
out of ambient conditions

60 лет

## IV Всероссийская конференция

«Особенности применения сканирующей зондовой  
микроскопии в вакууме и различных средах»

*Черноголовка, 30 мая – 1 июня 2023 г.*

Редакторы: к.ф.-м.н. Жуков А.А. и к.ф.-м.н. Чайка А.Н.

## 4<sup>th</sup> Conference

“Applications of scanning probe microscopy out of ambient  
conditions”

*Chernogolovka, May 30 – June 1, 2023*

## ОРГАНИЗАТОР

Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

А.А. Левченко, чл.-корр. РАН, ИФТТ РАН, Черноголовка  
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород  
С.В. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н., ИРЭ РАН, Москва  
А.А. Жуков, к.ф.-м.н., ИФТТ РАН, Черноголовка  
А.Н. Чайка, к.ф.-м.н., ИФТТ РАН, Черноголовка

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

А.А. Левченко, чл.-корр. РАН, ИФТТ РАН, Черноголовка  
А.А. Жуков, к.ф.-м.н., ИФТТ РАН, Черноголовка  
А.Н. Чайка, к.ф.-м.н., ИФТТ РАН, Черноголовка  
В.Д. Говядова, ИФТТ РАН, Черноголовка  
С.В. Чекмазов, ИФТТ РАН, Черноголовка

## Конференция проводится при поддержке



Российской академии наук,  
ras.ru



Института физики твердого тела  
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук,  
issp.ac.ru



Группы компаний НТ-МДТ Спектрум  
Инструментс, ntmdt-si.ru



Российского Научного Фонда  
Проект № 23-22-00141

ИФТТ РАН, Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна д.2  
Телефон: 8(496) 52 21982 +7 906 095 4402 Факс: +7(496) 522 8160

# Содержание

<i>В.А. Быков, Ан.В. Быков, А.А. Быков, Ю.А. Бобров, В.В. Котов, С.И. Леесмент, В.В. Поляков.</i> Сканирующая зондовая техника НТ-МДТ – приборы и возможности.....	9
<i>А.В. Анкудинов, А.А. Красилин, М.М. Халисов, Е.К. Храпова.</i> Определение с помощью АСМ модулей упругости подвешенного стержнеобразного объекта в испытании на изгиб.....	10
<i>Е.В. Скороходов, Д.А. Татарский, Р.В. Горев, В.Л. Миронов, А.А. Фраерман.</i> Магнитно-резонансная силовая спектроскопия взаимодействующих магнитных вихрей.....	11
<i>В.С. Столяров.</i> Мезоскопические квантовые явления в джозефсоновских устройствах....	12
<i>Н.И. Нургазизов, Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, А.П. Чукланов.</i> Исследование магнитных свойств планарных ферромагнитных микрочастиц методами сканирующей зондовой микроскопии.....	13
<i>А.Г. Темирязов, М.В. Степушкин, А.В. Здоровейцев, М.П. Темиряева.</i> Исследование распределения пространственной чувствительности холловского креста с помощью магнитно-силовой микроскопии.....	14
<i>А.А. Жуков.</i> Влияние заряженного зонда атомно-силового микроскопа на статистику в квазиодномерном электронном транспорте.....	15
<i>Д.А. Фокин.</i> Особенности применения классических топографических методов атомно-силового микроскопии.....	16
<i>К.Н. Ельцов.</i> Оптические измерения на атомном уровне. Современные возможности.....	17
<i>Д.В. Лебедев, Н.А. Соломонов, К.Н. Новикова, А.В. Архипов, В.А. Шаров, И.С. Мухин.</i> Наноразмерные электроуправляемые источники оптического излучения на основе эффекта излучения фотонов при неупругом туннелировании электронов.....	18
<i>Б.В. Андрюшечкин, В.М. Шевлюга, Т.В. Павлова, Н.С. Комаров, К.Н. Ельцов.</i> Структуры из атомов кислорода и хлора на поверхности Ag(111) и их роль в реакции эпексидирования этилена.....	19
<i>Т.В. Павлова, Ю.А. Воронцова, В.М. Шевлюга.</i> Изучение взаимодействия $Pb_{T_3}$ с Si(100) и Si(100)-Cl для точного легирования кремния.....	20
<i>А.Ю. Аладышкин.</i> Осцилляции наблюдаемой высоты моноатомных ступеней на поверхности тонких плёнок Pb(111), обусловленные квантово-размерными состояниями.....	21
<i>Л.В. Бондаренко, А.Ю. Тупчая, Ю.Е. Вековичинин, Д.В. Грузнев, А.Н. Михалюк, Д.В. Денисов, А.В. Матецкий, Д.А. Олянич, Т.В. Утас, В.С. Жданов, А.В. Зотов и А.А. Саранин.</i> Структурные, электронные и транспортные свойства пленок Ga атомной толщины, выращенных на поверхности Si(111).....	22
<i>А.Н. Чайка.</i> Атомная структура и регулярность ступеней на поверхностях Si(hhm).....	23
<i>Н.И. Федотов, С.В. Зайцев-Зотов.</i> Сканирующая туннельная спектроскопия краевых состояний на ступенях топологического изолятора $Bi_2Se_3$ .....	24
<i>А.Ю. Аладышкин.</i> Автоматическое распознавание образов и анализ объектов на поверхности.....	26
<i>Р.Ф. Фахруллин.</i> Характеристика топографии кутикулы нематод и волос млекопитающих с помощью атомно-силового микроскопии.....	27

<i>Д.В. Клинов, Е.В. Дубровин, Н.А. Баринов.</i> Сканирующая зондовая микроскопия одиночных молекул биополимеров.....	<b>28</b>
<i>С.Ю. Лукашенко, О.М. Горбенко, М.В. Жуков, С.В. Пичахчи, И.Д. Сапожников, М.Л. Фельштын, А.О. Голубок.</i> О косвенном измерении апертуры зонда-нанопипетки сканирующего микроскопа ионной проводимости.....	<b>30</b>
<i>Ю.М. Ефремов, А.А. Фролова, А.А. Акованцева, А.В. Мурашко, С.Л. Котова, В.С. Преснякова, П.И. Котенева, Н.В. Кошелева, П.С. Тимашев.</i> Атомно-силовая микроскопия клеточных объектов для тканевой инженерии.....	<b>31</b>
<i>А.А. Фролова, В.С. Куканова, С.Л. Котова, С.В. Костюк, Ю.А. Рочев, Ю.М. Ефремов, А.А. Акованцева, П.С. Тимашев.</i> Особенности фазового поведения термочувствительных полимеров для биомедицинских применений, выявленные методом атомно-силовой микроскопии.....	<b>32</b>
<i>А.А. Акованцева, А.К. Абукеримова, С.Э. Аветисов, В.С. Куканова, А.А. Фролова, Ю.М. Ефремов, С.Л. Котова, П.С. Тимашев.</i> Установление влияния патологий роговицы человеческого глаза на биомеханические и топографические свойства отдельных ее слоев методом атомно-силовой микроскопии.....	<b>34</b>
<i>А.К. Лашкова, Р.В. Гайнутдинов.</i> Применение атомно-силовой микроскопии для исследования кристаллов триглицинсульфата с послойно-периодической модулированной структурой.....	<b>35</b>

## Расписание докладов

Вторник, 30 мая 2023 г.

10.00-10.10	Открытие конференции
10.10-10.50	<u>В.А. Быков</u> , <u>Ан.В. Быков</u> , <u>А.А. Быков</u> , <u>Ю.А. Бобров</u> , <u>В.В. Котов</u> , <u>С.И. Леесмент</u> , <u>В.В. Поляков</u> “Сканирующая зондовая техника НТ-МДТ – приборы и возможности”
10.50-11.30	<u>А.В. Анкудинов</u> , <u>А.А. Красилин</u> , <u>М.М. Халисов</u> , <u>Е.К. Храпова</u> “Определение с помощью АСМ модулей упругости подвешенного стержнеобразного объекта в испытании на изгиб”
11.30-11.50	Coffee break
11.50-12.30	<u>Е.В. Скороходов</u> , <u>Д.А. Татарский</u> , <u>Р.В. Горев</u> , <u>В.Л. Миронов</u> , <u>А.А. Фраерман</u> “Магнитно-резонансная силовая спектроскопия взаимодействующих магнитных вихрей”
12.30-13.10	<u>В.С. Столяров</u> “Мезоскопические квантовые явления в джозефсоновских устройствах”
13.10-14.30	Lunch
14.30-15.10	<u>Н.И. Нургазизов</u> , <u>Д.А. Бизяев</u> , <u>А.А. Бухараев</u> , <u>А.П. Чукланов</u> “Исследование магнитных свойств планарных ферромагнитных микрочастиц методами сканирующей зондовой микроскопии”
15.10-15.50	<u>А.Г. Темирязов</u> , <u>М.В. Степушкин</u> , <u>А.В. Здоровейщев</u> , <u>М.П. Темиряева</u> “Исследование распределения пространственной чувствительности холловского креста с помощью магнитно-силовой микроскопии”
15.50-16.10	Coffee break
16.10-16.50	<u>А.А. Жуков</u> “Влияние заряженного зонда атомно-силового микроскопа на статистику в квазиодномерном электронном транспорте”
16.50-17.30	<u>Д.А. Фокин</u> “Особенности применения классических топографических методов атомно-силовой микроскопии”

## Среда, 31 мая 2023 г.

<b>10.00-10.40</b>	<u>К.Н. Ельцов</u> <b>“Оптические измерения на атомном уровне. Современные возможности”</b>
<b>10.40-11.20</b>	<u>Д.В. Лебедев, Н.А. Соломонов, К.Н. Новикова, А.В. Архипов, В.А. Шаров, И.С. Мухин</u> <b>“Наноразмерные электроуправляемые источники оптического излучения на основе эффекта излучения фотонов при неупругом туннелировании электронов”</b>
<b>11.20-11.40</b>	<b>Coffee break</b>
<b>11.40-12.20</b>	<u>Б.В. Андрияшечкин, В.М. Шевлюга, Т.В. Павлова, Н.С. Комаров, К.Н. Ельцов</u> <b>“Структуры из атомов кислорода и хлора на поверхности Ag(111) и их роль в реакции эпоксидирования этилена”</b>
<b>12.20-13.00</b>	<u>Т.В. Павлова, Ю.А. Воронцова, В.М. Шевлюга</u> <b>“Изучение взаимодействия PBr<sub>3</sub> с Si(100) и Si(100)-Cl для точного легирования кремния”</b>
<b>13.00-14.30</b>	<b>Lunch</b>
<b>14.30-15.10</b>	<u>А.Ю. Аладышкин</u> <b>“Осцилляции наблюдаемой высоты моноатомных ступеней на поверхности тонких плёнок Pb(111), обусловленные квантово-размерными состояниями”</b>
<b>15.10-15.50</b>	<u>Л.В. Бондаренко, А.Ю. Тупчая, Ю.Е. Вековшинин, Д.В. Грузнев, А.Н. Михалюк, Д.В. Денисов, А.В. Матецкий, Д.А. Олянич, Т.В. Утас, В.С. Жданов, А.В. Зотов и А.А. Саранин</u> <b>“Структурные, электронные и транспортные свойства пленок Ga атомной толщины, выращенных на поверхности Si(111)”</b>
<b>15.50-16.10</b>	<b>Coffee break</b>
<b>16.10-16.50</b>	<u>А.Н. Чайка</u> <b>“Атомная структура и регулярность ступеней на поверхностях Si(hhm)”</b>
<b>16.50-17.30</b>	<u>Н.И. Федотов, С.В. Зайцев-Зотов</u> <b>“Сканирующая туннельная спектроскопия краевых состояний на ступенях топологического изолятора Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>”</b>
<b>17.30-18.10</b>	<u>А.Ю. Аладышкин</u> <b>«Автоматическое распознавание образов и анализ объектов на поверхности»</b>

