

Всероссийская конференция

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

Черноголовка, 4-6 июня 2019 г.

Conference

“Applications of scanning probe microscopy out of ambient
conditions”

Chernogolovka, 4-6 June 2019.

ОРГАНИЗАТОР

Институт физики твердого тела Российской академии наук

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

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

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

А.А. Левченко, д.ф.-м.н. ИФТТ РАН, Черноголовка
А.Н. Чайка, к.ф.-м.н. ИФТТ РАН, Черноголовка
А.А. Жуков, к.ф.-м.н. ИФТТ РАН, Черноголовка
Н.Ф. Лазарева, ИФТТ РАН, Черноголовка

Конференция проводится при поддержке



Российской академии наук,
ras.ru



Института физики твердого тела
Российской академии наук,
issp.ac.ru



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



Интертек Трейдинг Корпорейшн
www.intertech-corp.ru



Российского фонда фундаментальных
исследований, rfbr.ru
Проекты РФФИ 17-02-00454а и
17-02-01291а

Расписание докладов

Вторник 4 июня 2019 г.

10.00-10.10	Открытие конференции
10.10-10.50	(Пр.) В.А. Быков, В.В. Поляков “Зондовая микроскопия и спектроскопия: приборы и технологии анализа материалов, разработки НТ-МДТ Спектрум Инструментс”
10.50-11.30	В.В. Поляков, Ю.А. Бобров, С.И. Леесмент, В.А. Быков “Автоматический поиск параметров сканирования в амплитудно-модуляционной АСМ”
11.30-11.40	Coffee break
11.40-12.20	(Пр.) В.Л. Миронов, Е.В. Скороходов, Р.В. Горев, М.В. Сапожников “Магнитно-резонансная силовая микроскопия планарных ферромагнитных наноструктур”
12.20-13.00	В.С. Столяров, В.В. Дремов, Д.Ю. Родичев “Сканирующая зондовая микроскопия сверхпроводящих гибридных систем”
13.00-14.00	Lunch
14.00-14.40	В.В. Дремов, В.С. Столяров “Сканирующая магнитная микроскопия планарных джозефсоновских структур”
14.40-15.20	А.В. Путилов, С. ДиДжорджио, В.Л. Вадимов, Д.Дж. Трейнер, Э.М. Лекнер, Дж.Л. Кёртис, М. Абдел-Хафиз, О.С. Волкова, А.Н. Васильев, Д.А. Чареев, Г. Карапетров, А.Е. Кошелев, А.Ю. Аладышкин, А.С. Мельников, М. Иавароне “Трансформация вихревой решетки в FeSe в магнитном поле”
15.20-15.30	Coffee break
15.30-16.10	Д.В. Клинов “Атомно-силовая микроскопия одиночных молекул биополимеров”
16.10-16.50	О.В. Кошляк, М.А. Неверова “Локальная намагниченность магниторезистивных структур, контактирующих с магнитомеченными клеточными комплексами”

Среда 5 июня 2019 г.

10.00-10.40	(Пр.) <u>Т.В. Павлова</u> , В.М. Шевлюга, Б.В. Андрюшечкин, Г.М. Жидомиров, К.Н. Ельцов “СТМ-литография на хлорированной поверхности Si(100) с удалением кремния”
10.40-11.20	(Пр.) Н.И. Федотов, <u>С.В. Зайцев-Зотов</u> “Влияние ступеней и потенциальных ям на энергетическую структуру дираковских состояний в топологическом изоляторе Bi_2Se_3”
11.20-11.30	Coffee break
11.30-12.10	(Пр.) <u>Д.А. Музыкаченко</u> , С.И. Орешкин, В.И. Панов, С. VanHaesendonck, А.И. Орешкин “Германен на поверхности металлов: миф или реальность?”
12.10-12.50	(Пр.) <u>Б.В. Андрюшечкин</u> , В.М.Шевлюга, Т.В.Павлова, Г.М.Жидомиров, К.Н. Ельцов “Начальные стадии окисления серебра”
12.50-14.00	Lunch
14.00-14.40	А.В. Путилов, С.С. Уставщиков, С.И. Божко и <u>А.Ю. Аладышкин</u> “Пространственно-неоднородные квантово-размерные состояния в тонких Pb пленках”
14.40-15.20	<u>Н.С. Комаров</u> , Т.В.Павлова, Б.В. Андрюшечкин “Взаимодействие молекулярного йода с поверхностью никеля”
15.20-15.30	Coffee break
15.30-16.10	<u>С.Л. Коваленко</u> , Т.В. Павлова, О.И. Канищева, К.Н.Ельцов “Термопрограммируемый синтез монокристаллов азотированного графена на поверхности Ni(111)”
16.10-16.50	<u>А.Н. Чайка</u> , С.И. Божко, С.С. Назин, В.Н. Семенов, О. Lübben, И.В. Швец “Орбитальное разрешение и химический контраст в СТМ-экспериментах”

Четверг 6 июня 2019 г.

10.00-10.40	(Пр.) <u>Б.А. Логинов</u> , А.Б. Логинов “Опыт применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах”
10.40-11.20	В.С. Неудачина “Особенности СЗМ при воздействии внешних физических факторов и протекании химических реакций: опыт Oxford Instruments Asylum Research”
11.20-11.30	Coffee break
11.30-12.10	<u>Л.А. Фомин</u> , И.В. Маликов, А.В. Черных “Применение магнитно-силовой микроскопии для изучения эпитаксиальных ферро- и антиферромагнитных микроструктур”
12.10-12.50	А.Ю. Аладышкин “Применение триангуляции Делоне для анализа статистических свойств поверхностей с адсорбатами”
12.50-14.00	Lunch
14.00-14.40	А.Г. Темиряев “Использование скриптовых языков в программе управления СЗМ”
14.40-15.20	И.В. Душкин, <u>Ю.И. Муратова</u> “Методы линеаризации устройств нано позиционирования и сканирования в СЗМ с использованием оптических датчиков и плоских сканеров с симметричным расположением пьезостэков”
15.20-15.30	Coffee break
15.30-16.10	<u>М.Е. Докукин</u> , И. Соколов “Использование карт адгезии полученных с помощью СЗМ для выявления “физических” маркеров заболеваний человека”
16.10-16.50	<u>А.А. Жуков</u> , Ch. Volk, A. Winden, H. Hardtdegen, Th. Schaepers, А.А. Елисеев “Исследование локального транспорта и спектроскопии одномерных проводников методиками сканирующей зондовой микроскопии”
16.50-17.00	Заккрытие конференции и подведение итогов

Зондовая микроскопия и спектроскопия: приборы и технологии анализа материалов, разработки NT-MDT Спектрум Инструментс

Виктор А. Быков^{1,2}, Вячеслав В. Поляков¹

¹ *Группа компаний NT-MDT-Spectral Instruments, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 4922-й проезд, дом 4, стр. 3*

² *Московский Физико-технический институт*

Рассматривается общее состояние и новые возможности сканирующей зондовой микроскопии, в том числе, в комбинации со спектроскопией поверхностных структур высокого пространственного разрешения. Рассматриваются возможности интеграции методов искусственного интеллекта (опция ScanTronic) в программное обеспечение сканирующих зондовых микроскопов.

Scanning Probe microscopy and spectroscopy: instruments and technologies for analyzing materials, the development of NT-MDT Spectrum Instruments

Victor A. Bykov^{1,2}, Vyacheslav V. Polyakov¹

¹ *NT-MDT-Spectral Instruments companies group, Proezd 4922, 4/3 Zelenograd, Moscow 124460, Russia*

² *MIPT University*

The general state and new features of scanning probe microscopy are considered, including in combination with spectroscopy of surface structures of high spatial resolution. The possibilities of integrating artificial intelligence methods (ScanTronic option) into the software of scanning probe microscopes are considered.

