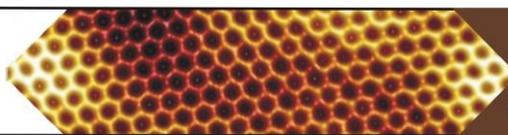




**ИФТТ РАН  
ISSP RAS**



Applications of scanning  
probe microscopy  
out of ambient conditions

**ПРОГРАММА**

**PROGRAM**

## **II Всероссийская конференция**

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

*Черноголовка, 27-29 октября 2020 г.*

## **2<sup>nd</sup> Conference**

**“Applications of scanning probe microscopy out of ambient  
conditions”**

*Chernogolovka, 27-29 of October 2020*

## 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

## 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

М.В. Кведер, ИФТТ РАН, Черноголовка

## Конференция проводится при поддержке



Российской академии наук,  
[ras.ru](http://ras.ru)



Института физики твердого тела  
Российской академии наук,  
[issp.ac.ru](http://issp.ac.ru)



Группы компаний НТ-МДТ Спектрум  
Инструментс, [ntmdt-si.ru](http://ntmdt-si.ru)



Интертек Трейдинг Корпорейшн  
[www.intertech-corp.ru](http://www.intertech-corp.ru)



Российского фонда фундаментальных  
исследований, [rfbr.ru](http://rfbr.ru)

## Расписание докладов

Вторник 27 октября 2020 г.

10.00-10.20	Открытие конференции
10.20-11.00	<u>В.С. Столяров</u> , В.В. Дремов, Р.А. Оганнисян, Н. Купчинская, С. Гребенчук, А.Г. Шишкин, А. Гребенко, И. Головчанский, Д. Родичев, А.А. Голубов «Визуализация сверхпроводящих неоднородностей в тонких пленках Nb вблизи T <sub>c</sub> »
11.00-11.40	<u>С.В. Дремов</u> , Р.А. Оганнисян, X. Palermo, N. Reyren, S. Collin, V. Cros and J. E. Villegas, В.С. Столяров «Исследование поведения двумерных скирмионов в магнитной многослойной структуре на сверхпроводнике методом диссипативной магнито-силовой микроскопии»
11.40-12.10	Coffee break
12.10-12.50	Ю.А. Бобров, В.А. Быков, <u>С.И. Леесмент</u> , В.В. Поляков «Управление внешними условиями в сканирующей зондовой микроскопии»
12.50-13.30	Ю.А. Бобров, В.А. Быков, С.И. Леесмент, <u>В.В. Поляков</u> «Современные подходы в сканирующей зондовой микроскопии»
13.30-14.30	Lunch
14.30-15.10	<u>О. Коплак</u> , Е. Озивская «Микроскопия ферромагнитных наночастиц на поверхности магниторезистивных структур»
15.10-15.50	<u>Д.В. Лебедев</u> , В.А. Школдин, И.С. Мухин, А.О. Голубок «Исследование процессов неупругого рассеяния электронов и излучения фотонов в туннельном зазоре сверхвысоковакуумного СТМ»
15.50-16.20	Coffee Break
16.20-17.00	Круглый стол