## Четверг, 1 июня 2023 г.

10.00-10.40	<u>Р.Ф. Фахруллин</u> <b>“Характеристика топографии кутикулы нематод и волос млекопитающих с помощью атомно-силовой микроскопии”</b>
10.40-11.20	<u>Д.В. Клинов, Е.В. Дубровин, Н.А. Баринов</u> <b>“Сканирующая зондовая микроскопия одиночных молекул биополимеров”</b>
11.20-11.40	<b>Coffee break</b>
11.40-12.20	<u>С.Ю. Лукашенко, О.М. Горбенко, М.В. Жуков, С.В. Пичахчи, И.Д. Сапожников, М.Л. Фельштын, А.О. Голубок</u> <b>“О косвенном измерении апертуры зонда-нанопипетки сканирующего микроскопа ионной проводимости”</b>
12.20-13.00	<u>Ю.М. Ефремов, А.А. Фролова, А.А. Акованцева, А.В. Мурашко, С.Л. Котова, В.С. Преснякова, П.И. Котенева, Н.В. Кошелева, П.С. Тимашев</u> <b>“Атомно-силовая микроскопия клеточных объектов для тканевой инженерии”</b>
13.00-14.30	<b>Lunch</b>
14.30-15.10	<u>А.А. Фролова, В.С. Куканова, С.Л. Котова, С.В. Костюк, Ю.А. Рочев, Ю.М. Ефремов, А.А. Акованцева, П.С. Тимашев</u> <b>“Особенности фазового поведения термочувствительных полимеров для биомедицинских применений, выявленные методом атомно-силовой микроскопии”</b>
15.10-15.50	<u>А.А. Акованцева, А.К. Абукеримова, С.Э. Аветисов, В.С. Куканова, А.А. Фролова, Ю.М. Ефремов, С.Л. Котова, П.С. Тимашев</u> <b>“Установление влияния патологий роговицы человеческого глаза на биомеханические и топографические свойства отдельных ее слоев методом атомно-силовой микроскопии”</b>
15.50-16.30	<u>А.К. Лашкова, Р.В. Гайнутдинов</u> <b>“Применение атомно-силовой микроскопии для исследования кристаллов триглицинсульфата с послойно-периодической модулированной структурой”</b>
16.30-17.00	<b>Закрытие конференции и подведение итогов</b>

## СПИСОК ДОКЛАДЧИКОВ

Акованцева Анастасия Александровна	akovantseva-a@yandex.ru
Аладышкин Алексей Юрьевич	aladyshkin@ipmras.ru
Андрюшечкин Борис Владимирович	andrush@kapella.gpi.ru
Анкудинов Александр Витальевич	alex_ank@mail.ru
Быков Виктор Александрович	vbykov@ntmdt-si.com
Ельцов Константин Николаевич	eltsov@kapella.gpi.ru
Ефремов Юрий Михайлович	efremov_yu_m@staff.sechenov.ru
Жуков Алексей Алексеевич	azhukov@issp.ac.ru
Зайцев-Зотов Сергей Владимирович	serzz@cplire.ru
Клинов Дмитрий Владимирович	klinov.dmitry@mail.ru
Лашкова Анастасия Константиновна	aklashkova@crys.ras.ru
Лебедев Денис Владимирович	denis.v.lebedev@gmail.com
Лукашенко Станислав Юрьевич	stas.lukashenko@mail.ru
Миронов Виктор Леонидович	mironov@ipmras.ru
Нургазизов Нияз Ильгизович	niazn@mail.ru
Олянич Дмитрий Александрович	olyanich@iacp.dvo.ru
Павлова Татьяна Витальевна	pavlova@kapella.gpi.ru
Скороходов Евгений Владимирович	evgeny@ipmras.ru
Столяров Василий Сергеевич	stolyarov.vs@phystech.edu
Темирязов Алексей Григорьевич	temiryazev@gmail.com
Федотов Николай Игоревич	nfedotov89@mail.ru
Фахруллин Равиль Фаридович	kazanbio@gmail.com
Фокин Денис Александрович	fokin@lacopa.group
Фролова Анастасия Александровна	frolova_a_a_2@staff.sechenov.ru
Чайка Александр Николаевич	chaika@issp.ac.ru



## Сканирующая зондовая техника НТ-МДТ – приборы и возможности

В.А. Быков, Ан.В. Быков, А.А. Быков, Ю.А. Бобров, В.В. Котов, С.И. Леесмент,  
В.В. Поляков

*ООО «НТ-МДТ», г. Москва*

Сканирующая зондовая микроскопия возникла в начале 80-х годов 20-го века. Существенное развитие рынка СЗМ началось после изобретения сканирования вибрирующим на резонансной частоте кантилевером – «теппинг» мода. В последние годы были разработаны системы адаптивной логики, позволяющие создавать приборы с элементами искусственного интеллекта, что существенно снижает требования к уровню профессионализма пользователя приборов. Уже в настоящее время в функциях приборов введена возможность быстрого автоматического подбора параметров сканирования в «Теппинг» моде, что делает атомно-силовые микроскопы нашей компании доступными для технологов, материаловедов и, даже, школьников, дает возможность получать высококачественное изображение топографии поверхности.

Современные модели наших АСМ NT-MDT позволяют полностью автоматически настраивать параметры сканирования в полуконтактном режиме АСМ (модуль ScanTronic): амплитуду колебаний кантилевера, значение рабочей амплитуды колебаний, коэффициент усиления обратной связи, скорость сканирования.

Для исследования фрагментов интегральных схем создана мощная система – сканирующий зондовый микроскоп ВЕГА, позволяющий работать с объектами площадью  $200 \times 200 \text{ мм}^2$  и при этом получать атомарное разрешение, эффективно и многократно производить исследования фрагментов интегральной схемы в различных участках пластины.

Можно уверенно констатировать, что к настоящему времени в России выполнены разработки и организовано производство практически полного, за исключением сверхвысоковакуумных СЗМ, комплекса приборов и методов для исследования микро- и наноструктур с использованием сканирующих зондовых микроскопов. Для лабораторий – созданы приборы линии ИНТЕГРА, для системы образования в школах и колледжах – бюджетные, но достаточно мощные НАНОЭДЬЮКАТОРЫ и СОЛВЕР- НАНО, а для исследовательских работ – приборы кратко описанные в настоящей статье. Следует отметить, что развитие нанoeлектроники, создание новой элементной базы дают возможность дальнейшего совершенствования приборов, все более и более внедрять системы искусственного интеллекта в программное обеспечение с раскрытием возможностей развивающейся элементной базы контроллеров срок морального старения которых сегодня составляет около 5 лет.

## **Определение с помощью АСМ модулей упругости подвешенного стержнеобразного объекта в испытании на изгиб**

А.В. Анкудинов<sup>1</sup>, А.А. Красилин<sup>1</sup>, М.М. Халисов<sup>1,2</sup>, Е.К. Храпова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт Петербург, ул. Политехническая, 26*

<sup>2</sup>*ИФ им. И.П. Павлова, 199034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6*

Деформации несущей балки можно рассчитать по теории упругости. Интересна обратная задача – по регистрируемому отклику балки на приложенную нагрузку, определить упругие модули материала. В приближении слабых изгибов стержней Эйлера-Бернулли модуль Юнга балки с замурованными концами определяется её жесткостью всего в одной выбранной точке. Приближению Тимошенко, учитывающему как деформацию изгиба, так и сдвига, для вычисления модулей Юнга и сдвига, нужны значения жесткости, минимум, в двух точках балки. В общем случае выявить модули упругости можно только тогда, когда есть теоретический профиль податливости балки, моделирующий непрерывный ряд возможных в эксперименте вариантов закрепления концов. Сказанное важно для испытаний подвешенного стержнеобразного (квазиодномерного) нанообъекта с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Точность измерений упругих модулей материала в таких испытаниях зависит от возможности аналитически описать изгиб линейной балки постоянного сечения с неизвестными условиями закрепления концов и от аккуратности определения жесткости контакта АСМ-зонда с образцом. Доклад суммирует результаты работы авторов над этими вопросами. Достигнута точность на уровне 20%. Объектами испытаний выбраны гидросиликатные наносвитки различного состава, изготовленные методом гидротермального синтеза.

## **AFM determination of the elastic moduli of a suspended rod-shaped object in a bending test**

A.V. Ankudinov<sup>1</sup>, A.A. Krasilin<sup>1</sup>, M.M. Khalisov<sup>1,2</sup>, E.K. Khrapova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Ioffe Institute, 194021 Saint-Petersburg, Politekhnicheskaya, 26*

<sup>2</sup>*Pavlov Institute of Physiology, 199034, Saint-Petersburg, Makarova emb, 6*

The deformations of the supporting beam can be calculated according to the theory of elasticity. An interesting inverse problem is to determine the elastic moduli of the material from the recorded response of the beam to the applied load. In the Euler-Bernoulli approximation of weak bending of the rods, the Young's modulus of a beam with fixed ends is determined by its rigidity at just one selected point. The Timoshenko approximation, which takes into account both bending and shear deformation, requires stiffness values at least at two points of the beam to calculate Young's moduli and shear. In the general case, it is possible to reveal the elastic moduli only when there is a theoretical beam compliance profile that models a continuous series of possible options for fixing the ends in the experiment. The foregoing is important for testing a suspended rod-like (quasi-one-dimensional) nanoobject using an atomic force microscope (AFM). The accuracy of AFM measurements of the elastic moduli of the material in such tests depends on the ability to analytically describe the bending of a linear beam of constant cross section with unknown conditions for fixing the ends and on the accuracy of determining the probe-sample stiffness. The report summarizes the results of the authors' work on these issues. An accuracy of 20% has been achieved. The test objects were hydrosilicate nanoscrolls of various compositions, produced by hydrothermal synthesis.