Автоматический поиск параметров сканирования в амплитудно-модуляционной АСМ

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

NT-MDT Spectrum Instruments, Зеленоград, Москва 124460, Россия.

Амплитудно-модуляционная АСМ (АМ АСМ), также называемая «полуконтактной», а в англоязычной литературе – «tapping mode», используется среди всего многообразия методов АСМ наиболее часто: по нашим данным более 90% публикуемых АСМ-изображений получены с использованием полуконтактного метода. АМ АСМ является основой для многих более сложных методов атомно-силовой микроскопии, таких как метод зонда Кельвина, электростатическая силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия, а также для методов микроскопии и спектроскопии нанометрового пространственного разрешения в видимом, ИК и ТГц диапазонах.

Вместе с тем, по нашим подсчетам, более пятой части АСМ-изображений, представленных в реферируемых журналах, содержат артефакты, характерные для полуконтактного метода, вызванные перескоком мод притяжения и отталкивания кантилевера, эффектом парашютирования зонда, некорректной настройкой параметров обратной связи. Эта удручающая ситуация мотивировала нас к разработке системы «ScanTronic», позволяющей в автоматическом режиме настроить величины свободной и рабочей амплитуд колебаний кантилевера, скорости сканирования и коэффициента усиления обратной связи в полуконтактной АСМ таким образом, чтобы устойчиво обеспечивать получение изображений, свободных от перечисленных артефактов на широком круге образцов.

В докладе будут рассмотрены физические принципы подбора параметров сканирования в полуконтактной АСМ, а также описаны предложенные нами решения для их автоматического поиска, основанные на использовании теории автоматического управления и методов машинного обучения.

Automated adjustment of scanning parameters in tapping mode AFM

V.V. Polyakov, Y.A. Bobrov, S.I. Leesment, V.A. Bykov

NT-MDT Spectrum Instruments, Zelenograd, Moscow 124460, Russia

More than 90% of published AFM images are obtained using tapping mode. Tapping mode serves as the basis for a variety of complex AFM modes like Kelvin probe force microscopy (KPFM), electric force microscopy (EFM), magnetic force microscopy (MFM), etc. as well as for rapidly growing family of optical nanospectroscopy methods like scattering scanning near-field optical microscopy (s-SNOM) in visible, infrared and terahertz spectral ranges.

At the same time, our analysis shows that more than one fifth of images published in peer-reviewed journals contain typical artefacts associated with switching from attractive to repulsive regimes of interaction of cantilever and surface, probe parachuting effect and incorrect setting of feedback gain value. This disheartening situation motivated the development of “ScanTronic” system which allows to automatically adjust the amplitude of cantilever oscillations, scan rate, set point and feedback gain values in tapping mode AFM to provide reliable artifacts-free results.

In this talk we consider the physical background of algorithms based on both machine learning and linear control theory used for automated adjustment of scanning parameters in tapping mode.

Магнитно-резонансная силовая микроскопия планарных ферромагнитных наноструктур

В.Л.Миронов, Е.В.Скороходов, Р.В.Горев, М.В.Сапожников

ИФМ РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

В докладе обсуждаются возможности исследования планарных тонкопленочных ферромагнитных наноструктур с помощью магнитно-резонансного силового микроскопа (МРСМ). Анализируются особенности магнитного взаимодействия зонда с образцом. Описываются алгоритмы моделирования МРСМ отклика и расчетов МРСМ спектров, а также пространственных распределений амплитуды резонансных колебаний намагниченности образца. Приводятся результаты МРСМ исследований микрополосок NiFe с плоскостной анизотропией и многослойных пленочных структур Co/Pt перпендикулярной осевой анизотропией.

Работа выполняется при поддержке ГЗ № 0035-2019-0022-С-01, Программы Президиума РАН № 0035-2018-0016 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-00247).

Magnetic resonance force microscopy of planar ferromagnetic nanostructures

V.L. Mironov, E.V. Skorohodov, R.V. Gorev, M.V. Sopochnikov

IPM RAS, 60950, Nizhny Novgorod, GAP-105

We discuss the possibilities of studying planar thin-film ferromagnetic nanostructures using a magnetic resonance force microscope (MRFM). The peculiarities of the magnetic interaction between probe and sample are analyzed. We describe the algorithms for modeling the MRFM response, as well as the calculations of MRFM spectra and spatial distributions of the resonant oscillations amplitude of the magnetization. The results of the MRFM investigations of NiFe microstrips with plane anisotropy and multilayer Co/Pt film structures with perpendicular axial anisotropy are presented.

This work is supported by state contract # 0035-2019-0022-С-01, Program of Presidium RAS # 0035-2018-0016 and Russian Foundation for Basic Researches (project # 18-02-00247).

Сканирующая зондовая микроскопия сверхпроводящих гибридных систем

В.С. Столяров^{1,2}, В.В. Дремов¹, Д.Ю. Родичев^{1,3}

¹*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Москва, Россия*

²*Национальный университет науки и технологий МИСиС, 119049, Москва, Россия*

³*Лаборатория физики и материаловедения, LPEM, UMR-8213, ESPCI-Paris, PSL, CNRS, Университет Сорбонны, 75005 Париж, Франция*

В докладе будут продемонстрированы результаты недавних пионерских исследований, полученные методами сканирующей туннельной и магнитно-силовой микроскопии сверхпроводящих гибридных систем. (РФФИ проекты 19-02-00981, 19-52-50026, МИСИС К3-2018-032)

Scanning probe microscopy of superconducting hybrid systems

V.S. Stolyarov^{1,2}, V.V. Dremov¹, D. Roditchev^{1,3}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141700 Moscow, Russia*

²*National University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia*

³*Laboratoire de Physique et d'Etudes des Matériaux, LPEM, UMR-8213, ESPCI-Paris, PSL, CNRS, Sorbonne University, 75005 Paris, France*

The report will show the results of recent pioneering research obtained by scanning tunneling and magnetic-force microscopy of superconducting hybrid systems. (RFBR projects 19-02-00981, 19-52-50026, МИСИС К3-2018-032)

Сканирующая магнитная микроскопия планарных джозефсоновских структур

В.В. Дремов, В.С.Столяров

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Москва, Россия

В докладе представлены результаты исследования планарных Джозефсоновских переходов (S-N-S) с помощью магнитного зонда низкотемпературного атомно-силового микроскопа (AFM). Показано, что локальное магнитное поле иглы не только позволяет визуализировать Абрикосовские вихри, но и порождает Джозефсоновские вихри в широких переходах, а также существенно изменяет транспортные свойства перехода, переводя его в $\varphi(0-\pi)$ -состояние. (РФФИ проект 19-02-00981)

Scanning magnetic microscopy of planar Josephson junction.