## Среда 28 октября 2020 г.

<b>10.00-10.40</b>	<u>С.Ю. Лукашенко</u> , М.В. Жуков, И.Д.Сапожников, А.О. Голубок « <b>Применение СЗМ для создания и исследования вертикальных водных наномостиков</b> »
<b>10.40-11.20</b>	<u>Л.А. Фомин</u> , И.В. Маликов, В.А. Березин, А.В. Черных, Б.А. Логинов, А.Б. Логинов « <b>Исследования структуры поверхности и электронно-транспортных свойств тонких эпитаксиальных пленок тугоплавких металлов</b> »
<b>11.20-11.50</b>	<b>Coffee Break</b>
<b>11.50-12.30</b>	<u>А.Н. Чайка</u> , O.V. Molodtsova, D.V. Potorochin, H.-C. Wu, B. Walls, K. Zhussupbekov, I.V. Shvets, В.Ю. Аристов « <b>Исследование атомной и электронной структуры нанополос графена на SiC/Si(001)</b> »
<b>12.30-13.10</b>	<u>А.С. Ксёиз</u> , С.И. Божко, А.М. Ионов, С.В. Чекмазов « <b>Формирование двумерных слоев Sb и Pb: ТФП моделирование</b> »
<b>13.10-14.30</b>	<b>Lunch</b>
<b>14.30-15.10</b>	О.В. Коплак, <u>Е.В. Дворецкая</u> , В. Л. Сидоров « <b>Доменная структура двухфазных микропроводов <math>\alpha</math>-Fe/PrDy-FeCo-B</b> »
<b>15.10-15.50</b>	<u>Е.И. Куницына</u> , О.В. Коплак, Р.Б. Моргунов « <b>Визуализация областей обращенной намагниченности на поверхности тонких пленок CoFeB в поле рассеяния наночастиц Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b> »
<b>15.50-16.20</b>	<b>Coffee Break</b>
<b>16.20-17.00</b>	<u>А.А. Жуков</u> « <b>Исследование свойств электронной системы полупроводниковых нановискеров и УНТ сканирующими методиками на базе атомно-силового микроскопа</b> »

Четверг 29 октября 2020 г.

## ZOOM формат

10.00-10.40	<u>А.Ю. Аладышкин</u> «Эмиссионные резонансы и квантово-размерные эффекты для электронов над поверхностью проводящих плёнок»
10.40-11.20	<u>В.Л. Миронов, Е.В. Скороходов</u> «Магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных тонкопленочных наноструктур»
11.20-11.50	<b>Coffee Break</b>
11.50-12.30	А. Вагов, S. Wolf, M. D. Croitoru, <u>А. А. Шаненко</u> , В. С. Столяров «Спонтанные паттерны вихревой материи в сверхпроводниках между типами I и II»
12.30-13.10	<u>А.В. Безрядин</u> «Микроволновая спектроскопия кубита Мейснера сильно взаимодействующего с вихрями Абрикосова»
13.10-14.30	<b>Lunch</b>
14.30-15.10	<u>Т.В. Павлова, В.М. Шевлюга, К.Н. Ельцов</u> «Заряженные дефекты на поверхности Si(100)-2×1-H и Si(100)-2×1-Cь»
15.10-15.50	<u>С.Ю. Лукашенко, М.В. Жуков, И.Д.Сапожников, А.О. Голубок</u> «Применение СЗМ для создания и исследования вертикальных водных наномостиков»
15.50-16.10	<b>Закрытие конференции и подведение итогов</b>

## СПИСОК ДОКЛАДЧИКОВ

Аладышкин Алексей Юрьевич	aladyshkin@ipmras.ru
Безрядин Алексей Витальевич	bezr1414@gmail.com
Дворецкая Елизавета Витальевна	dvoretskaya95@yandex.ru
Дрёмов Вячеслав Всеволодович	dremovs54@gmail.com
Жуков Алексей Алексеевич	azhukov@issp.ac.ru
Коплак Оксана Вячеславовна	o.koplak@gmail.com
Ксёнз Андрей Сергеевич	ksenzas@issp.ac.ru
Куницына Екатерина Игоревна	kunya_kat@mail.ru
Лебедев Денис Владимирович	denis.v.lebedev@gmail.com
Леесмент Станислав Игоревич	leesment@ntmdt-si.com
Лукашенко Станислав Юрьевич	lukashenko13@mail.ru
Миронов Виктор Леонидович	mironov@ipmras.ru
Павлова Татьяна Витальевна	pavlova@kapella.gpi.ru
Поляков Вячеслав Викторович	polyakov@ntmdt-si.com
Столяров Василий Сергеевич	vasiliy.stoliarov@gmail.com
Фомин Лев Александрович	remagnetization@gmail.com
Чайка Александр Николаевич	chaika@issp.ac.ru
Шаненко Аркадий Аркадьевич	arkadyshanenko@df.ufpe.br