## **Магнитно-резонансная силовая спектроскопия взаимодействующих магнитных вихрей**

Е.В. Скороходов<sup>1</sup>, Д.А. Татарский<sup>1,2</sup>, Р.В. Горев<sup>1</sup>, В.Л. Миронов<sup>1</sup>, А.А. Фраерман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ИФМ РАН, 603950, д. Афонино, Нижегородская обл., ул. Академическая, д.7*

<sup>2</sup>*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603022, г. Н. Новгород, пр. Гагарина, 23*

Низкочастотные возбуждения в магнитных вихрях имеют большие перспективы для использования в вихревых спин-трансферных наноосцилляторах (СТНО). Однако для получения достаточной мощности СВЧ-излучения необходимо, чтобы СТНО были синхронизированы между собой. Синхронизация достигается за счет взаимодействия между СТНО, которое может иметь различную природу. Одним из самых сильных взаимодействий в магнетизме является обменное. Обменное взаимодействие между магнитными вихрями может быть организовано за счет перекрытия ферромагнитных дисков. В связи с этим, актуальной является задача по диагностике магнитных состояний и изучение влияния обменной связи на резонансные свойства в таких системах. В рамках представляемой работы системы перекрывающихся ферромагнитных дисков были изготовлены методом электронной литографии. Для изучения магнитных состояний использовались методы лоренцевой просвечивающей электронной микроскопии (ЛПЭМ) и магнитно-силовой микроскопии (МСМ). Исследование влияния обменного взаимодействия на частотные характеристики ферромагнитного резонанса проводилось с помощью метода магнитно-резонансной силовой микроскопии (МРСМ). Используя модель линейных взаимодействующих осцилляторов, результаты численного моделирования и данные МРСМ, проведена оценка энергии взаимодействия между магнитными вихрями. Работа выполняется при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00271).

## **MRFM studies of ferromagnetic resonance in exchange-coupled magnetic vortices**

E.V. Skorokhodov<sup>1</sup>, D.A. Tatarskiy<sup>1,2</sup>, R.V. Gorev<sup>1</sup>, V.L. Mironov<sup>1</sup>, A.A. Fraerman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*IPM RAS, 603950, Nizhny Novgorod, Afonino, Akademicheskaya st., 7*

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Gagarina ave., 23*

Low-frequency excitations in magnetic vortices have great prospects for use in vortex spin-transfer nano-oscillators (STNO). However, in order to obtain sufficient microwave radiation power, it is necessary that the STNOs are synchronized with each other. Synchronization is achieved due to the interaction between the STNO, which may have a different origin. One of the strongest interactions in magnetism is the exchange. The exchange interaction between magnetic vortices can be organized by overlapping ferromagnetic disks. In this regard, the task of diagnosing magnetic states and studying the effect of exchange coupling on resonant properties in such systems is interesting. In this work, systems of overlapping ferromagnetic disks were manufactured by electronic lithography. The methods of Lorentz transmission electron microscopy (LTEM) and magnetic force microscopy (MFM) were used to study magnetic states. The study of the effect of exchange interaction on the frequency characteristics of ferromagnetic resonance was carried out using the magnetic resonance force microscopy (MRFM) method. Using the model of linear interacting oscillators, the results of numerical simulation and the MRFM data, the energy of interaction between magnetic vortices was estimated. The work is supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-12-00271).

## **Мезоскопические квантовые явления в джозефсоновских устройствах**

В.С. Столяров<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный университет науки и технологий МИСиС, 119049, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*ВНИИА им Н.Л. Духова, 127055, Москва, Россия*

С использованием магнитно-силовой микроскопии продемонстрировано, что джозефсоновские устройства, реализованные за счет сверхпроводящего эффекта близости, могут быть использованы не только в динамическом режиме, например, в устройствах быстрой одноквантовой логики, но и в стационарном режиме, когда глобального резистивного отклика на устройстве не возникает. Такие устройства, оперирующие отдельными мезоскопическими вихревыми состояниями сверхпроводящего тока, могут быть использованы в качестве логических элементов, элементов памяти, а также в качестве чувствительных датчиков магнитного поля для сканирующей магнитной микроскопии.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 23-72-30004).

## **Mesoscopic quantum phenomena in Josephson devices**

V.S. Stolyarov<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141700 Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA) 127055, Moscow, Russia*

Using magnetic force microscopy, it has been demonstrated that Josephson devices implemented due to the superconducting proximity effect can be used not only in the dynamic mode, for example, in fast single-quantum logic devices, but also in the stationary mode, when there is no global resistive response on the device. Such devices operating with individual mesoscopic vortex states of superconducting current can be used as logic elements, memory elements, and also as sensitive magnetic field sensors for scanning magnetic microscopy.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 23-72-30004).

## **Исследование магнитных свойств планарных ферромагнитных микрочастиц методами сканирующей зондовой микроскопии**

Н.И. Нургазизов, Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев, А.П. Чукланов

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д.10/7*

Приведены результаты исследования магнитных свойств планарных микрочастиц изготовленных из Py (Fe 22%, Ni 78%), CoNi (Co 18%, Ni 82%), Ni. Исследуемые микрочастицы имели треугольную и квадратную форму. При этом часть микрочастиц была сформирована таким образом, что имела стороны, вогнутые к своему центру (дополнительную анизотропию формы). Методами магнитно-силовой микроскопии были проведены исследования доменной структуры микрочастиц и процессов переключения их намагниченности под действием внешнего магнитного поля. Было исследовано влияние на эти свойства анизотропии формы и магнитоупругого эффекта, наводимого за счет деформации подложки. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-29-00352).

## **Investigation of magnetic properties of planar ferromagnetic microparticles by scanning probe microscopy**

N.I. Nurgazizov, D.A. Bizyaev, A.A. Bukharaev, A.P. Chuklanov

*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, 420029, Kazan, Sibirsky tract, 10/7*

The results of studying the magnetic properties of planar microparticles prepared from Py (Fe 22%, Ni 78%), CoNi (Co 18%, Ni 82%), and Ni are presented. The microparticles under study had a triangular and square shapes. In addition, some of the microparticles were formed with sides concaved towards the centre (additional anisotropy of the shape). The magnetic force microscopy was used to study the domain structure of microparticles and the processes of magnetization switching under external magnetic field. Effects of the shape anisotropy and of the magnetoelastic effect induced by substrate deformation was studied. This work was supported by RSF (project № 22-29-00352).

## **Исследование распределения пространственной чувствительности холловского креста с помощью магнитно-силовой микроскопии**

А.Г. Темирязов<sup>1</sup>, М.В. Степушкин<sup>1</sup>, А.В. Здорovejцев<sup>2</sup>, М.П. Темирязева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино, пл. Введенского, д. 1*

<sup>2</sup>*НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, к.3*

В настоящее время измерения аномального эффекта Холла (АЭХ) широко используются при исследовании процессов перемагничивания тонких магнитных пленок. Альтернативным методом может служить магнитно-силовая микроскопия (МСМ). МСМ позволяет не только визуализировать доменную структуру, но также изменить ее под действием магнитного поля зонда. В данной работе мы объединили эти подходы, чтобы построить карту распределения пространственной чувствительности холловского креста. Магнитным зондом формировались домены, расположенные в различных областях структуры, содержащий холловский крест. Регистрировалось изменение сигнала АЭХ при появлении каждого нового домена. Далее зондом с очень низким магнитным моментом (не внося искажений доменной структуры) снималось МСМ изображение, позволяющее проанализировать площадь, форму и положение каждого домена и сопоставить эти данные с изменением сигнала АЭХ. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного расчета.

## **Study of the spatial sensitivity distribution of the Hall cross using magnetic force microscopy**

A.G. Temiryazev<sup>1</sup>, M.V. Stepushkin<sup>1</sup>, A.V. Zdoroveishchev<sup>2</sup>, M.P. Temiryazeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kotelnikov FIRE RAS, Russia, 141190, Fryazino, Vvedenskii sq. 1*

<sup>2</sup>*SRIPT, NNSU, 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Gagarina 23/3*

At present, measurements of the anomalous Hall effect (AHE) are widely used in the study of magnetization reversal processes in thin magnetic films. Magnetic force microscopy (MFM) can serve as an alternative method. MFM allows not only to visualize the domain structure, but also to change it under the action of the magnetic field of the probe. In this study, we combine these approaches to map the spatial sensitivity distribution of the Hall cross. The magnetic probe formed domains located in different regions of the structure containing the Hall cross. A change in the AHE signal was recorded with the appearance of each new domain. Next, an MFM image was taken with a probe with a very low magnetic moment (without introducing distortions of the domain structure), which made it possible to analyze the area, shape, and position of each domain and compare these data with the change in the AHE signal. The obtained experimental data are compared with the results of numerical calculations.

## **Влияние заряженного зонда атомно-силового микроскопа на статистику в квазиодномерном электронном транспорте**

А.А. Жуков

*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2*

Исследованы особенности поведения магнитотранспорта в допированных нанопроволоках InAs в присутствии проводящего острия АСМ. Показана возможность изменения фрактальной размерности зависимости магнитопроводимости в исследуемом образце в присутствии зонда АСМ. Рассмотрены причины такого поведения магнитопроводимости в квазиодномерных диффузных системах, а также возможности наблюдения аналогичного эффекта в двумерных баллистических бильярдах. Работа выполнена при поддержке РФФ проект 23-22-00141.

<https://rscf.ru/project/23-22-00141/>

## **Impact of the charged AFM tip on statistics of electron transport**

A.A. Zhukov

*ISSP RAS, 142432, Chernogolovka, Moscow region, Acad. Ossypian str, 2*

The peculiarities of magnetotransport in doped InAs nanowires in presence of charged atomic-force microscope (AFM) tip (scanning gate microscopy) are investigated. The possibility of variation of fractal dimension of magnetoconductivity curve in presence of AFM tip is shown. The model to ascribe such kind of behavior is presented. Additionally, the possibility variation of fractal dimension of magnetoconductance curve in two-dimensional ballistic billiards is discussed. This work is supported by Russian Science Foundation (project # 23-22-00141).

<https://rscf.ru/project/23-22-00141/>

## **Особенности применения классических топографических методов атомно-силовой микроскопии**

Д.А.Фокин

*МГТУ имени Н.Э.Баумана, 105005, Москва*

В научных работах в последнее время тема применения атомно-силовой микроскопии освещается все более широко. Это связано с тем, что методы сканирующей зондовой микроскопии активно развиваются и, как следствие, все чаще могут быть применены на практике. Одним из следствий такого бурного развития стало то, что все больше исследователей используют те возможности АСМ, что появились в последнее время. Это вполне объяснимо, поскольку самые новые методы обладают самым широким спектром возможностей. В то же время, при работе с АСМ возникает множество вопросов, ключ к ответу на которые лежит в понимании первопринципов АСМ. Доклад представляет собой обзор основных принципов АСМ, а также способов их реализации на практике.

## **Application features of classical topographic methods in atomic-force microscopy**

D.A.Fokin

*Bauman State Technical University, 105005, Moscow*

Atomic-force microscopy is highlighted very widely in scientific reports. This is because of active improvement of scanning probe microscopy which results in its growing applicability in practice. One of the results of such rapid development is that more and more researchers use only recently developed possibilities of AFM. This could be easily explained since these new modes provide more possibilities. At the same time, there are many questions when using AFM that one need to understand from AFM first principles. In this report such AFM principles as well as their practical implementations will be discussed.