V.V. Dremov, V.S.Stolyarov

MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation

The results obtained with the magnetic probe of AFM during investigations of planar SNS Josephson junctions are presented in this report. Additionally to the well-known ability to visualize the Abrikosov vortices the MFM images reveal the generation of Josephson vortices by the local magnetic field of the probe. Finally, it is shown that the local field of the probe drastically changes transport properties of the junction switches it to $\varphi(0-\pi)$ -state. (RFBR project 19-02-00981)

Трансформация вихревой решетки в FeSe в магнитном поле

А. В. Путилов^{1,2}, С. ДиДжорджио¹, В. Л. Вадимов², Д. Дж. Трейнер¹, Э. М. Лекнер¹, Дж. Л. Кёртис³, М. Абдел-Хафиз^{4,6}, О. С. Волкова⁶⁻⁸, А. Н. Васильев^{7,6,9}, Д. А. Чареев^{10,8,11}, Г. Карапетров³, А. Е. Кошелев¹², А. Ю. Аладышкин^{2,1}, А. С. Мельников², М. Иавароне¹

¹ Физический факультет, университет Темпл, Филадельфия, 19122, США

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 603950

³ Физический факультет, университет Дрексель, Филадельфия, 19104, США

⁴ Центр науки и технологий высокого давления, Шанхай, 201203, Китай

⁵ Университет Файюма, Файюм, 63514, Египет

⁶ Национальный исследовательский университет "МИСиС", Москва, 119049

⁷ Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва, 119991

⁸ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002

⁹ Южно-уральский государственный университет, Челябинск, 454080

¹⁰ Институт экспериментальной минералогии РАН, Черногловка, 142432

¹¹ Казанский федеральный университет, Казань, 420008

¹² Аргоннская национальная лаборатория, Аргон, 60439, США

Методами низкотемпературной СТМ и СТС исследована вихревая решетка и структура сердцевин вихрей в монокристаллах FeSe. Треугольная вихревая структура, наблюдаемая при низких магнитных полях, искажается и постепенно становится квадратной вблизи магнитного поля 1.5 Т. При этом же поле наблюдается излом на зависимости теплоемкости от магнитного поля. Наблюдаемые явления могут быть связаны с многозонной природой сверхпроводимости в FeSe и объясняться подавлением параметра порядка в одной из зон.

Vortex lattice transformation in FeSe in magnetic field

A. V. Putilov^{1,2}, C. Di Giorgio¹, V. L. Vadimov², D. J. Trainer¹, E. M. Lechner¹, J. L. Curtis³, M. Abdel-Hafiez^{4,5,6}, O. S. Volkova^{6,7,8}, A. N. Vasiliev^{7,6,9}, D. A. Chareev^{10,8,11}, G. Karapetrov³, A. E. Koshelev¹², A. Yu. Aladyshkin^{2,1}, A. S. Mel'nikov², M. Iavarone¹

¹ Physics Department, Temple University, Philadelphia, PA 19122, USA.

² Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia 603950

³ Department of Physics, Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania 19104, USA

⁴ Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research, Shanghai, 201203, China

⁵ Fayoum University, Fayoum 63514, Egypt

⁶ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049, Russia

⁷ Physics Faculty, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

⁸ Ural Federal University, 620002 Ekaterinburg, Russia

⁹ National Research South Ural State University, Chelyabinsk 454080, Russia

¹⁰ Institute of Experimental Mineralogy RAS, 142432 Chernogolovka, Moscow District, Russia

¹¹ Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia

¹² Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, USA

Low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy has been used to image the vortex core and the vortex lattice in FeSe single crystals. A quasi-hexagonal vortex lattice at low magnetic field undergoes noticeable rhombic distortions above a certain field 1.5 T which also reveals itself as a kink in the magnetic field dependence of the specific heat. These observations can be directly connected to the multiband nature of superconductivity in this material, provided we attribute them to the suppression of superconducting order parameter in one of the energy bands.

Атомно-силовая микроскопия одиночных молекул биополимеров

Д.В. Клинов

ФГБУ ФНКЦ ФХМ ФМБА, 119435, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1а

В данном докладе затронуты важные аспекты АСМ одиночных биомолекул. Для получения высокого разрешения при АСМ-исследовании биополимеров, применялись ранее разработанные нами, сверхострые АСМ-зонды, с радиусом кривизны острия около 1 нм. Другим, важным параметром для исследования структуры биополимеров, является подложка. Рассмотрено влияние различных подложек на структуру биополимеров и возможность получения высокого разрешения. Приведены конкретные примеры исследования структуры молекул ДНК, фибриногена, альбумина.

Atomic-force microscopy of single biopolymers molecules

D.V. Klinov

Scientific Research Institute of Physical-Chemical Medicine, Russia, 119435, Moscow, Malaya Pirogovskaya, 1a

This report discusses important aspects of AFM in single biomolecules. To obtain high resolution in AFM study of biopolymers, we used previously developed, ultra-sharp AFM probes with a radius of curvature of the tip of about 1 nm. Another important parameter for the study of the structure of biopolymers is the substrate. The influence of different substrates on the structure of biopolymers and the possibility of obtaining high resolution are considered. Specific examples of the study of the structure of DNA molecules, fibrinogen, albumin are given.

Локальная намагниченность магниторезистивных структур, контактирующих с магнитомеченными клеточными комплексами

О.В.Коплак^{1,2}, М.А. Неверова²

¹*ИИХФ РАН, 142432, Черноголовка*

²*ТГТУ, 392000, Тамбов*

Разработка магниторезистивных (ГМС) платформ обеспечивает мощное их применение в клинической диагностике. Гетероструктуры ГМС предложены и применены для измерения концентрации магнитомеченных клеток. Магнитные наночастицы, включенные в биологическую систему, влияют на намагниченность платформы ГМС своим локальным магнитным полем. Представлены результаты мониторинга поверхности датчика ГМС, покрытого белковыми клетками с магнитными метками, связанными с антигеном Anti-LGR5, а также анализ поверхности, покрытой ферромагнитными частицами (MNP), белковыми клетками с частицами α -Fe₂O₃. Осаждение антигена LGR-5, связанного с α -Fe₂O₃, изменяет локальную намагниченность, что детектируется по фазовому и магнитному контрасту на поверхности ГМС платформ. Обнаружен сложный дендритоподобный профиль высушенной биологической структуры в режиме AFM сканирования и распределение магнитных частиц в MFM режиме. Нанесение магнитомеченных клеток вызывает увеличение критического поля переключения и переключение намагниченности верхнего слоя всей платформы.

Работа выполнена при поддержке грантом 3.1992.2017/4.6 в рамках конкурса научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования.

Local magnetization of magneto resistive structures with magnetically labeled cell complexes

O.V.Koplak^{1,2}, M.A. Neverova²

¹*Institute of Problems of Chemical Physics, 142432 Chernogolovka*

²*Tambov State Technical University, 392000 Tambov*

The development of magneto resistive (GMR) platforms provides powerful application in clinical diagnostics. The GMR heterostructures were proposed and applied for measurements of concentration of magnetically labelled cells. Magnetic nanoparticles are incorporated in a biological system and they affect GMR platform magnetization by scattering local magnetic field. Monitoring of the GMR sensor surface covered by protein–magnetic tag complexes bound to the antigen Anti-LGR5 as well as analysis of the surface covered by NPs and cells labelled by α -Fe₂O₃ nanoparticles has been described. Deposition of the LGR5 stem cells allowed us to reveal complicate a dendrite-like AFM profile corresponding to dried biological structure and MFM scan corresponding to the distribution of magnetic particles. Magnetic scattering field of α -Fe₂O₃ microbeads shifts critical magnetic field of magnetization switching of free layer in magnetoresistive structure.

This work is supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation (grant 3.1992.2017/4.6).