## Визуализация сверхпроводящих неоднородностей в тонких пленках Nb вблизи $T_c$

В.С. Столяров, В.В. Дремов, Р.А. Оганнисян, Н. Купчинская, С. Гребенчук, А.Г. Шишкин, А. Гребенко, И. Головчанский, Д. Родичев, А.А. Голубов

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

Сверхпроводящие свойства тонких диффузных пленок претерпевают значительные изменения при приближении к температуре сверхпроводящего перехода. Методом магнитно-силовой микроскопии показано, что пленки ниобия могут разрушаться на сверхпроводящие островки при температурах на 3К ниже  $T_c = 9,2$  К под действием локального магнитного поля кантилевера. Это явление может сопровождаться трансформацией вихря Абрикосова в вихрь Джозефсона. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-72-10118.

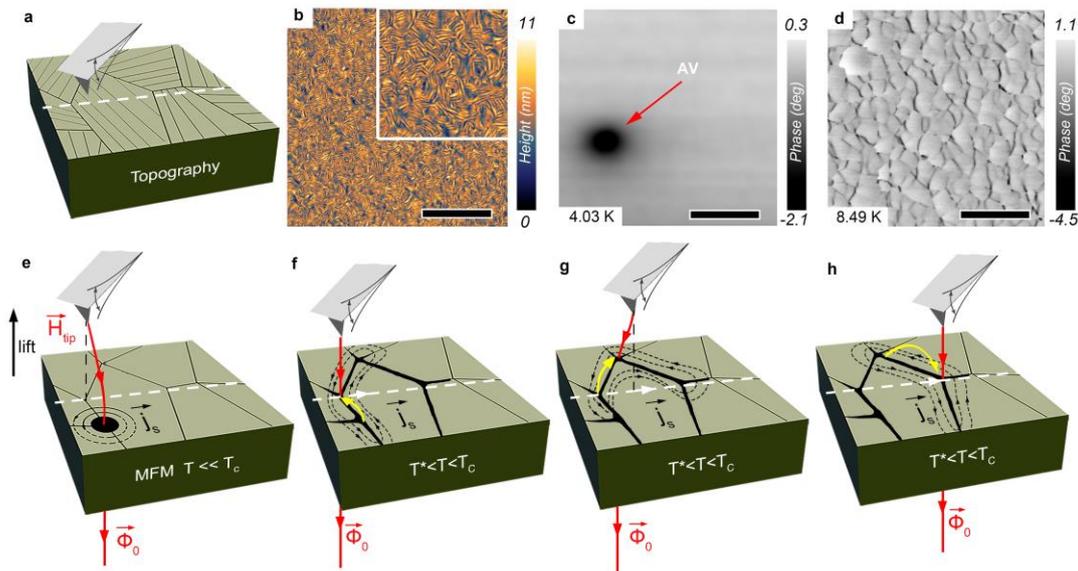


Рис. (а) – схематическое изображение зернистой структуры пленок ниобия. (b) – АСМ изображение высокого разрешения. (c) – МСМ изображение при температуре 4К с запинингованным вихрем Абрикосова. (d) – МСМ изображение при температуре 8.9К демонстрирующее структуру распределения линейных дефектов в пленке ниобия. (e – h) – схематическое изображение процесса образования МСМ картинки с линейными дефектами.

## Imaging of superconducting inhomogeneities in Nb thin films near $T_c$

V.S. Stolyarov, V.V. Dremov, R.A. Hovhannisyann, N. Kupchinskaya, S.Yu. Grebenchuk, A.G. Shishkin, A. Grebenko, I.A. Golovchansky, D. Roditchev, A.A. Golubov

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

Thin diffuse superconducting films properties undergo significant changes when approaching the superconducting transition temperature. Using magnetic force microscopy, we demonstrate that niobium films can break into superconducting islands even at temperatures 3K lower than  $T_c = 9.2$  K under action of the stray field of the cantilever. This phenomenon can be accompanied by Abrikosov to Josephson vortex transformation. This work was supported by the Russian Science Foundation grant №18-72-10118.