## **Оптические измерения на атомном уровне. Современные возможности**

К.Н. Ельцов

*ИОФ РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, д.38*

Известное достаточно давно усиление электромагнитного поля шероховатостями поверхности таких металлов как медь, серебро и золото, проявляющееся, в частности, в усилении комбинационного рассеяния света (Surface Enhanced Raman Scattering - SERS), при использовании иглы туннельного микроскопа из указанных металлов может давать усиление до 12-13 порядков (Tip Enhanced Raman Scattering - TERS), что, в свою очередь, позволяет изучать колебательные спектры единичной молекулы. Более того, если использовать современные импульсные лазеры, то появляется возможность проводить исследования в отдельных объектах (молекулах, кластерах) с высоким временным разрешением, т.е. наблюдать быстро протекающие процессы (fs) на атомном уровне. В докладе будет дан анализ наиболее интересных работ в данной области и высказаны соображения по реализации подобных исследований на сканирующем туннельном микроскопе GPI 300.

## **Optical measurements on atomic scale. Current state**

K.N. Eltsov

*GPI RAS, 119991, Moscow, ulitsa Vavilova, 38*

The well-known enhancement of the electromagnetic field by the surface roughness of such metals as copper, silver and gold, which manifests itself, in particular, in the enhancement of Raman scattering (Surface Enhanced Raman Scattering - SERS), when using a tunneling microscope tip made of these metals, can give an signal amplification of up to 12- 13 orders (Tip Enhanced Raman Scattering - TERS), which, in turn, makes it possible to study the vibrational spectra of a single molecule. Moreover, if modern pulsed lasers are used, then it becomes possible to conduct studies in individual objects (molecules, clusters) with a high temporal resolution, i.e. observe fast processes (fs) at the atomic level. The report will analyze the most interesting works in this area of research and make suggestions for the implementation of such studies on the GPI 300 scanning tunneling microscope.

## **Наноразмерные электроуправляемые источники оптического излучения на основе эффекта излучения фотонов при неупругом туннелировании электронов**

Д.В. Лебедев<sup>1,2,3</sup>, Н.А. Соломонов<sup>1</sup>, К.Н. Новикова<sup>1</sup>, А.В. Архипов<sup>4</sup>, В.А. Шаров<sup>1</sup>,  
И.С. Мухин<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>*Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, 194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8*

<sup>2</sup>*Институт аналитического приборостроения РАН, 190103, Россия, Санкт-Петербург, Рижский пр., д. 26*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7/9*

<sup>4</sup>*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29*

На сегодняшний день технологии производства микропроцессорной техники практически достигли своего теоретического предела (размер элемента 3 нм). Одним из самых перспективных путей для дальнейшего развития вычислительной техники является создание нового класса оптоэлектронных микрочипов. В основе таких устройств лежит комбинация фотонных и электронных компонентов. Для реализации такого подхода необходимо решить задачу создания наномасштабных электроуправляемых источников оптического излучения. В качестве таких устройств могут выступать источники излучения, основанные на эффекте генерации фотонов в туннельном зазоре. В данной работе с помощью СТМ исследуются различные виды наномантенн, способные увеличивать квантовую эффективность генерации фотонов при неупругом туннелировании электронов.

## **Nanosized electrically controlled optical radiation sources based on photon generation during inelastic electron tunneling**

D.V. Lebedev<sup>1,2,3</sup>, N.A. Solomonov<sup>1</sup>, K.N. Novikova<sup>1</sup>, A.V. Arkhipov<sup>4</sup>, V.A. Sharov<sup>1</sup>,  
I.S. Mukhin<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>*Academic University named after Zh.I. Alferova, 194021, Russia, St. Petersburg, st. Khlopina, 8*

<sup>2</sup>*Institute of Analytical Instrumentation, Russian Academy of Sciences, 26, Rzhskiy pr., St. Petersburg, 190103, Russia*

<sup>3</sup>*Saint Petersburg State University, Universitetskaya embankment, 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia*

<sup>4</sup>*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 Russia, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29*

To date, the technologies for the production of microprocessor technology have practically reached their theoretical limit (element size 3 nm). One of the most promising ways for the further development of computer technology is the creation of a new class of optoelectronic microchips. Such devices are based on a combination of photonic and electronic components. To implement this approach, it is necessary to solve the problem of creating nanoscale electrically controlled sources of optical radiation. Radiation sources based on the effect of photon generation in the tunnel gap can serve as such devices. In this work, STM is used to study various types of nanoantennas that can increase the quantum efficiency of photon generation during inelastic electron tunneling. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10346.

## **Структуры из атомов кислорода и хлора на поверхности Ag(111) и их роль в реакции эпексидирования этилена**

Б.В. Андрияшечкин, В.М. Шевлюга, Т.В. Павлова, Н.С. Комаров, К.Н. Ельцов

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

Представлены результаты исследования взаимодействия кислорода и хлора с поверхностью Ag(111). На основании данных СТМ (сканирующей туннельной микроскопии) и моделирования методом ТФП (теории функционала плотности) предложена новая модель для структуры Ag(111)-*p*(4×4)-O. Для случая коадсорбции хлора и кислорода достоверно установлено формирование смешанных структур, содержащих связи Cl-O. На основании данных СТМ показано, что адсорбция кислорода и хлора приводит к однотипной реконструкции поверхности Ag(111), при которой формируются адсорбционные места между четырьмя атомами серебра. При совместной адсорбции, хлор вытесняет кислород из данных позиций, при этом кислород соединяется с хлором, переходя от нуклеофильного к электрофильному состоянию. Полученные результаты имеют большое значение для объяснения механизма реакции эпексидирования этилена.

## **Oxygen and chlorine phases on the Ag(111) surface and their role in the ethylene epoxidation reaction**

B.V. Andryushechkin, V.M. Shevlyuga, T.V. Pavlova, N.S. Komarov, K.N. Eltsov

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Vavilova str., 38*

The results of a study of the interaction of oxygen and chlorine with the Ag(111) surface are presented. Based on STM (scanning tunneling microscopy) data and DFT (density functional theory) modeling, a new model for the Ag(111)-*p*(4×4)-O structure is proposed. For the case of coadsorption of chlorine and oxygen, the formation of mixed structures containing Cl-O bonds was reliably established. Based on the STM data, it was shown that the adsorption of oxygen and chlorine leads to the same type of reconstruction of the Ag(111) surface, in which fourfold hollow adsorption sites are formed. During coadsorption, chlorine displaces oxygen from these positions, while oxygen combines with chlorine, passing from a nucleophilic to an electrophilic state. The results obtained are of great importance for explaining the mechanism of the ethylene epoxidation reaction.

## **Изучение взаимодействия $\text{PBr}_3$ с $\text{Si}(100)$ и $\text{Si}(100)\text{-Cl}$ для точного легирования кремния**

Т.В. Павлова<sup>1,2</sup>, Ю.А. Воронцова<sup>1,2</sup>, В.М. Шевлюга<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, Москва, Покровский бульвар, 11*

Для внедрения примесей в кремний с атомной точностью в настоящее время используется СТМ-литография по поверхности  $\text{Si}(100)\text{-}2\times 1\text{-H}$  с последующей адсорбцией  $\text{PH}_3$  на оборванные связи кремния. В качестве резиста мы выбрали хлорированную поверхность кремния, а в качестве содержащей легирующую примесь молекулы –  $\text{PBr}_3$ . На первом этапе мы рассматриваем взаимодействие  $\text{PBr}_3$  с чистой поверхностью кремния с использованием СТМ и расчетов на основе DFT. На втором этапе мы переходим к взаимодействию  $\text{PBr}_3$  с оборванными связями кремния в вакансиях Cl на хлорированной поверхности  $\text{Si}(100)$ . Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 21-12-00299).

## **Study of the $\text{PBr}_3$ interaction with $\text{Si}(100)$ and $\text{Si}(100)\text{-Cl}$ for precise doping of silicon**

T.V. Pavlova<sup>1,2</sup>, Yu.A. Vorontsova<sup>1,2</sup>, V.M. Shevlyuga<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Vavilova str., 38*

<sup>2</sup>*HSE University, 109028, Moscow, Pokrovsky boulevard, 11*

To introduce impurities into silicon with atomic precision, STM lithography is used on the  $\text{Si}(100)\text{-}2\times 1\text{-H}$  surface followed by  $\text{PH}_3$  adsorption on silicon dangling bonds. We chose a chlorinated silicon surface as a resist, and  $\text{PBr}_3$  as a molecule containing a dopant. At the first stage, we study the interaction of  $\text{PBr}_3$  with a clean  $\text{Si}(100)$  surface using STM experiments and DFT calculations. At the second stage, we consider the  $\text{PBr}_3$  interaction with silicon dangling bonds in Cl vacancies on the chlorinated  $\text{Si}(100)$  surface. This work was supported by the Russian Science Foundation (grant 21-12-00299).

## **Осцилляции наблюдаемой высоты моноатомных ступеней на поверхности тонких плёнок Pb(111), обусловленные квантово-размерными состояниями**

А.Ю. Аладышкин<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 603950*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603022*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, д. 20, Москва, 101000*

<sup>4</sup>*Центр перспективных методов мезофизики и нанотехнологий, Московский физико-технический институт, Институтский пер., д. 9, Долгопрудный Московской обл., 141700*

Методом низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии экспериментально исследованы электронные свойства тонких плёнок Pb(111) на поверхности Si(111)7×7. Показано, что видимая высота  $h$  моноатомных ступеней на поверхности плёнок Pb(111) осцилляторным образом зависит от напряжения  $U$  между образцом и иглой туннельного микроскопа. Показано, что период осцилляций на зависимости  $h$  от  $U$  совпадает с периодом осцилляций локальной дифференциальной проводимости ( $dI/dU$ ) и скорости изменения высоты иглы над поверхностью образца ( $dZ/dU$ ) как функции  $U$ . Это позволяет сделать вывод, что наблюдаемые осцилляции видимой высоты моноатомной ступени обусловлены особенностями резонансного туннелирования электронов из иглы в образце через уровни размерного квантования. Показано, что максимальному и минимальному значению наблюдаемой высоты соответствует напряжение, при котором локальные плотности состояний террас Pb(111) разной высоты одинаковы. Работа выполнена при поддержке государственного задания ИФМ РАН в 2023 году.

## **Oscillatory bias dependence of the visible height of the monatomic Pb(111) steps: consequence of quantum-size effect in thin metallic films**

A.Yu. Aladyshkin<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603022, Russia*

<sup>3</sup>*National Research University Higher School of Economics, Moscow 101000, Russia*

<sup>4</sup>*Center for Advanced Mesoscience and Nanotechnology. Moscow Institute for Physics and Technology, Dolgoprudny 141700, Russia*

Local electronic properties of thin Pb(111) films on Si(111)7×7 surface were experimentally studied by means of low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy. It is shown that the visible height  $h$  of the monatomic step on Pb(111) surface demonstrates oscillatory dependence on bias voltage  $U$ . The period of the oscillations on the dependence of  $h$  on  $U$  coincides with the period of oscillations of both local tunneling conductance ( $dI/dU$ ) and the rate of the tip displacement ( $dZ/dU$ ) at sweeping  $U$ . It points to that the oscillations of the visible height of the monatomic Pb(111) step are controlled by resonant tunneling of electrons from the W tip to the Pb(111) film through quantum-well states. We argue that the maximum and minimum visible heights correspond to the bias voltages, at which local densities of states for the Pb(111) terraces of different thickness are equal.