СТМ-литография на хлорированной поверхности Si(100) с удалением кремния

Т.В. Павлова^{1,2}, В.М. Шевлюга¹, Б.В. Андриюшечкин¹, Г.М. Жидомиров¹, К.Н. Ельцов¹

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

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

Литография с использованием СТМ является наиболее точным методом создания структур из примесных атомов на поверхности кремния. В процессе СТМ-литографии по монослою водорода десорбируются только атомы резиста. В нашей работе продемонстрирована возможность удаления кремния с поверхности Si(100) при использовании резиста из монослоя хлора. Созданы дефекты двух типов: ямки травления латерального размера 1-2 нм и глубины в несколько слоев кремния и точечные дефекты с удалением одного (нескольких) атомов кремния. Для создания точечных дефектов сначала, путем атомных манипуляций, формируются краудионы, содержащие фрагмент SiCl₂, после чего этот фрагмент удаляется электронно-стимулированной десорбцией. Обсуждается механизм электронно-стимулированной десорбции хлора и кремния с поверхности Si(100)-2x1-Cl. Полученные результаты открывают новые возможности СТМ-литографии с использованием резиста из хемосорбированного хлора, в том числе трехмерной СТМ-литографии.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 16-12-00050).

STM lithography on chlorinated Si(100) with silicon atoms removal

T.V. Pavlova^{1,2}, V.M. Shevlyuga¹, B.V. Andryushechkin¹, G.M. Zhidomirov¹, K.N. Eltsov¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov st., Moscow, 119991*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

Lithography using STM is the most precise method for the creation of 2D structures of impurities on the silicon surface. In STM lithography with a hydrogen resist, only resist atoms are desorbed. In our work, the possibility of silicon removal from the Si(100) surface is demonstrated by using a chlorine resist. Two types of defects were created: pits of lateral size 1-2 nm and a depth of several silicon layers and point defects with one (several) silicon vacancies. To create point defects, crowdions contained SiCl₂ fragment are formed by atomic manipulations, after that the fragment is removed by electron-stimulated desorption. The mechanism of electron-stimulated desorption of chlorine and silicon from the Si(100)-2x1-Cl surface is discussed. The obtained results open up new possibilities of STM-lithography using a chlorine resist, including 3D STM lithography.

This study was supported by the Russian Science Foundation (Grant 16-12-00050).

Влияние ступеней и потенциальных ям на энергетическую структуру дираковских состояний в топологическом изоляторе Bi_2Se_3

Н.И. Федотов, С.В. Зайцев-Зотов

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

На поверхности топологического изолятора Bi_2Se_3 методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии (СТС) обнаружено существование протяженных потенциальных ям глубиной около 0.1 эВ, формирующихся как вблизи ступеней поверхности, так и, по-видимому, вблизи захороненных протяженных дефектов. Наличие изгиба зон приводит к увеличению значения туннельной плотности состояний dI/dV в точке Дирака. Показано, что этот рост частично обусловлен артефактом туннельной спектроскопии и не может рассматриваться в качестве доказательства существования краевых состояний. Изучение формы туннельных спектров показало, что в этих потенциальных ямах образуются связанные состояния дираковских фермионов, проявляющиеся в виде максимумов на туннельных спектрах СТС. Существование таких состояний качественно и количественно подтверждается результатами численного моделирования в рамках двумерного гамильтониана Дирака. Кроме того, моделирование состояний дираковских электронов вблизи ступеней поверхности и боковых граней в рамках эффективного континуального гамильтониана в трехмерном случае показало, что наличия ступеней на поверхности топологического изолятора недостаточно для появления связанных состояний – к образованию связанных состояний приводит формирование потенциальной ямы вследствие различия работ выхода на разных гранях. Работа поддержана грантом РФФ 16-12-10335.

Influence of steps and potential wells on the energy structure of Dirac states in the topological insulator Bi_2Se_3

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

Kotelnikov IRE RAS, 125009, Moscow, Mokhovaya str, 11, bld. 7.

On the surface of the Bi_2Se_3 topological insulator, scanning tunneling microscopy and spectroscopy revealed the existence of extended potential wells with a depth of about 0.1 eV, which are formed both near the surface steps and, apparently, near the buried extended defects. The presence of band bending leads to an increase in dI/dV at the Dirac point. We demonstrate that this increase is partly due to the artifact of tunneling spectroscopy and cannot be considered as evidence of the existence of edge states. A study of the shape of the tunneling spectra shows that in these potential wells, bound states of Dirac fermions are formed, which manifest themselves as maxima in the STS spectra. The existence of such states is qualitatively and quantitatively confirmed by the results of numerical simulation in the framework of the two-dimensional Dirac Hamiltonian. In addition, the modeling of the states of Dirac electrons near the surface steps and side faces in the three-dimensional case within the framework of the effective continuum Hamiltonian shows that the presence of steps is not enough for the appearance of bound states, but the difference in the work functions of the states on these faces produces bound states of surface Dirac fermions. The work is supported by RSF grant 16-12-10335

Германен на поверхности металлов: миф или реальность?

Д.А. Музыченко¹, С.И. Орешкин², В.И. Панов¹, С. VanHaesendonck³, А.И. Орешкин¹

¹ *Физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.*

² *Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Москва, Россия.*

³ *Department of Physics and Astronomy, KULeuven, BE-3001 Leuven, Belgium.*

В работе исследованы возможности синтеза однослойного германена на металлических поверхностях. Экспериментально, методом сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии были исследованы начальные стадии адсорбции атомов Ge на различных металлических поверхностях: Au(111), Pt(111), Cu(111) и Al(111). Результаты экспериментов сравнивались с результатами численного моделирования в рамках теории функционала плотности. Несмотря на наличие в мировой научной литературе многочисленных сообщений об успешном синтезе германена на металлических поверхностях, было наглядно показано, что особенности взаимодействия Ge с Au, Pt и Cu таковы, что даже при комнатной температуре наблюдаются эффекты твердотельного растворения Ge в этих металлах, что исключает принципиальную возможность роста однослойного германена на них. Исключением, по всей видимости, является поверхность Al(111) на которой становится возможным рост однослойных германий-содержащих структур различной периодичности. Численное моделирование показывает, что наблюдаемые в эксперименте структуры могут быть описаны моделью однослойного германена с периодичностью (2×2) и $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R 30^\circ$ внутри поверхностных ячеек (3×3) и $\sqrt{7} \times \sqrt{7} R 19^\circ$ по отношению к Al(111) (1×1) , соответственно. Однако, вопрос об истинной стехиометрии 2D-островков, индуцированных атомами Ge на поверхности Al(111), продолжает оставаться актуальным.

Germanene on metal surfaces: myth or reality?

D.A. Muzychenko¹, S.I. Oreshkin², V.I. Panov¹, C. Van Haesendonck³, A.I. Oreshkin¹

¹ *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.*

² *Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.*

³ *Department of Physics and Astronomy, KULeuven, BE-3001 Leuven, Belgium.*

In this work, the possibilities of single-layer germanene synthesizing on metal surfaces: Au(111), Pt(111), Cu(111) and Al(111) are investigated by mean of ultrahigh vacuum scanning tunneling microscopy (STM) and density functional theory (DFT). Despite numerous reports on the successful synthesis of germanene on metal surfaces in the world scientific literature, it was clearly shown that even at room temperature the interaction of Ge atoms with Au, Pt and Cu metals leads to the solid-state solubility of Ge in these metals that in turn rules out a possibility of growth of a single-layer germanene on these metals. The exception, most probably, is the Al(111) surface on which the growth of single-layer germanium-induced structures becomes possible. DFT modeling shows that the structures observed in the STM experiments can be described by the model of a single-layer germanene with a (2×2) and $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R 30^\circ$ periodicity within (3×3) and $\sqrt{7} \times \sqrt{7} R 19^\circ$ surface unit cells of Al(111) (1×1) respectively. However, the question of the true stoichiometry of 2D islands induced by Ge atoms on the Al(111) surface remains topical.