## **Исследование поведения двумерных скирмионов в магнитной многослойной структуре на сверхпроводнике методом диссипативной магнито-силовой микроскопии**

В.В. Дремов, Р.А. Оганнисян, X. Palermo, N. Reyren, S. Collin, V. Cros and J.E. Villegas, В.С. Столяров

*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Москва, Россия  
Unité Mixte de Physique, CNRS, Thales, Université Paris-Saclay, 91767, Palaiseau, France*

В докладе представлены результаты исследования образцов Ru/Co/Pt, которые являются стандартными многослойными структурами с интерфейсным взаимодействием Дзялошинского-Мория (DMI), допускающим возникновение скирмионов. Методом диссипативной магнито-силовой микроскопии определено влияние сверхпроводящего подслоя и обнаружено резонансное взаимодействие точечных объектов скирмионных образований с магнитным зондом. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-72-10118.

## **Investigation the behavior of 2D skyrmions in thin magnetic multilayer on superconductor by means of dissipative magnetic force microscopy**

V. V. Dremov, R.A. Hovhannisyanyan, X. Palermo, N. Reyren, S. Collin, V. Cros, J. E. Villegas and V. S. Stolyarov

*MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation  
Unité Mixte de Physique, CNRS, Thales, Université Paris-Saclay, 91767, Palaiseau, France*

In this report we present the results of the investigation Ru/Co/Pt thin film multilayers on superconductor. Such objects are proved to be the robust system for formation of magnetic skyrmions due to DMI interaction at the Co interfaces. By means of dissipative MFM the influence of the superconductor was determined and the existence of some kind of resonance interaction between the magnetic probe and skyrmion nanostructures was observed. This work was supported by the Russian Science Foundation grant №18-72-10118.

---

## Управление внешними условиями в сканирующей зондовой микроскопии

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

*НТ-МДТ Спектрум Инструментс, Зеленоград, Москва 124460, Россия.*

Одним из достоинств сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) является возможность проведения измерений с контролем внешних условий: температуры, магнитного и электрического полей, атмосферы в широких пределах. Это позволяет изучать динамику фазовых переходов материалов в микро- и нанометровом масштабе в режиме реального времени.

В докладе будут представлены результаты СЗМ-исследований, проведённых при различных внешних условиях на сегнетоэлектриках, кристаллах, двумерных структурах, тонких плёнках и биологических объектах.

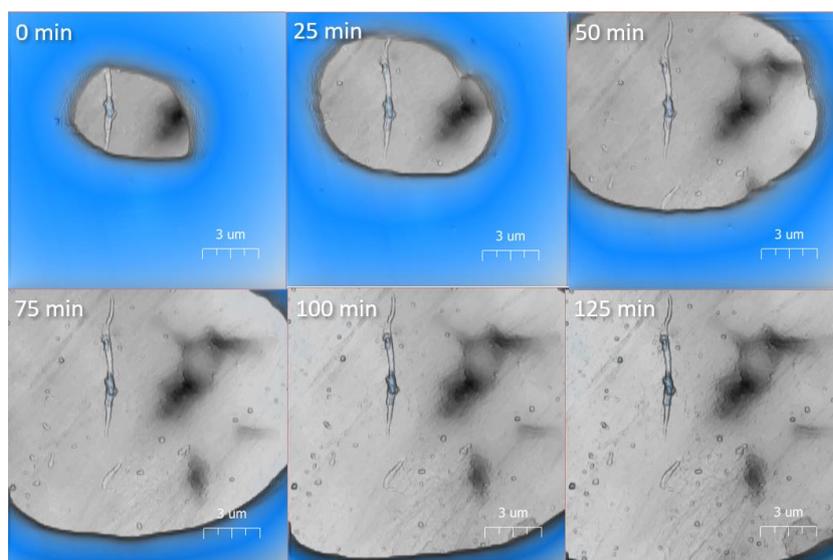


Рис. 1. (цветной в электронной версии) Процесс таянья льда под зондом атомно-силового микроскопа

Fig. 1 (color online) Ice melting dynamics under AFM tip

## Environmental control in scanning probe microscopy

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

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

One of the main advantages of scanning probe microscopy (SPM) is wide set of options for environmental control: temperature, electromagnetic field and atmosphere can be varied in broad range allowing in situ observation of material phase transitions at micrometer and nanometer scale.