## **Структурные, электронные и транспортные свойства пленок Ga атомной толщины, выращенных на поверхности Si(111)**

Л.В. Бондаренко<sup>1</sup>, А.Ю. Тупчая<sup>1</sup>, Ю.Е. Вековшинин<sup>1</sup>, Д.В. Грузнев<sup>1</sup>, А.Н. Михалюк<sup>1,2</sup>, Д.В. Денисов<sup>1</sup>, А.В. Матецкий<sup>1,3</sup>, Д.А. Олянич<sup>1</sup>, Т.В. Утас<sup>1</sup>, В.С. Жданов<sup>1,2</sup>, А.В. Зотов<sup>1</sup> и А.А. Саранин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

<sup>2</sup>*Институт наукоёмких технологий и передовых материалов, ДВФУ, Владивосток*

<sup>3</sup>*Instituto di Struttura della Materia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Trieste, Italy*

Пленки галлия атомной толщины в настоящее время вызывают значительный интерес из-за возможности обнаружения у них сверхпроводящих свойств, а также образования галленена, галлиевого аналога графена. Имея в виду эти перспективы, мы исследовали систему Ga/Si(111) с использованием дифракции медленных электронов (ДМЭ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) для определения ее структурных свойств, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) и четырехзондовых транспортных измерений для выяснения ее электронной структуры и транспортных свойств. Все экспериментальные измерения были дополнены расчетами из первых принципов. Температурно-зависимые наблюдения с помощью методов ДМЭ и СТМ показали, что галленено-подобное СТМ изображение поверхности пленки Ga при комнатной температуре является усредненной картиной, связанной с быстрым движением адатомов Ga. Измерения с помощью ФЭСУР в комбинации с транспортными измерениями показали, что пленка Ga демонстрирует андерсоновскую локализацию электронов из-за структурного беспорядка, который делает систему изолирующей. Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ 19-12-00101, <https://rscf.ru/project/19-12-00101/>.

## **Structural, electronic and transport properties of the atomic-layer Ga films grown on Si(111) surface**

L.V. Bondarenko<sup>1</sup>, A.Y. Tupchaya<sup>1</sup>, Y.E. Vekovshinin<sup>1</sup>, D.V. Gruznev<sup>1</sup>, A.N. Mihalyuk<sup>1,2</sup>, D.V. Denisov<sup>1</sup>, A.V. Matetskiy<sup>1,3</sup>, D.A. Olyanich<sup>1</sup>, T.V. Utas<sup>1</sup>, V.S. Zhdanov<sup>1,2</sup>, A.V. Zotov<sup>1</sup> and A.A. Saranin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok*

<sup>2</sup>*Institute of High Technologies and Advanced Materials, FEFU, Vladivostok*

<sup>3</sup>*Instituto di Struttura della Materia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Trieste, Italy*

Few-atomic-layer Ga films currently attract considerable interest, due to their potential for observing superconducting properties and formation of the gallenene, Ga analogue of graphene. Based on these perspectives, we investigated Ga/Si(111) system using low-energy electron diffraction (LEED) and scanning tunneling microscopy (STM) to elucidate its structural properties, angle-resolved photoelectron spectroscopy (ARPES), and four-point-probe transport measurements to determine its electronic structure and transport properties. All experimental measurements were supplemented with the DFT. Temperature-dependent observations based on LEED and STM revealed that the gallenene-like STM appearance of the Ga film surface at room temperature is an average pattern associated with the fast motion of Ga adatoms. ARPES and transport measurements showed that the Ga film exhibits Anderson electron localization due to the structural disorder that makes the system insulating.

This work is supported by the RSF grant 19-12-00101, <https://rscf.ru/project/19-12-00101/>

## **Атомная структура и регулярность ступеней на поверхностях Si(hhm)**

А.Н. Чайка

*Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2, 142432, Россия*

Ступенчатые поверхности кремния с контролируемым расстоянием между ребрами ступеней могут быть использованы для создания систем низкоразмерных нанобъектов с уникальными свойствами. В докладе обсуждаются особенности атомной структуры и процедуры подготовки регулярных ступенчатых поверхностей Si(hhm), полученных небольшим (до  $10^\circ$ ) отклонением от Si(111). Экспериментальные данные демонстрируют возможность воспроизводимого формирования массива ступеней без сбоев периодичности атомного масштаба на участках микронного размера в условиях сверхвысокого вакуума. С помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции медленных электронов исследована атомная структура террас и ступеней. Данные СТМ атомного разрешения демонстрируют, что регулярность ступеней на поверхностях Si(hhm) не связана с формированием определенной атомной структуры в системе «терраса + ступень», минимизирующей поверхностную энергию. Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

## **Atomic structure and step periodicity on Si(hhm) surfaces**

A.N. Chaika

*Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, 2 Academician Ossipyan Street, Moscow District, 142432, Russia*

Vicinal silicon surfaces with controlled step periodicity can be utilized for fabricating low-dimensional objects with unique properties. We discuss the details of the atomic structure and preparation procedure for fabricating regular stepped systems on Si(hhm) surfaces, obtained by small (lower than  $10^\circ$ ) miscut from Si(111) plane. The experimental data demonstrate reproducible fabrication of atomically precise step arrays without breaking step periodicity on surface areas of micrometer size in ultra-high vacuum conditions. The atomic structure of steps and terraces was studied using scanning tunneling microscopy and low energy electron diffraction. Atomically resolved STM data demonstrate that regularity of the stepped structures on Si(hhm) surfaces is not related to formation of the unique terrace and step atomic structure minimizing the surface energy. This work was carried out within the state task of the ISSP RAS

## Сканирующая туннельная спектроскопия краевых состояний на ступенях топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Se}_3$

Н.И. Федотов, С.В. Зайцев-Зотов

*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7*

Интерес к топологическим изоляторам обусловлен как их необычными свойствами (наличие топологически защищённых поверхностных состояний, подавление обратного рассеяния в них), так и перспективами применения этих свойств для создания элементной базы приборов микро- и наноэлектроники. В частности, важными каналами проводимости или рассеяния могут оказаться одномерные состояния. Возможность их появления на ступенях поверхности, рёбрах нанопроволок и краях тонких слоев топологических изоляторов исследуется в настоящей работе. Здесь представлены результаты исследования ступеней поверхности топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [1, 2] и сверхтонких плёнок [3]  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии. Вблизи ступеней наблюдается изгиб зон, а также происходит изменение туннельных спектров. В частности, на месте минимума, соответствующего точке Дирака, появляется плато с резким максимумом на краю. Показано, что эти изменения соответствуют образованию квазисвязанных одномерных состояний в получившейся потенциальной яме. Экспериментальные наблюдения подкреплены численным моделированием ступени на основе 2D эффективного гамильтониана с изгибом зон и ступеней, а также нанопроволок и тонких плёнок в рамках 3D эффективного гамильтониана без учёта изгиба зон [4]. В последнем случае не обнаружено квазисвязанных состояний на рёбрах нанопроволок, однако имеются состояния, связанные с отдельными гранями. Также эти вычисления в согласии с предыдущими работами предсказывают существование краевых состояний в сверхтонких плёнках халькогенидов висмута при некоторых значениях толщины. Экспериментальный поиск таких состояний продолжается.

Работа выполняется при поддержке РФФ (грант 21-72-20114).

[1] N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, *Phys. Rev. B* **95**, 155403 (2017)

[2] N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.* **13**, 1800617 (2019)

[3] N.I. Fedotov, A.A. Maizlakh, V.V. Pavlovskiy, G.V. Rybalchenko, S.V. Zaitsev-Zotov, *Surfaces and Interfaces* **31**, 102015 (2022)

[4] N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, *J. Phys.: Condens. Matter* **30**, 485301 (2018)

## Scanning tunneling spectroscopy of edge states on surface steps of topological insulator $\text{Bi}_2\text{Se}_3$

N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov

*IRE RAS, 125009, Mokhovaya 11-7, Moscow*

The interest in topological insulators is based on their unusual properties (presence of topologically protected surface states, suppression of backscattering) as well as their perspective application in the development of new micro and nanoelectronic devices. In particular, one-dimensional states can be of importance as possible conductance or scattering channels. Possibility of their formation on surface steps and edges of nanowires and thin films is investigated in this work. Here we present the results of investigation of surface steps of topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [1,2] and ultrathin films [3] of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  by means of scanning tunneling microscopy and spectroscopy. In the vicinity of the steps we observe band bending and



a change in tunneling spectra. In particular, instead of the minimum corresponding to the Dirac point a plateau appears accompanied by a sharp maximum. We show that these changes correspond to the formation of quasibound one-dimensional states in the resulting quantum well. Experimental observations are supported by numerical modeling of surface steps on the basis of a 2D effective Hamiltonian with band bending and of surface steps, nanowires and thin films in the framework of a 3D effective Hamiltonian without band bending [4]. In the latter case no quasibound states are found on the edges of the nanowires, but states bound to particular faces exist. These calculations in accordance with previous works predict edge states in ultrathin bismuth chalcogenide films at certain thickness values. Experimental search for these states continues.

This work is supported by RSF (grant no. 21-72-20114).

- [1] N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, *Phys. Rev. B* **95**, 155403 (2017)
- [2] N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.* **13**, 1800617 (2019)
- [3] N.I. Fedotov, A.A. Maizlakh, V.V. Pavlovskiy, G.V. Rybalchenko, S.V. Zaitsev-Zotov, *Surfaces and Interfaces* **31**, 102015 (2022)
- [4] N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov, *J. Phys.: Condens. Matter* **30**, 485301 (2018)

## **Автоматическое распознавание образов и анализ объектов на поверхности (методическое сообщение)**

А.Ю. Аладышкин<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, Нижний Новгород, 603950*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, д. 23, Нижний Новгород, 603022*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, д. 20, Москва, 101000*

<sup>4</sup>*Центр перспективных методов мезофизики и нанотехнологий, Московский физико-технический институт, Институтский пер., д. 9, Долгопрудный Московской обл., 141700*

В докладе будут разобраны некоторые методические вопросы, касающиеся возможностей автоматического распознавания объектов в приложении к задачам физики поверхности и сканирующей зондовой микроскопии. Будут представлены примеры распознавания однотипных объектов с помощью кросс-корреляционной функции, автоматического устранения наклона, примеры построения скелета изображения и определение концевых точек и точек ветвления, автоматического поиска винтовых дислокаций и прочее. Для практической реализации алгоритмов используется язык Matlab. Работа выполнена при поддержке государственного задания ИФМ РАН в 2023 году.

## **Automatic recognition of surface patterns and their analysis**

A.Yu. Aladyshkin<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603022, Russia*

<sup>3</sup>*National Research University Higher School of Economics, Moscow 101000, Russia*

<sup>4</sup>*Center for Advanced Mesoscience and Nanotechnology. Moscow Institute for Physics and Technology, Dolgoprudny 141700, Russia*

This report is devoted to some methodological problems concerning automatic pattern recognition in surface physics and scanning probe microscopy. We consider problems of detection of surface objects by means of cross-correlation function, automatic tilt removal, building of skeleton of image and detection of end and branching points, automatic detection of screw dislocations etc. We use Matlab programming language to illustrate basic ideas of these algorithms.