Начальные стадии окисления серебра

Б.В. Андрюшечкин^{1,2}, В.М.Шевлюга¹, Т.В.Павлова^{1,2}, Г.М.Жидомиров^{1,2}, К.Н. Ельцов^{1,2}

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

² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

Важность проблемы взаимодействия молекулярного кислорода с поверхностью серебра связана с установлением механизма реакции эпоксирирования алкенов, идущей в присутствии серебряного катализатора. В данной работе представлены результаты исследований атомных структур, формируемых на поверхностях Ag(111) и Ag(100) при взаимодействии с молекулярным кислородом в диапазоне температур 300-490 К, выполненных с использованием низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии. Ввиду чрезвычайно низкого коэффициента прилипания кислорода к поверхности серебра, адсорбция O₂ проводилась в специальном реакторе, соединенном с СВВ установкой, и позволяющем устанавливать давление кислорода в диапазоне 10⁻⁶-10⁻¹ Торр. Установлено, что на начальной стадии взаимодействия O₂ с поверхностью серебра формируются точечные объекты, которые можно охарактеризовать, как локальный оксид. При увеличении экспозиции кислорода при температуре подложки >430 К на поверхности формируется упорядоченный двумерный оксидный слой: (4×4) для Ag(111) и c(2×2) для Ag(100). Адсорбция кислорода при 300 К приводит к формированию на поверхности Ag(111) карбонатов, формирующих упорядоченные фазы. Показано, что для грани Ag(100) формирование карбонатов происходит также и при повышенных температурах. Установлено, что все упорядоченные фазы, наблюдавшиеся ранее при адсорбции кислорода на грань Ag(100), сформированы карбонатами.

Initial stages of silver oxidation

B.V.Andryushechkin^{1,2}, V.M.Shevlyuga¹, T.V.Pavlova^{1,2}, G.M.Zhidomirov^{1,2}, K.N.Eltsov^{1,2}

¹ *Prokhorov General Physics Institute of RAS, Vavilov str. 38, 119991 Moscow, Russia*

² *National Research University Higher School of Economics, Moscow*

The interaction of oxygen with silver surfaces is of the great importance for the recognition of the mechanism of the reaction of olefins epoxidation on the silver catalyst. In this work, we present results of low-temperature STM study of atomic structures formed on Ag(111) and Ag(100) after oxygen adsorption at substrate temperature in the range of 300-490 K. Due to the extremely low sticking probability of oxygen to silver surface, adsorption of O₂ was carried out in a special reactor connected to a UHV setup and allowing the oxygen pressure to be set in the range of 10⁻⁶-10⁻¹ Torr. We established that at the initial stage of the interaction of O₂ with the surface of silver, the formation of point local oxide objects. The further oxygen dosing at substrate temperature of > 430 K leads to the formation of the well ordered two-dimensional oxide layer: (4×4) for Ag(111) and c(2×2) for Ag(100). Oxygen adsorption at 300 K leads to the formation of ordered phases carbonates on Ag(111). For the Ag (100) face, the formation of carbonates also occurs at elevated temperatures. It has been established that all ordered phases reported earlier during the adsorption of oxygen on the Ag(100) face are formed by carbonates.

Пространственно-неоднородные квантово-размерные состояния в тонких Pb пленках

А.В. Путилов¹, С.С. Уставщиков^{1,2}, С.И. Божко³ и А.Ю. Аладышкин^{1,2}

¹ *Институт физики микроструктур РАН, 603087, Нижний Новгород, ул. Академическая, д.7.*

² *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д.23.*

³ *Институт физики твердого тела РАН, 142432, Черногловка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2.*

Методами низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии исследована пространственная зависимость дифференциальной проводимости ультратонких Pb плёнок, осажденных на поверхность Si(111)7×7. Для Pb плёнок характерно наличие квантово-размерных состояний электронов проводимости и, соответственно, максимумов дифференциальной туннельной проводимости, при этом их энергия определяется в основном локальной толщиной Pb слоя. Для достаточно толстых Pb плёнок обнаружены крупномасштабные неоднородности туннельной проводимости, проявляющиеся в плавном сдвиге уровней размерного квантования на величину порядка 50 meV на пространственных масштабах порядка 100 nm. Мы полагаем, что такие неоднородности туннельной проводимости и, соответственно, плотности состояния в плёнках Pb могут быть связаны с наличием внутренних дефектов кристаллической структуры. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-02-00528).

Nonuniform quantum-size states in thin Pb films

A.V. Putilov¹, S.S. Ustavshchikov^{1,2}, S.I. Bozhko³ and A.Yu. Aladyshkin^{1,2}

¹ *Institute for Physics of Microstructures RAS, 603087, Nizhny Novgorod, Academicheskaya str., 7.*

² *N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin avenue, 23.*

³ *Institute for Solid State Physics RAS, 142432, Chernogolovka, Moscow region., Ac. Ossipyan str., 2.*

The dependence of differential tunneling conductivity on the lateral coordinates for thin Pb films deposited on a reconstructed Si(111)7×7 surface is studied by means of low-temperature scanning tunneling microscopy and spectroscopy. The formation of quantum-size states for electrons and, correspondingly, the appearance of maxima of differential tunneling conductivity are typical for thin Pb films. The energy of quantum-size states is determined mainly by local thickness of the Pb film. We observe large-scale nonuniformity of tunneling conductivity for relatively thick Pb films, what reveal itself as monotonous shift of quantum-size levels at about 50 meV at distances of the order of 100 nm. We think that such inhomogeneities of tunneling conductivity and, correspondingly, local density of states in Pb films can be related with internal defects of crystalline structure. The work is supported by the Russian Fund for Basic Research (project 19-02-00528).

Взаимодействие молекулярного йода с поверхностью никеля

Н.С. Комаров¹, Т.В. Павлова^{1,2}, Б.В. Андрияшечкин^{1,2}

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

² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

В данной работе представлено детальное исследование на атомном уровне структурных фазовых переходов в двумерных слоях йода, адсорбированных на различные монокристаллические грани никеля. Установлено, что в зависимости от симметрии и температуры подложки атомный механизм фазовых переходов оказывается различным.

Адсорбция йода на поверхность Ni(111) приводит на первом этапе к формированию соразмерной структуры $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$, соответствующей степени покрытия $1/3$ МС (монослоя). Увеличение степени покрытия приводит к формированию отдельных петлевых доменных стенок и к их последующей конденсации в двумерный кристалл. В случае адсорбции йода на грань (110) на первом этапе формируется соразмерная структура $c(2\times 2)$, которая переходит в несоизмерную квазигексагональную фазу при увеличении степени покрытия за счет непрерывного сжатия вдоль направления [110] с формированием доменных стенок. Наиболее сложная картина переходов наблюдалась для грани Ni(110), на которой на начальной стадии (степень покрытия $1/4$ МС) формируется соразмерная решетка $p(2\times 2)$. Увеличение степени покрытия происходит за счет серии структурных фазовых переходов, приводящих к формированию более плотной структуры $c(5\times 2)$ (степень покрытия 0.40 МС) на нереконструированной поверхности Ni(100). Дальнейшая адсорбция йода приводит к серии реконструкционных фазовых переходов, в ходе которых структура верхнего слоя подложки изменяется. В результате, насыщенный слой йода (степень покрытия 0.44 МС) оказывается адсорбированным на модифицированной поверхности никеля, содержащей специфические яркие полосы и сверхструктуры.

Interaction of molecular iodine with nickel surface

N.S. Komarov, T.V. Pavlova^{1,2}, B.V. Andryushechkin^{1,2}

¹ *Prokhorov General Physics Institute of RAS, Vavilov str. 38, 119991 Moscow, Russia*

² *National Research University Higher School of Economics, Moscow*

In this work, we present a detailed atomic-scale study of structural phase transitions in two-dimensional iodine layers adsorbed on three single-crystal nickel surfaces. Depending on the symmetry and temperature of the substrate, the atomic mechanism of phase transitions turns out to be different.