During our report SPM studies of 2D, polymer, crystalline, biological, thin film and piezoelectric materials under variable environmental conditions will be presented.

## Микроскопия ферромагнитных наночастиц на поверхности магниторезистивных структур

О. Коплак<sup>1</sup>, Е. Озивская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИИХФ РАН, 142432, Черноголовка

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва

Разработка lab-on-chip датчиков для обнаружения магнитномеченных клеток, правильной оценки их количества и прогнозирования связи между биологическими объектами и планарным магнитным датчиком находится в центре внимания современной медицинской спинтроники. Проанализированы магнитные отклики тонкопленочных магниторезистивных структур CoFeNi/Cu/CoFeNi/Ru/CoFeNi/FeMn. Прямая визуализация области пленки, где происходит перемагничивание под действием поля рассеяния одиночной магнитной наночастицы, была выполнена с помощью магнитно-силовой микроскопии (MFM). Обнаружены области с обращенной намагниченностью магниторезистивной структуры под влиянием магнитного дипольного поля микробусин, функционализированных наночастицами Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и их массивов, нанесенных на поверхность. Продемонстрирована возможность извлечения фазового контраста из магнитного контраста благодаря калибровке магнитных и топологических фазовых портретов одиночных магнитных наночастиц и микробусин. Обоснована эффективность обнаружения микробусин, функционализированных наночастицами Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхности сенсора от типа и параметров магниторезистивной структуры.

Работа выполнена по теме государственного задания, № 0089-2019-0011.

## Microscopy of ferromagnetic nanoparticles on the surface of magnetoresistive structures

О. Koplak<sup>1</sup>, Е. Ozivskaya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Problems of Chemical Physics, 142432, Chernogolovka

<sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow

Development of lab-on-chip sensors for detection of magnetically labeled cells, correct estimation of the cells number and prediction of the coupling between labeled biology objects and planar magnetic sensor there is in focus of modern medical spintronics. The magnetic responses of CoFeNi/Cu/CoFeNi/Ru/CoFeNi/FeMn thin film magnetoresistive structures were analyzed. Direct visualization of the film area, which magnetization reversal is induced by scattering field of single magnetic nanoparticle was done by magnetic force microscopy (MFM). The magnetically reversed areas of magnetoresistive structure were revealed under magnetic dipole field of the microbeads functionalized Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and their arrays deposited on the surfaces. The possibility to extract AFM phase contrast from MFM phase contrast due to calibration of the magnetic and topological phase portraits of the single magnetic nanoparticles and microbeads was demonstrated. The effectiveness of the microbeads functionalized Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles detection on the sensor surface on type and parameters magnetoresistive structure was revile.

This work was carried out within the state assignment (№ 0089-2019-0011).

## Исследование процессов неупругого рассеяния электронов и излучения фотонов в туннельном зазоре сверхвысоковакуумного СТМ

Д.В. Лебедев, В.А. Школдин, И.С. Мухин, А.О. Голубок

*ИАП РАН, 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26.*

В представленной работе были исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта между Pt/Ir зондом сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) и различными золотыми наноструктурами на поверхности слюды в сверхвысоком вакууме. Исследуемые поверхности подвергались предварительному термическому отжигу и обработке в Ag плазме для удаления загрязнений и упорядочения структуры. В работе были получены и проанализированы кривые  $I(V)$ ,  $d^2I/dV^2(V)$ , где  $I$  и  $V$  – туннельный ток и приложенная между зондом и образцом разность электрических потенциалов, соответственно. Было показано, что на исследуемых ВАХ существует особенность (перегиб) в области прикладываемых напряжений 1.8 В. Кроме того, та же особенность наблюдается и на кривых, построенных в координатах Фаулера-Нордгейма. В данном случае особенность проявляется в виде дополнительных минимумов на кривой. Мы связываем наблюдаемые на ВАХ особенности с открытием дополнительного канала неупругого туннелирования электронов с эмиссией оптического излучения из области контакта. Данное предположение было подтверждено прямыми оптическими измерениями и визуализацией Au наноструктур методом СТМ-индуцированной люминесценции (СТМЛ). Проведенные исследования демонстрируют возможность непрямого детектирования оптического излучения из туннельного контакта СТМ за счет анализа ВАХ.