## Характеристика топографии кутикулы нематод и волос млекопитающих с помощью атомно-силовой микроскопии

Р.Ф. Фахруллин

*Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский федеральный университет,  
г. Казань, 420008, Республика Татарстан*

Некоторые биологические объекты, представляющие собой достаточно крупные (десятки микрометров в диаметре) стержневидные структуры, с трудом могут быть исследованы с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Следует, однако, отметить, что только атомно-силовая микроскопия может позволить получить количественную информацию о топографических характеристиках таких объектов. К ним можно отнести волосы млекопитающих и нематод, которые имеют цилиндрическую форму и весьма развитую структуру поверхности. Настоящий доклад познакомит слушателя с некоторыми результатами, полученными с использованием АСМ в режиме PeakForce Tapping для характеристики структуры поверхности модифицированных волос человека [1], сельскохозяйственных и диких животных [2], а также свободноживущих нематод *Caenorhabditis elegans* [3] и *Turbatrix aceti* [4]. Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда (проект №20-13-00247).

1. G. Cavallaro, S. Milioto, S. Konnova, G. Fakhrullina, F. Akhatova, G. Lazzara, R. Fakhrullin, Y. Lvov, ACS Appl. Mater. Interfaces **12**, 24348 (2020).
2. N. Rahman, F.H. Scott, Y. Lvov, A. Stavitskaya, F. Akhatova, S. Konnova, G. Fakhrullina, R. Fakhrullin, Pharmaceutics **13**, 1477 (2021).
3. G. Fakhrullina, F. Akhatova, M. Kibardina, D. Fokin, R. Fakhrullin PhD, Nanomedicine:NBM **13**, 483 (2017).
4. F. Akhatova, G. Fakhrullina, E. Khakimova, R. Fakhrullin, Ultramicroscopy **194**, 40 (2018).

## Сканирующая зондовая микроскопия одиночных молекул биополимеров

Д.В. Клинов, Е.В. Дубровин, Н.А. Баринов

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.*

Фундаментальным параметром любого вида микроскопии является разрешающая способность. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – мощный инструмент для изучения структуры биополимеров. Разрешение в СЗМ зависит от радиуса кривизны зонда, который используется для визуализации образца. Для получения сверхвысокого разрешения при СЗМ-исследовании биополимеров, применялись ранее разработанные нами, сверхострые СЗМ-зонды, с радиусом кривизны острия около 1 нм, на сегодня являющиеся самыми острыми на рынке СЗМ-зондов. Другим важным параметром для исследования структуры биополимеров при помощи СЗМ, является подложка. Рассмотрено влияние различных подложек на структуру биополимеров и возможность получения сверхвысокого разрешения. Приведены конкретные примеры исследования структуры молекул ДНК, фибриногена и альбумина. Способ модифицирования гидрофобной поверхности включает нанесение на поверхность монослоя молекул сложного состава. В качестве функциональной группы молекула содержит положительно заряженную группу  $\text{NH}_2$ , в качестве участка, образующего водородные связи, молекула содержит фрагменты  $-\text{NH}(\text{CH}_2)_4\text{CO}-$ , а в качестве гидрофобного участка молекула содержит фрагмент  $-(\text{CH}_2)_{10}-$ . Гидрофобная часть молекулы обеспечивает взаимодействие с гидрофобной поверхностью ВОПГ, а часть молекулы, способная образовывать межмолекулярные водородные связи, обеспечивает взаимодействие между соседними молекулами. Нами исследованы способы самоорганизации молекул модификатора, предложены модели укладки на поверхности ВОПГ. Были получены изображения молекул фибриногена, комплексов стрептовицина с биотинилированными олигонуклеотидами, дцДНК с высоким пространственным разрешением.

## Scanning probe microscopy of single molecules of biopolymers

D.V. Klinov, E.V. Dubrovin, N.A. Barinov

*Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Per., 141700 Dolgoprudny, Russia*

The fundamental parameter of any type of microscopy is the resolution. Scanning probe microscopy (SPM) is a powerful tool for studying the structure of biopolymers. The resolution in SPM depends on the radius of curvature of the probe, which is used to visualize the sample. To obtain ultra-high resolution in the SPM study of biopolymers, we used previously developed, ultra-sharp SPM probes with a radius of curvature of the tip of about 1 nm, which are currently the sharpest on the market of SPM probes. Another important parameter for studying the structure of biopolymers using SPM is the substrate. The influence of various substrates on the structure of biopolymers and the possibility of obtaining ultra-high resolution are considered. Specific examples of studying the structure of DNA, fibrinogen, and albumin molecules are given. The method of modifying a hydrophobic surface involves applying complex molecules to the surface of a monolayer. As a functional group, the molecule contains a positively charged  $\text{NH}_2$  group, as a site forming hydrogen bonds, the molecule contains fragments of -

NH(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>CO-, and as a hydrophobic site, the molecule contains a fragment of -(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>-. The hydrophobic part of the molecule provides interaction with the hydrophobic surface of the EPG, and the part of the molecule capable of forming intermolecular hydrogen bonds provides interaction between neighboring molecules. We have investigated the ways of self-organization of modifier molecules, proposed models of laying on the surface of the EPG. Images of fibrinogen molecules, streptavidin complexes with biotinylated oligonucleotides, and dsDNA with high spatial resolution were obtained.

---

## **О косвенном измерении апертуры зонда-нано pipетки сканирующего микроскопа ионной проводимости**

С.Ю. Лукашенко, О.М. Горбенко, М.В. Жуков, С.В. Пичахчи, И.Д. Сапожников, М.Л. Фельштын, А.О. Голубок

*ИАП РАН, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А*

В качестве зондов в сканирующей микроскопии ионной проводимости (СМИП) используются стеклянные pipетки с наноразмерными апертурами (10-100) нм, изготавливаемые методом нагрева стеклянных капилляров до пороговых значений температуры плавления с последующим разрывом. Для измерения диаметра апертуры используют два подхода: измерение размера апертуры по изображению торца нанопипетки (НП) в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) или косвенное измерение по её электрическому сопротивлению. Мы провели сравнение радиусов апертур НП, полученных из косвенных и прямых измерений. Были проведены измерения электрического сопротивления нескольких НП, заполненных раствором NaCl с разными концентрациями. Оказалось, что размеры наноапертур, определенные из СЭМ изображений торцов НП в 2,5 раза превышали значения, полученные по измерению их сопротивлений. В работе обсуждаются причины столь большого расхождения в определении диаметра апертуры НП прямым и косвенным методами. Мы показываем, что закон Ома не дает адекватного описания транспорта электрического заряда в НП. Адекватное описание транспорта электрического заряда в электролите дают уравнения Нернста-Планка, Навье-Стокса и Лапласа с соответствующими граничными условиями с учетом поверхностного заряда и вязкости на стеклянных стенках НП.

## **On indirect measurement of the nanopipette aperture of the scanning ion-conductance microscope**

S.Yu. Lukashenko, O.M. Gorbenko, M.V. Zhukov, S.V. Pichahchi, I.D. Sapozhnikov, M.L. Felshtyn, A.O. Golubok

*IAI RAS, 198095, Saint-Petersburg, Ivana Chernyh str., 31-33, litera A*

Glass pipettes with nanosized apertures (10-100) nm are used as probes in scanning ion-conductance microscopy (SICM). To measure the aperture diameter, two approaches are used: measurement of the aperture size from the image of the nanopipette (NP) apex in a scanning electron microscope (SEM) or indirect measurement from its electrical resistance. We compared nanopipette aperture radii obtained from indirect and direct measurements. The electrical resistance of several NPs filled with NaCl solution with different concentrations was measured. It turned out that the sizes of nanoapertures determined from SEM images of the NPs were 2.5 times higher than the values obtained by measuring their resistances. The paper discusses the reasons for such a large discrepancy in the determination of the NP aperture diameter by direct and indirect methods. We show that Ohm's law does not provide an adequate description of the electric charge transport in the NP. An adequate description of the electric charge transport in an electrolyte is given by the Nernst-Planck, Navier-Stokes and Laplace equations with the corresponding boundary conditions and the accounting the surface charge and viscosity on the glass walls of the NP.

## **Атомно-силовая микроскопия клеточных объектов для тканевой инженерии**

Ю.М. Ефремов<sup>1</sup>, А.А. Фролова<sup>1</sup>, А.А. Акованцева<sup>2</sup>, А.В. Мурашко<sup>1</sup>, С.Л. Котова<sup>1</sup>, В.С. Преснякова<sup>1</sup>, П.И. Котенева<sup>1</sup>, Н.В. Кошелева<sup>1</sup>, П.С. Тимашев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Сеченовский Университет, 119991 Москва, ул. Трубецкая, 8-2*

<sup>2</sup>*ФИЦ ХФ РАН, 119334 Москва, ул. Косыгина, 4*

<sup>3</sup>*МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Ленинские горы, 1*

Стандартные клеточные культуры и многоклеточные структуры являются основным объектом доклинических биомедицинских исследований. Многоклеточные структуры, среди которых можно выделить клеточные пласты и сфероиды, всё чаще используются как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений, например, в биопечати и тестировании новых лекарств. Абсолютное большинство прошлых исследований были сконцентрированы на биологии клеток и многоклеточных структур, однако, очень мало данных доступно об их механических свойствах. Понимание механического поведения таких структур является необходимым шагом для установления фундаментальных принципов тканевой биомеханики, тесно связанных с механизмами образования новых тканей, регенерации и развития патологий. Механические взаимодействия влияют на формирование клеточных агрегатов, процессы их перестройки и слияния, а также на жизнеспособность и функционирование отдельных клеток в их составе. Одним из доступных методов изучения механических свойств клеток является атомно-силовая микроскопия (АСМ), которая позволяет оценивать локальные вязкоупругие свойства материалов на наноразмерном масштабе. В докладе обсуждаются результаты, недавно полученные нами в исследованиях клеток и многоклеточных структур с помощью АСМ и другими комплементарными методами. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 20-52-04013.

## **Atomic force microscopy of cellular objects for tissue engineering**

Y.M. Efremov<sup>1</sup>, A.A. Frolova<sup>1</sup>, A.A. Akovantseva<sup>2</sup>, A.V. Murashko<sup>1</sup>, S.L. Kotova<sup>1</sup>, V.S. Presniakova<sup>1</sup>, P.I. Koteneva<sup>1</sup>, N.V. Kosheleva<sup>1</sup>, P.S. Timashev<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Sechenov University, 119991 Moscow, Russia, 8-2, Trubetskaya St., 8-2*

<sup>2</sup>*N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, 119991 Moscow, Kosygin St., 4*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Leninskiye Hills, 1*

Standard cell cultures and multicellular structures are the main object of preclinical biomedical research. Multicellular structures, including cell sheets and spheroids, are increasingly being used both for fundamental research and for practical applications, for example, in bioprinting and drug testing. The vast majority of past research has focused on the biology of cells and multicellular structures, however, very little data is available on their mechanical properties. Understanding the mechanical behavior of such structures is a necessary step to establish the fundamental principles of tissue biomechanics, which are closely related to the mechanisms of new tissue formation, regeneration, and development of pathologies. Mechanical interactions affect the formation of cell aggregates, the processes of their rearrangement and fusion, as well as the viability and functioning of individual cells in their composition. One of the available methods for studying the mechanical properties of cells is atomic force microscopy (AFM), which makes it possible to evaluate the local viscoelastic properties of materials on a nanoscale. The report discusses the results recently obtained by our group in studies of cells and multicellular structures using AFM and other complementary methods. This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (20-52-04013).