At the first stage, the adsorption of iodine on the Ni(111) surface leads to the formation of a commensurate structure $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$ corresponding to a coverage of $1/3$ ML (monolayer). An increase of the coverage leads to the formation of separate domain-wall loops and their subsequent condensation into a two-dimensional crystal. At the initial stage of iodine adsorption onto the (110) face, a commensurate $c(2\times 2)$ structure is formed, which transforms into the incommensurate quasi-hexagonal phase by continuous compression along the [110] direction via domain-wall mechanism at further iodine dosing. The most complicated picture of transitions is realized for Ni(110), for which a commensurate phase $p(2\times 2)$ (coverage $1/4$ ML) is formed at the initial stage of adsorption. Further increase of coverage gives rise to a series of structural phase transitions leading to the formation of a more dense $c(5\times 2)$ structure (0.40 ML) on the unreconstructed Ni(100) surface. Further adsorption of iodine leads to a series of reconstruction phase transitions. As a result, a saturated iodine layer (coverage of 0.44 ML) is adsorbed on a modified nickel surface containing specific bright stripes and superstructures.

Термопрограммируемый синтез монокристаллов азотированного графена на поверхности Ni(111)

С.Л. Коваленко¹, Т.В. Павлова^{1,3}, О.И. Канищева^{1,2}, К.Н.Ельцов^{1,3}

¹ИОФ РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

²МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

³ Факультет физики НИУ ВШЭ, 105066, Москва, ул. Старая Басманная, д.21/4

Предложен и реализован термопрограммируемый синтез эпитаксиального монослойного графена, легированного азотом (N-графен). Процедура синтеза включает в себя: 1) насыщение приповерхностной области образца Ni(111) углеродом с сохранением чистоты самой поверхности; 2) адсорбцию ацетонитрила (C₂H₃N) при температуре от -15°C до 0°C дозой около 2000 Ленгмюр; 3) быстрый (флэш) прогрев образца до 140°C; 4) отжиг образца при 400°C. Сравнение расчетов на основе теории функционала плотности и экспериментальных СТМ-изображений (плотность электронных состояний и симметрия дефектов) позволяет утверждать, что атомы азота замещают атомы углерода в решетке графена или находятся в бивакансии (пиридиновый дефект) с общей концентрацией около 0.3%. Для получения квазисвободного графена использовалась интеркаляция золота в интерфейс графен/Ni(111). Интеркаляция проводилась путем напыления золота на поверхность при комнатной температуре и с последующим отжигом в течение 15 мин при 450°C. Установлено, что в интерфейсе между поверхностью никеля и графеном формируется сплошной моноатомный слой золота, возможно с малой добавкой атомов никеля (не более 5%). После интеркаляции монослоя золота в интерфейс между N-графеном и поверхностью Ni(111) целостность графена не нарушалась, а концентрация азота в графене сохранялась на исходном уровне, 0.3%.

Manual for abstracts presented at the conference « Aspects of applications of scanning probe techniques out of ambient conditions »

S.L. Kovalenko¹, T.V. Pavlova^{1,3}, O.I. Kanischeva^{1,2}, K.N. Eltsov^{1,3}

¹GPI RAS, 119991, Moscow 38 Vavilov st.

²MIPT, 141701, Dolgoprudny, Moscow Region, 9 Institutskiy per.

³Faculty of Physics HSE, 105066, Moscow 21/4 Staraya Basmannaya

It's proposed and realised thermal programmed synthesis of epitaxial monolayer nitrogen doped grapheme (N-graphene). A procedure of synthesis includes: 1) saturation of the near surface region of the Ni(111) with carbon while preserving purity of the surface; 2) adsorption of dose of acetonitrile (C₂H₃N) about 2000 Langmuir at a temperature of -15°C to 0°C; 3) flash annealing of the sample to 140°C; 4) annealing the sample at 400°C. Comparison DFT-calculations (Density functional theory) and experimental STM images (density of electron states and symmetry of defects) allow to claiming that nitrogen atoms basically substitute carbon atoms in the graphene lattice or are in bivacancy (pyridine defect) with a total concentration about 0.3%. To obtain quasi-free graphene, gold was intercalated into the graphene/Ni(111) interface. Intercalation was carried out by spraying gold on the surface at room temperature and then annealing for 15 min at 450 ° C. It has been established that a continuous monatomic layer of gold is formed in the interface between the surface of nickel and graphene, possibly with a small addition of nickel atoms (no more than 5%). After intercalation of monolayer of gold into the graphene/Ni(111) interface the graphene continuity wasn't broken and the nitrogen concentration was remained on the same level 0.3%.

Орбитальное разрешение и химический контраст в СТМ-экспериментах

А.Н. Чайка¹, С.И. Божко¹, С.С. Назин¹, В.Н. Семенов¹, О. Lübben², И.В. Швец²

¹ *Институт физики твердого тела РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2.*

² *CRANN, School of Physics, Trinity College Dublin*

В докладе представлены результаты исследований роли орбитальной структуры атомов зонда и поверхности исследуемого образца в процессе формирования СТМ-изображений атомного и субатомного разрешения. Показано, что взаимодействие атомов зонда и поверхности при малых величинах туннельного промежутка может приводить к опустошению электронных состояний с нулевой проекцией орбитального момента на ось z ($p_z, d_{3z^2-r^2}$). Как следствие, различные СТМ-изображения могут наблюдаться при различных расстояниях "зонд-поверхность" и одинаковой атомной структуре поверхности и зонда. Обсуждается возможная связь эффектов взаимодействия с наблюдением химического контраста в СТМ-экспериментах атомного разрешения на многокомпонентных поверхностях.

Работа выполнена в рамках госзадания при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-02-01291).

Orbital resolution and chemical contrast in STM experiments

A.N. Chaika¹, S.I. Bozhko¹, S.S. Nazin¹, V.N. Semenov¹, O. Lübben², I.V. Shvetz²

¹ *Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Moscow district, 2 Academician Ossipyan str., 142432, Russia*

² *CRANN, School of Physics, Trinity College Dublin*

In this report, we discuss the role of the orbital structure of the probe tip and the sample surface atoms in the STM imaging with atomic and subatomic resolution. It is shown that tip and surface atom interaction at small tunneling gaps, comparable with interatomic distances in solids, can lead to depopulation of the electronic states with nonzero orbital momentum projection on the z axis ($p_z, d_{3z^2-r^2}$). As a result, different STM images can be resolved with unchanged surface and tip atomic structure at different tunneling gaps. Possible contribution of the tip-surface interaction to the formation of the chemical contrast in atomically resolved STM experiments on multicomponent surfaces is discussed.

This work was carried out within the state task of ISSP RAS and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 17-02-01291).

Опыт применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах

Б.А.Логинов¹, А.Б.Логинов²

¹ НИУ МИЭТ, АО Завод ПРОТОН, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1

² МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1

Специализированные разработки сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов для различных приложений за период с 1995 года по настоящее время привели к появлению и успешному функционированию микроскопов для следующих применений: для субатомарного разрешения в сверхвысоком вакууме, в том числе с гелиевыми наполняемыми и прокачными криостатами; для различных установок с технологическим вакуумом и разными газовыми средами, в том числе для установок типа "Нанофаб" с технологическими операциями выборочного контроля и литографии в модулях с зондовыми микроскопами; для in-situ наблюдения динамики структуризации плёнок и нанообъектов непосредственно в процессах напыления или эпитакции различными методами; для контроля деградации первой стенки Токамака; для исследования конструкционных и делящихся материалов в перчаточных и горячих камерах ядерных реакторов; для наблюдения динамики деформации структуры материалов в процессе изучения прочностных характеристик при испытаниях в разрывных машинах и др. Одной из последних разработок 2017-2019 годов явился сканирующий зондовый микроскоп, который сканирует образец при температурах от комнатной до 1500 С в атмосфере метана, в том числе реализующий возможность наблюдения динамики возникновения и роста графенов.