## Study of inelastic electron scattering and photon emission in the tunnel junction of ultrahigh-vacuum STM

D.V. Lebedev, V.A. Shkoldin, I.S. Mukhin, A.O. Golubok

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, 198095, Saint Petersburg, Rzhzsky Pr., 26*

In this work, we investigated current-voltage  $I(V)$  characteristics of the tunnel junction between the scanning tunneling microscopy (STM) Pt/Ir probe and different Au nanostructures on mica using ultra-high vacuum STM. To ensure cleanness and flatness of the Au surface we first performed optimization of the substrate annealing and Ar plasma treatment. The obtained technological parameters allow to drastically improve the reproducibility of  $I(V)$  measurements. We then analyze  $I(V)$ ,  $d^2I/dV^2(V)$  and Fowler-Nordheim plots and demonstrate presence of the features in the bias region near 1.8V in the form of peak and minimum, peak and anomalous extra minimum, respectively. The direct optical measurements confirm that the features on  $I(V)$  curves are associated with generation of photons from the STM probe-sample gap, governed by inelastic tunneling process. In addition, using the STM-induced luminescence (STML) technique, the studied gold surface was visualized. The proposed  $I(V)$  analysis approach can be used for indirect sensing and investigation of the light emission in the tunnel junction offering a powerful tool for the studies of the photonic sources with deeply subwavelength dimensions.

## Применение СЗМ для создания и исследования вертикальных водных наномостиков

С.Ю. Лукашенко, М.В. Жуков, И.Д. Сапожников, А.О. Голубок

*ИАП РАН, 190103, Санкт-Петербург*

Создание и исследование твердотельных микро- и наноконтактов является одним из основных направлений физики конденсированного состояния. В последнее время в связи с задачами разделения жидких смесей, анализом ДНК, а также в связи с развитием микро- и нанофлюидики большое внимание уделяется исследованию Ж/Ж контактов через микро- и наноканалы и нанопоры.

Известно, что в сильном электрическом поле  $\sim(10^5-10^6)$  В/м между двумя близкорасположенными поверхностями жидкости, образуется электрогидродинамически устойчивый цилиндрический водный мостик. В данной работе исследуется Ж/Ж нанокontakt в виде водного наномостика (ВНМ), создаваемого при помощи нанопипеток (НП) с внутренним диаметром отверстия  $\sim(50-100)$  нм. Используя технику СЗМ в режиме измерения ионных токов, протекающих через НП, мы демонстрируем образование стабильного контакта между заполненной жидкостью НП и свободной поверхностью жидкости. В работе представлены вольтамперные характеристики ВНМ, исследована зависимость  $I(z)$  и  $I(t)$ , измерено "время жизни" ВНМ, приведена оценка размера ВНМ, исследован отклик ВНМ на воздействие импульсного напряжения.

## The use of SPM to create and study vertical water nanobridges

S.Yu. Lukashenko, M.V. Zhukov, I.D. Sapozhnikov, A.O. Golubok.

*IAI RAS, 190103, St. Petersburg*

The creation and study of solid micro- and nanocontacts is one of the main fields of condensed matter physics. Recently, due to problems of separation of liquid mixtures, DNA analysis and development of micro- and nanofluidics great attention is given to the liquid-liquid contacts (L/L) via micro- and nanochannels and nanopores.