## **Особенности фазового поведения термочувствительных полимеров для биомедицинских применений, выявленные методом атомно-силовой микроскопии**

А.А. Фролова<sup>1</sup>, В.С. Куканова<sup>1</sup>, С.Л. Котова<sup>1</sup>, С.В. Костюк<sup>2</sup>, Ю.А. Рочев<sup>3</sup>, Ю.М. Ефремов<sup>1</sup>, А.А. Акованцева<sup>4</sup>, П.С. Тимашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова, 119991, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

<sup>2</sup>НИИ ФХП БГУ, 220006, Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская, 14

<sup>3</sup>НУИ, НЦБИН, Голуэй, Ирландия, X91 TK33, ул. Университетская

<sup>4</sup>ФГБУ ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4

Стимул-чувствительные («smart», «intelligent») полимеры представляют собой класс полимеров, реагирующих на изменения окружающей среды. Среди факторов или так называемых стимулов («stimuli»), к которым чувствительны такие материалы, основными являются температура, pH, влажность, химические соединения, электрическое или магнитное поле. Материалы на основе таких полимеров находят применение как биосенсоры, носители при доставке лекарств с контролируемым высвобождением и в качестве скаффолдов в тканевой инженерии. Термочувствительные полимеры меняют свои физико-химические свойства в ответ на изменение температуры, претерпевая фазовый переход при достижении нижней или верхней критической точки растворения (НКТР или ВКТР). Одним из наиболее изученных таких полимеров является поли-N-изопропилакриламид (ПНИПАМ) с НКТР близкой к физиологической (около 32°C). С помощью присоединения различных функциональных групп или других полимеров можно добиться смещения температурного перехода у ПНИПАМ, тем самым регулируя его свойства под интересующие исследователей задачи. В частности, сополимеры на основе ПНИПАМ используются в технологии клеточных пластов. Данная технология заключается в наращивании клеточного пласта с использованием подложки в виде данного полимера или сополимера на его основе и последующем откреплении цельного клеточного пласта от полимерной подложки и помещения его вместо дефекта (например суставного или кожного). Такие клеточные пласты выращиваются на тонких или ультратонких пленках и при достаточном объеме клеточного пласта, с помощью понижения температуры значительно ниже НКТР, добиваются растворения полимерной подложки и своевременного открепления цельного клеточного пласта. Изучение растворения таких пленок в процессе фазового перехода является нетривиальной задачей, в отличие от исследования сшитых гидрогелей, так как пленка физически исчезает при переходе. Нами разработан метод исследования фазового перехода в термочувствительных полимерах на основе атомно-силовой микроскопии. В температурном цикле были изучены изменения механических характеристик и степени набухания для тонких пленок ряда термочувствительных полимеров и выявлены особенности их фазового поведения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-15-00349.



## Phase Behavior of Thermoresponsive Polymers for Biomedical Applications Studied by Atomic Force Microscopy

A.A. Frolova<sup>1</sup>, V.S. Kukanova<sup>1</sup>, S.L. Kotova<sup>1</sup>, S.V. Kostjuk<sup>2</sup>, Yu.A. Rochev<sup>3</sup>, Yu.M. Efremov<sup>1</sup>, A.A. Akovantseva<sup>4</sup>, P.S. Timashev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, 119991, Moscow, Trubetskaya St., 8-2*

<sup>2</sup>*Research Institute for PCP of the BSU, 220006 Minsk, Belarus, Leningradskaya Str., 14*

<sup>3</sup>*NUI, National Centre for biomedical engineering science, H91 TK33 Galway, Ireland, University Road*

<sup>4</sup>*N.N. Semenov Research Center of Chemical Physics. 119991, Moscow, Kosygina St., 4*

Stimuli-responsive («smart», «intelligent») polymers is a class of polymers which react to the changes of the environment. Among the factors or so-called stimuli are temperature, pH, humidity, certain chemical substances, electric and magnetic fields. Materials based on stimuli-responsive polymers find such applications as biosensors, carriers in controlled drug release, scaffolds for tissue engineering. Thermoresponsive polymers change their physico-chemical properties following the temperature changes, with a phase transition upon reaching either the lower or upper critical solution temperature (UCST or LCST). Poly-isopropylacrylamide (PNIPAM) is one of the most intensively studied thermoresponsive polymers due to a physiologically relevant LCST of about 32<sup>0</sup>C. With the addition of different functional groups or copolymerization, one can achieve a controllable shift of the LCST, according to the target application. In particular, PNIPAM-based copolymers are used in the cell sheet technology. This technology consists in growing a cell sheet atop a substrate made of such a polymer or copolymer followed by the cell sheet detachment and placing it into the site of a defect (for example, a cartilage of skin defect). Such cell sheets are grown on thin and ultrathin polymer films which undergo dissolution at the temperatures below the LCST, thus leading to the controllable detachment of the cell sheet as a whole. Studying the dissolution of such films is a non-trivial task, in contrast to crosslinked hydrogels, since the film physically disappears in the course of the transition. We have developed an approach to the study of the phase transition in thermoresponsive polymer films based on atomic force microscopy. In a temperature cycle, we have studied the changes in the mechanical and swelling parameters for thin films of a number of thermoresponsive polymers and described their phase behavior.

This study was supported by the Russian Science Foundation grant № 21-15-00349.

---

## **Установление влияния патологий роговицы человеческого глаза на биомеханические и топографические свойства отдельных ее слоев методом атомно-силовой микроскопии**

А.А. Акованцева<sup>1</sup>, А.К. Абукеримова<sup>2</sup>, С.Э. Аветисов<sup>2</sup>, В.С. Куканова<sup>3</sup>, А.А. Фролова<sup>3</sup>, Ю.М. Ефремов<sup>3</sup>, С.Л. Котова<sup>3</sup>, П.С. Тимашев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ ХФ РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 4

<sup>2</sup>ФГБНУ "НИИ Глазных болезней им. М.М. Краснова", 119021, Москва, ул. Россолимо, 11А

<sup>3</sup>ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова, 119991, Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Роговица является частью наружной фиброзной оболочки глаза, что во многом определяет её функциональные особенности. Дифференцированные подходы к оценке биомеханических свойств роговицы в первую очередь необходимы при проведении операций по кератопластике, так как данная операция основывается на принципе селективной замены пораженных слоев роговицы, в большинстве случаев – исключительно Десцеметовой мембраны. Однако не менее важным является установление влияния патологий Десцеметовой мембраны на биомеханические и топографические характеристики других слоев роговицы. В настоящее время наиболее перспективным неразрушающим методом исследования локальных биомеханических и топографических характеристик является атомно-силовая микроскопия. В данной работе методом атомно-силовой микроскопии было проведено исследование влияния возраста пациентов, кератоконуса и буллезной кератопатии на механические и топографические свойства всех слоев роговицы.

## **Determination of the influence of pathologies of the human eye cornea on the biomechanical and topographic properties of its individual layers by atomic force microscopy**

A.A. Akovantseva<sup>1</sup>, A.K. Abukerimova<sup>2</sup>, S.E. Avetisov<sup>2</sup>, V.S. Kukanova<sup>3</sup>, A.A. Frolova<sup>3</sup>, Yu.M. Efremov<sup>3</sup>, S.L. Kotova<sup>3</sup>, P.S. Timashev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Semenov Research Center of Chemical Physics, 119991, Moscow, Kosygina St., 4

<sup>2</sup>Research Institute of Eye Diseases, 119021, Moscow, Rossolimo St., 11A

<sup>3</sup>I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, 119991, Moscow, Trubetskaya St., 8-2

Cornea is a part of the external fibrous membrane of the eye, which determines its functional features to a great extent. Differential approaches to the evaluation of the corneal biomechanical properties are necessary mainly for keratoplasty, because this operation is based on the principle of selective replacement of the affected corneal layers, in most cases - only Descemet's membrane. However, it is equally important to establish the influence of Descemet's membrane pathologies on the biomechanical and topographic characteristics of other corneal layers. Currently, the most promising non-destructive method to study the local biomechanical and topographic characteristics is atomic force microscopy. In the present work the effect of the age, the presence of keratoconus and bullous keratopathy on the mechanical and topographic properties of all the corneal layers was investigated by atomic force microscopy.

## **Применение атомно-силовой микроскопии для исследования кристаллов триглицинсульфата с послойно-периодической модулированной структурой**

А.К. Лашкова, Р.В. Гайнутдинов

*Федеральный научно–исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333, Москва, ул. Ленинский проспект, 59*

Проведено комплексное исследование ростовой полосчатой структуры и механических свойств кристаллов триглицинсульфата (TGS), послойно легированных примесью внедрения ( $\text{Cr}^{3+}$ ) и замещения (*L*- $\alpha$ -аланин). В режиме сканирующей микроскопии пьезоотклика получены панорамные изображения доменной структуры кристаллов разных составов, оценена плотность доменных границ в пределах разных слоев. В режимах Кельвин-зондовой силовой микроскопии и сканирующей емкостной силовой микроскопии изучена переходная область между полосами номинально чистого TGS и TGS с примесью ионов хрома. Предложена методика исследования локальных упругих свойств в полосах разного состава методами корреляционной электрической атомно-силовой микроскопии и силовой спектроскопии. Определены модули Юнга в «чистых» и легированных полосах кристаллов.

## **Application of atomic force microscopy for the study of triglycine sulfate crystals with a layer-by-layer periodic modulated structure**

A.K. Lashkova, R.V. Gainutdinov

*Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS, 119333, Moscow, Leninsky prospect 59*

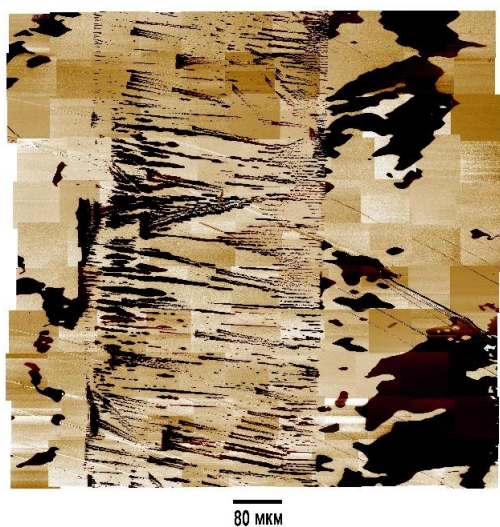
A comprehensive study of the periodic growth structure and mechanical properties of triglycine sulfate (TGS) crystals doped layer-by-layer with an interstitial impurity ( $\text{Cr}^{3+}$ ) and a substitution impurity (*L*- $\alpha$ -alanine) has been carried out. With the piezoresponse force microscopy were obtained panoramic images of the domain structure of crystals with different compositions, and the density of domain walls within different layers was estimated. The transition region between the strips of nominally pure TGS and TGS with an impurity of chromium ions has been studied by the Kelvin probe force microscopy and the scanning capacitive force microscopy modes. A technique is proposed for studying the local elastic properties in strips with different composition by the methods of correlation electrical atomic force microscopy and contact atomic-force spectroscopy. Young's moduli were determined for impurity free and doped crystal stripes.