Experience of applications of scanning probe techniques out of ambient conditions

B.A.Loginov¹, A.B.Loginov²

¹ MIET, JSC Zavod Proton, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina 1

² Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1

Specialized development of scanning tunneling and atomic force microscopes for various applications for the period from 1995 up to 2019 has led to the manufacture and successful operation of microscopes for the following applications: for subatomic resolution in ultra-high vacuum, including helium-filled and pumping cryostats; for various installations with technological vacuum and different gases, including installations of the "NANOFAB" type with technological operations of lithography and control in modules with probe microscopes; for in-situ observation of dynamics of structure of films and nano-objects directly in the spraying process or epitaxial different methods; to control the degradation of the first wall of the Tokamak; for the study of materials structure dynamics in the glove and hot cells of nuclear reactors; for observation of dynamics of deformation of the structure of materials in the process of studying the strength characteristics when tested in discontinuous machines etc. One of the latest developments of 2017-2019 was a scanning probe microscope that scans a sample at temperatures from room to 1500 C in the methane atmosphere, including with the possibility of observing the dynamics of graphene growth.

Особенности СЗМ при воздействии внешних физических факторов и протекании химических реакций: опыт Oxford Instruments Asylum Research

В.С. Неудачина

Московское представительство Intertech Corporation, 119049 г. Москва, ул. Крымский Вал, д.3, стр. 2

В докладе обсуждаются последние разработки Oxford Instruments Asylum Research в области сканирующей зондовой микроскопии в различных средах при воздействии таких внешних факторов, как специально генерируемые электромагнитные поля, микроволновое излучение (метод sMIM), подсветка с одновременным изучением электрического отклика (СЗМ в исследовании фотовольтаики), методы исследования пьезоэлектриков (микроскопия пьезоотклика и векторная микроскопия пьезоотклика), а также *in situ* исследования в специальных электрохимических ячейках. Также обсуждаются специальные методы возбуждения колебания кантилеверов для реализации полуконтактного режима в жидкости (традиционно сложной области применения для пьезопривода): магнитный привод iDrive и фототермическое возбуждение кантилеверов blueDrive, а также техническая реализация методов контроля влажности и состава среды в ходе СЗМ исследований.

SPM under application of various driving forces and in the process of chemical reactions: Novel developments by Oxford Instrument Asylum Research

Vera S. Neudachina

Moscow representative office of Intertech Corporation, 3 bldg 2 Krymsky Val st., 119049 Moscow

The presentation discusses the latest developments of Oxford Instruments Asylum Research for scanning probe microscopy in various environments under application of such driving forces as specially generated electromagnetic fields, microwave irradiation (sMIM technique), illumination with simultaneous measurement of electric response (SPM for photovoltaics investigations), piezoelectrics studies (PFM and vector PFM) and *in situ* measurements in special electrochemical cells. Modern methods of cantilever excitation for tapping mode in liquids (a traditionally difficult area for piezodriven application) are also discussed, including iDrive, magnetic excitation, and blueDrive, photothermal excitation; technical aspects of humidity and environment control during SPM studies are covered as well.

Применение магнитно-силовой микроскопии для изучения эпитаксиальных ферро- и антиферромагнитных микроструктур

Л.А.Фоми́н, И.В.Маликов, А.В.Черных

ИПТМ РАН, 142432, Черногловка, Московская обл., ул. АкадемикаОсипьяна, д.6

Методами магнитно-силовой микроскопии и микромагнитных расчетов исследовано магнитное строение эпитаксиальных микро- и наноструктур Fe (001) и Fe (011), изготовленных из пленок, выращенных методом импульсного лазерного осаждения в сверхвысоком вакууме на R- и A- плоскостях сапфира с подслоем Mo с одновременно улучшенными магнитными и электрон-транспортными свойствами. Установлены типы микромагнитных состояний и их трансформация в зависимости от размеров и ориентации структуры относительно осей легкого и трудного намагничивания. Также исследованы двухслойные структуры с антиферромагнетиком (Fe/FeMn), предварительно отожженные в вакууме при температуре, выше температуры Нееля во внешнем магнитном поле для формирования обменной анизотропии в слое антиферромагнетика, приводящей к эффекту обменного сдвига. Найдено, что ось обменной анизотропии направлена вдоль магнитного поля, приложенного при отжиге структур.

Application of magnetic force microscopy for study of epitaxial ferro- and antiferromagnetic microstructures

L.A. Fomin, I.V. Malikov, A.V. Chernykh

IMT RAS, 142432, Chernogolovka, Moscow region., Acad. Ossypian str, 6

The magnetic structure of epitaxial micro- and nanostructures of Fe (001) and Fe (011) made from films grown by pulsed laser deposition in ultrahigh vacuum on the R- and A- planes of sapphire with the Mo seed layer with simultaneously improved magnetic and electron transport properties was studied by means of magnetic force microscopy and micromagnetic calculations. The types of micromagnetic states and their transformation are determined depending on the size and orientation of the structure relative to the easy and hard magnetization axes. Two-layer structures with an antiferromagnet (Fe/FeMn), previously annealed in vacuum at a temperature above the Néel temperature in an external magnetic field to form exchange anisotropy in the antiferromagnetic layer, leading to the effect of exchange bias, were also investigated. It was found that the axis of exchange anisotropy is directed along the magnetic field applied during annealing of the structures.

Применение триангуляции Делоне для анализа статистических свойств поверхностей с адсорбатами

А.Ю. Аладышкин^{1,2}

¹ *Институт физики микроструктур РАН, 603087, Нижний Новгород, ул. Академическая, д.7.*

² *Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д.23.*

Доклад посвящен обсуждению возможностей метода, основанного на триангуляции Делоне, для анализа статистических свойств квазиодномерных и двумерных структур, таких как поверхности с адсорбатами или решетки вихрей в сверхпроводниках. Триангуляция Делоне является хорошо известным методом однозначного разбиения двумерной системы узлов на треугольники, при этом разбиение максимизирует минимальный угол среди всех внутренних углов построенных треугольников. Триангуляция Делоне взаимно однозначно соответствует диаграмме Вороного для того же множества точек. Это позволяет получить данные о длине и ориентации «связей» между соседними узлами, а также о размере областей, приходящихся на один узел, и построить соответствующие функции распределения. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-02-00528).

The Delaunay triangulation as an effective method for statistical analysis of surfaces with adsorbates

A.Yu. Aladyshkin^{1,2}

¹ *Institute for Physics of Microstructures RAS, 603087, Nizhny Novgorod, Academicheskaya str., 7.*

² *N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin avenue, 23.*

This talk is devoted to the method, based on the Delaunay (or Delone) triangulation, for analysis of statistical properties of quasi-one-dimensional and two-dimensional structures such as surfaces with adsorbates and vortex lattices in superconductors. The Delaunay triangulation is a well-known method of unambiguous splitting of two-dimensional set of nodes into elementary triangles in such a way to maximize the minimum angle of all the angles of the triangles in the triangulation. The Delaunay triangulation corresponds to Voronoi diagram for the same set of nodes. It allows to get information about lengths and orientations of the bonds between neighboring nodes as well as sizes of areas for the single node and to plot the corresponding histograms (i.e. density probability functions). This work is financially supported by the Russian Fund for Basic Research (project 19-02-00528).

Использование скриптовых языков в программе управления СЗМ

А.Г. Темирязов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского 1, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия.*

Программное обеспечение (ПО) является важным элементом работы сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Часто именно ПО определяет функциональные возможности СЗМ. В докладе будут рассмотрены особенности ПО, основанного на использовании скриптовых языков. Подобный подход позволяет пользователям приборов активно участвовать в развитии программы, разрабатывать новые методики, автоматизировать выполнение последовательности процедур.

Use of scripting languages in the SPM control program

A.G. Temiryazev

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Vvedensky sq. 1,
Fryazino, Moscow region, 141190, Russia*

Software is an important element of the scanning probe microscope (SPM). Often it is the software that determines the functionality of the SPM. The report will consider the features of software based on the use of scripting languages. This approach allows users of devices to participate in the development of the program, to develop new techniques, to automate the implementation of a sequence of procedures.

Методы линеаризации устройств нано-позиционирования и сканирования в СЗМ с использованием оптических датчиков и плоских сканеров с симметричным расположением пьезостэков

И.В. Душкин Ю.И. Муратова

«Нано скан технология», 141700, г. Долгопрудный, Московская область, ул. Заводская, д. 7.

Приведено описание недостатков использования как классических емкостных датчиков перемещения в сканирующих зондовых микроскопах (СЗМ), так и дифференциальных емкостных датчиков. Предложено использование оптических датчиков с фурье-интерполяцией в пьезодрайверах СЗМ. Приведен пример реализации предложенной методики в микроскопе «Centur Standard».

Methods of linearization of nanopositioning and scanning devices in SPM, using optical sensors and flat scanners with a symmetric arrangement of piezostacks

I.V. Dushkin, Ju.I. Muratova

"Nano Scan Technology" Ltd., 141700, Dolgoprudnyy, Zavodskaya St., 7.

Description of the drawbacks of using classic capacitive displacement sensors in SPM and nano-positioning and scanning devices are presented. Method of using differential capacitive sensors in SPM and nano-positioning and scanning devices is discussed in details. We present a new method of using optical encoders with Fourier interpolation as displacement sensors in SPM and nano-positioning and scanning devices. The use of a flat scanner with a special design for the purpose of mechanical linearization of nano-positioning and scanning devices and an example of application of the proposed methods in the SPM "Centur Standard" are presented.

Использование карт адгезии полученных с помощью СЗМ для выявления “физических” маркеров заболеваний человека

М.Е. Докукин^{1,2}, И. Соколов^{2,3,4}

¹*Саровский физико-технический институт, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, ул. Духова, д. 6, Нижегородская область, г. Саров, 607186.*

²*Department of Mechanical Engineering,* ³*Department of Biomedical Engineering,* ⁴*Department of Physics, Tufts University, 02155, Medford, MA, USA*

В докладе представлен новый подход в диагностике заболеваний, основанный на анализе физических свойств поверхности эпителиальных клеток человека. В частности, использовались адгезионные карты клеток, полученные с помощью резонансного и суб-резонансного методов СЗМ. Анализ изображений проводился с привлечением методов машинного обучения.

Было продемонстрировано, что параметры, которые обычно используются в технике для описания рельефа поверхности, могут применяться и для классификации физических изменений эпителиальных клеток. Было обнаружено, что постепенное развитие рака *in vitro* (от нормальных, до бессмертных (предраковое состояние) и до злокачественных клеток) ведет к появлению фрактальной геометрии на поверхности клетки. Кроме того, этот метод был применен для выявления рака мочевого пузыря с помощью клеток, собранных из образцов мочи. Точность диагностики в 94% была достигнута при анализе от пяти клеток от одного пациента.

AFM adhesion imaging to identify “physical” markers of human diseases

М.Е. Dokukin^{1,2}, I. Sokolov^{2,3,4}

¹*Sarov Physical and Technical Institute, National Research Nuclear University MEPHI, 607186, Sarov, Nizhegorodskaya region, Russia*

²*Department of Mechanical Engineering,* ³*Department of Biomedical Engineering,* ⁴*Department of Physics, Tufts University, 02155, Medford, MA, USA*

We report on a new approach in diagnostic imaging based on nanoscale-resolution scanning of surfaces of human cells using resonance and sub-resonance AFM tapping and ringing modes coupled with machine learning analysis.

We demonstrated that surface parameters, which are typically utilized in engineering to describe surfaces, can be applied to classify physical alterations of the surface of epithelial cells. We found that the stepwise *in vitro* development of cancer (from normal to immortal (pre-malignant), to malignant) could be associated with the emergence of simple fractal geometry on the cell surface. Further, we applied this method for the detection of bladder cancer by using cells collected from urine samples. Diagnostic accuracy of 94% achieved when examining five cells per patient's sample.

Исследование локального транспорта и спектроскопии одномерных проводников методиками сканирующей зондовой микроскопии

А.А. Жуков¹, Ch. Volk², A. Winden², H. Hardtdegen³, Th. Schaepers², А.А. Елисеев⁴

¹ ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

² Peter Gruenberg Institut (PGI-9), Forschungszentrum Juelich, 52425 Juelich, Germany; JARA-Fundamentals of Future Information Technology, Forschungszentrum Juelich, 52425 Juelich, Germany.

³ Ernst Ruska-Center for Microscopy and Spectroscopy with Electrons (ER-C), Forschungszentrum Juelich, 52425 Juelich, Germany.

⁴ Факультет наук о материалах, МГУ им. Ломоносова, 119991 Москва, Россия.

Исследованы особенности локального транспорта в одно- и квазиодномерных структурах методом измерения магнитотранспорта в присутствии сканирующего затвора атомно-силового микроскопа (scanning gate microscopy). Продемонстрировано влияние волн зарядовой плотности, а также прозрачности потенциальных барьеров вблизи интерфейса металл-полупроводник на электронный транспорт в нанопроволоках InAs. Кроме того, показана возможность измерения спектроскопии и работы выхода в углеродной нанотрубке при измерении топографии в режиме тэппинга.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проект 17-02-00454а, программ Президиума РАН и в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Application of magnetic force microscopy for study of epitaxial ferro- and antiferromagnetic microstructures

А.А. Zhukov¹, Ch. Volk², A. Winden², H. Hardtdegen³, Th. Schaepers², А.А. Eliseev⁴

¹ ISSP RAS, 142432, Chernogolovka, Moscow region., Acad. Ossypian str, 2

² Peter Gruenberg Institut (PGI-9), Forschungszentrum Juelich, 52425 Juelich, Germany; JARA-Fundamentals of Future Information Technology, Forschungszentrum Juelich, 52425 Juelich, Germany.

³ Ernst Ruska-Center for Microscopy and Spectroscopy with Electrons (ER-C), Forschungszentrum Juelich, 52425 Juelich, Germany.

⁴ Department of Materials Science, Moscow State University, 119991 Moscow, Russia.

The peculiarities of local magnetotransport of one- and quasi-one-dimensional structures in presence of charged atomic-force microscope (AFM) tip (scanning gate microscopy) are investigated. The influence of charge density waves and opacity of potential barriers on metal-semiconductor interfaces on electronic transport are presented. Additionally, we show the possibility to measure the density of states and work-function of carbon nanotubes from the topography map in tapping mode of the AFM.

This work is supported by state task of ISSP RAS, Programs of Presidium RAS and Russian Foundation for Basic Researches (project # 17-02-00454a).