Сегнетоэлектрические кристаллы играют важную роль в развитии современной электроники. Они используются для создания элементной базы систем обработки и хранения информации, средств автоматики, радиоэлектроники, оптоэлектроники и т.д. Расширение области применения, а также повышение эффективности их использования в уже известных научно-технических направлениях связано с разработкой методов управления свойствами этих кристаллов. Один из таких способов воздействия – введение легирующей примеси в процессе роста, в частности послойное. Комплексное исследование ростовой полосчатой структуры и механических свойств сегнетоэлектрических кристаллов, послойно легированных примесями внедрения и замещения посредством методик АСМ позволяет составить максимально полную картину о влиянии условий роста на характеристики получаемых кристаллов.

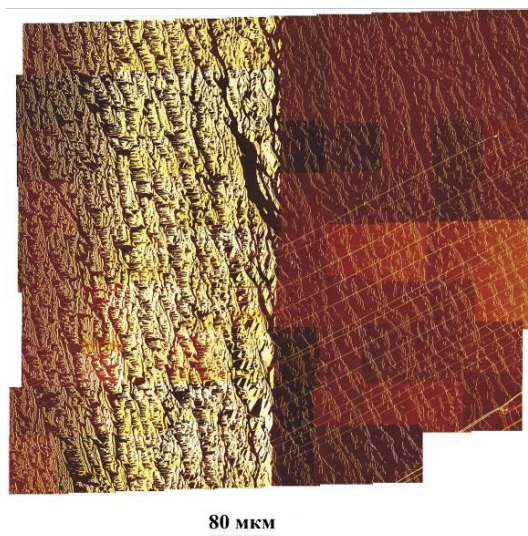
В данной работе объектами исследования служили монокристаллы триглицинсульфата с профильным распределением примесей ионов хрома ( $\text{Cr}^{3+}$ ) и аланина (L- $\alpha$ -аланин и D,L- $\alpha$ -аланин), выращенные по методике, разработанной в Институте технической акустики НАН Беларуси [1]. Слоистая структура кристаллов достигалась путем дорачивания затравки попеременно в растворах разного состава – в номинально чистом и содержащем примесь (ионов хрома или аланина). Кристаллы TGS – TGS + Cr были выращены при концентрации хрома в растворе 5 мас. %, TGS – TGS + LATGS – при концентрации примеси L- $\alpha$ -аланина 12 мас. %, DLATGS – LATGS – при концентрации L- $\alpha$ -аланина 25 мас. % и рацемической смеси D,L- $\alpha$ -аланина 25 мас. % в кристаллизационном растворе. Ширина полос, содержащих легирующую примесь, задавалась временем нахождения кристалла в соответствующем растворе.

Для дальнейшего изучения образцов методами АСМ из пирамиды роста грани  $m$  кристаллов вырезали бруски с большой осью, параллельной сегнетоэлектрической оси  $b$ , которые затем раскалывали по плоскости спайности (010) на образцы толщиной 1,5–2 мм. Эксперименты по подготовке и исследованию поверхности образцов проводили в контролируемых условиях измерительного комплекса «TRACKPORE ROOM-05» класс чистоты 5 ИСО (100). АСМ исследования проводились на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA Prima (НТ-МДТ).

Доменная структура слоистых кристаллов визуализировалась посредством высокоразрешающего метода сканирующей микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМП), позволяющего получать изображения доменной структуры. Использовали стандартные кремниевые кантилеверы с покрытием Pt. Представить общую картину доменной структуры в разных полосах роста позволяет соединение большого количества последовательных сканов в одно целое изображение – панораму.



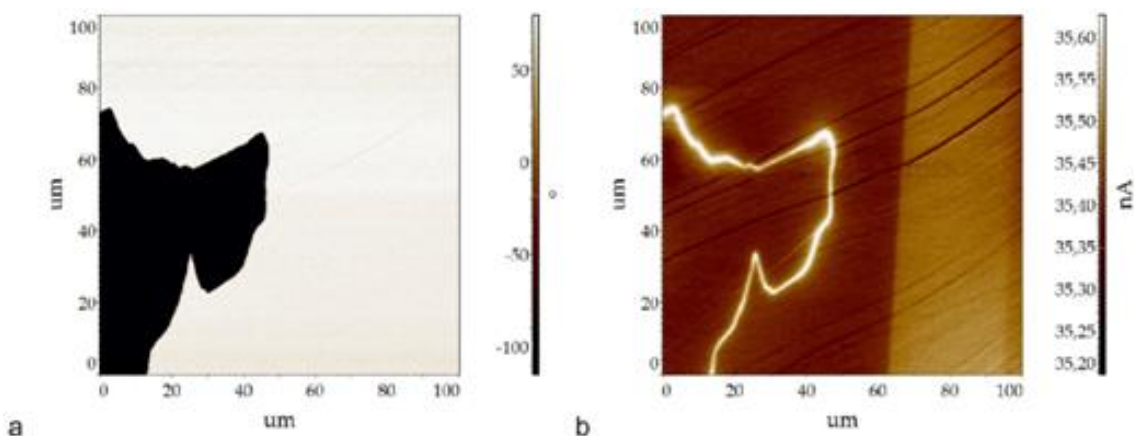
**Рис.1.** Панорамное изображение доменной структуры TGS–TGS+Cr



**Рис. 2.** Панорамное изображение доменной структуры DLATGS – LATGS

На Рис.1. видно, что доменная структура чистых и примесных участков заметно отличается. Вдоль границ слоев располагаются домены достаточно крупных размеров, а на участках с примесью преобладает мелкодисперсная доменная структура. Для образца TGS легированного хромом были рассчитаны статическая униполярность для участка с примесью и без нее, а так же приведенная плотность доменных стенок на единицу площади [2]. Обработка и анализ изображений проводились с помощью программного обеспечения SPIP 6.1.1(Image Metrology). Статическая униполярность для обоих участков невысока и практически одинакова, а вот приведенная плотность доменных стенок на участке с примесью больше в 3-4 раза.

В образце, легированном D,L- $\alpha$ - и L- $\alpha$ -аланином, характер доменов (Рис.2) в обеих полосах заметно отличается от свойственной чистому TGS доменной структуре, стенки сильно изрезаны, преобладает большой разброс линейных размеров доменов. Это свидетельствует о сильных механических напряжениях, влияющих на доменообразование в процессе роста кристаллов. Для образца DLATGS-LATGS так же были посчитаны статическая униполярность для участков разного состава и приведенная плотность доменных стенок на единицу площади. Расчеты показали, что статическая униполярность в полосах отличается в 2 раза, при этом приведенная плотность доменных стенок отличается в 2,5 раза.



**Рис. 3.** Изображение одного и того же участка поверхности кристалла TGS-TGS+Cr с полосой TGS+Cr (слева) и TGS (справа): СМП (a), СЕСМ (b)

На рис.3 представлены полученные в различных режимах АСМ изображения другого участка поверхности того же кристалла TGS-TGS+Cr на границе между чистой и примесной полосой. На СМП изображении (Рис.3,а) слева виден крупный домен (темный контраст) положительного знака, характерный для номинально чистой полосы, и отсутствует мелкодисперсная доменная структура, которая позволяла бы определить границу примесной полосы. На Рис.3,б приведено изображение того же участка поверхности, полученного методом сканирующей емкостной силовой микроскопии (СЕСМ). На нем можно разглядеть, что помимо границ крупного домена за счет пространственного изменения емкости обнаруживается примесная полоса с промежуточным средним контрастом. Таким образом, контраст емкостного изображения формируется в областях с градиентом примеси  $\text{Cr}^{3+}$ , на доменных границах и на элементах рельефа. Концентрация примеси хрома в примесной полосе по данным рентгенофлуоресцентного анализа составила около 0,04 вес.%, а в номинально чистой полосе не более 0,01 вес.% хрома [3], что при данных условиях измерения дало ощутимое различие в сигнале, формирующем емкостное изображение, несмотря на малую концентрацию. Промежуточный средний контраст СЕСМ изображения на примесных полосах обусловлен электрически активным состоянием примеси, равномерно входящей в решетку кристалла и дающей разницу в

проводимости. Благодаря высокой чувствительности СЕСМ к наличию примеси в кристалле, стало возможным наблюдать ростовые примесные полосы вне связи с доменной структурой.

Для сравнения механических свойств участков разного состава к слоистым кристаллам ТГС было решено применить атомно-силовую спектроскопию (АСС). Этот метод основан на регистрации силовых кривых, которые отражают отклонение гибкой балки АСМ-зонда при взаимодействии острия иглы зонда с поверхностью в зависимости от расстояния между ними. Данная методика позволяет локально измерять модуль Юнга[4]. При этом решались следующие задачи: определение ширины полос и границ между ними с помощью рентгеновских методов и зондовой микроскопии, выбор зон для измерения в середине полос, получение силовых кривых методом АСС и расчет модуля Юнга. Измерения зависимостей силы от расстояния проводили в контактном режиме АСМ в центре каждой полосы (легированной и чистой), чтобы исключить влияние возможной диффузии примеси рядом с границами. Для каждой из полос силовые кривые получали в 25 точках поверхности, которые затем усредняли. После измерений силовых кривых в изучаемых кристаллах получали эталонные силовые кривые на тестовом недеформируемом образце оптически полированного кристалла ниобата лития. С использованием модели Герца, в которой рассматривается взаимодействие жесткой полусферы (в нашем случае это кончик зонда) и бесконечной плоскости (поверхность кристалла) из экспериментальных усредненных кривых был рассчитан модуль Юнга для полос разного состава. В полосах с примесью он оказался ниже, чем в чистых, а именно в кристаллах с примесью хрома разница между полосами составила 20–25%, а для кристалла с примесью *L*- $\alpha$ -аланина – 12–14%. Из полученных результатов можно сделать вывод, что механические характеристики в полосах разного состава в пределах одного кристалла заметно отличаются, введение примеси хрома заметнее влияет на разницу механических характеристик, в то время как примесь аланина вносит меньший вклад.

#### Список литературы

1. В.Н. Шут, И.Ф. Кашевич, Б.Э. Воттс, Кристаллография, **49**(2), 257 (2004).
2. А.Л. Толстихина, Н.В. Белугина, Р.В. Гайнутдинов, Е.С. Иванова, А.К. Лашкова, В.Н. Шут, И.Ф. Кашевич, С.Е. Мозжаров, Кристаллография, **61**(6), 975 (2016).
3. Р. В. Гайнутдинов, А. К. Лашкова, Д. А. Золотов, В. Е. Асадчиков, А. А. Ширяев, А. Г. Иванова, Б. С. Роцин, В. Н. Шут, И. Ф. Кашевич, С. Е. Мозжаров, А. Л. Толстихина, Кристаллография, **67**(4), 630 (2022).
4. Д.В. Лебедев, А.П. Чукланов, А.А. Бухараев, О.С. Дружинина, Письма в ЖТФ, **35**(8), 54 (2009).