Among (L/L) contacts should be noted contacts that appear with the formation of water bridges. Electrohydrodynamically stable aqueous cylindrical bridge forms in a strong electric field  $\sim(10^5-10^6)$  V/m, arising between two closely spaced surfaces of the liquid. In this work, the L/L nanocontact in a liquid nanobridge (LNB) form was created using nanopipettes (NP) with an inner bore diameter  $\sim(50-100)$  nm. Using the technique of SPM with the ionic current measurement mode, we demonstrate the formation of the stable contact between the NP filled with the liquid and the free liquid surface. The work presents current-voltage characteristics of LNB,  $I(z)$  and  $I(t)$  dependences of LNB, "lifetime" of LNB, estimation of LNB size, response on the application of pulse voltage.

28 ОКТЯБРЯ

СРЕДА

## **Исследования структуры поверхности и электронно-транспортных свойств тонких эпитаксиальных пленок тугоплавких металлов**

Л.А. Фомин<sup>1</sup>, И.В. Маликов<sup>1</sup>, В.А. Березин<sup>1</sup>, А.В. Черных<sup>1</sup>, Б.А. Логинов<sup>2</sup>,

А.Б. Логинов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*ИИТМ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.6*

<sup>2</sup>*НИУ МИЭТ, АО Завод ПРОТОН, 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1*

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

В настоящее время традиционно применяемые в микроэлектронике материалы для создания межсоединений и шин металлизации, такие как алюминий и медь, с уменьшением размеров элементов и возрастанием плотности тока в них перестают удовлетворять современным требованиям. Одним из методов решения указанной проблемы является использование тугоплавких металлов. Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) исследована поверхность тонких эпитаксиальных пленок тугоплавких металлов W, Mo, Ta. Пленки выращивались методом импульсного лазерного осаждения в сверхвысоком вакууме на подложках R- и A- плоскостей монокристаллического сапфира. Было найдено, что СТМ и АСМ сканы одних и тех же пленок различаются по своим статистическим свойствам, таким как среднеквадратичная шероховатость, корреляционная длина и фрактальная размерность. Несмотря на то, что СТМ дает большее разрешение, АСМ методика более адекватно описывает поверхность пленок. Были измерены зависимости удельной проводимости пленок от толщины и температуры в диапазоне от комнатной до жидкого гелия. Экспериментальные результаты показали справедливость квантовой модели влияния морфологии поверхности на сопротивление при малой толщине пленок. При уменьшении толщины пленок до нескольких нм при низких температурах наблюдались эффекты слабой локализации.

### **Investigation of the surface structure and electron transport properties of thin epitaxial films of refractory metals**

L.A. Fomin<sup>1</sup>, I.V. Malikov<sup>1</sup>, V.A. Berezin<sup>1</sup>, A.V. Chernykh<sup>1</sup>, B.A. Loginov<sup>2</sup>, A.B. Loginov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*IMT RAS, 142432, Chernogolovka, Moscow region., Acad. Ossypian str, 6*

<sup>2</sup>*MIET, JSC Zavod Proton, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina 1*

<sup>3</sup>*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie gory, 1*

Currently, materials traditionally used in microelectronics for creating interconnections and metallization buses, such as aluminum and copper, with a decrease in the size of elements and an increase in the current density in them cease to meet modern requirements. One of the methods for solving this problem is the use of refractory metals. The surface of thin epitaxial films of refractory metals W, Mo, Ta has been investigated by atomic force microscopy (AFM) and scanning tunneling microscopy (STM). The films were grown by pulsed laser deposition in ultrahigh vacuum on single crystal sapphire substrates of R and A planes. It was found that STM and AFM scans of the same films differ in their statistical properties, such as root-mean-square roughness, correlation length, and fractal dimension. Despite the fact that STM gives a higher resolution, the AFM technique more adequately describes the surface of the films. The dependences of the conductivity of the films on the thickness and temperature were measured in the range from room temperature to liquid helium. The experimental results have shown the validity of the quantum model of the effect of surface morphology on resistance at small film thicknesses. As the film thickness decreased to several nm at low temperatures, weak localization effects were observed.

## Исследование атомной и электронной структуры нанополос графена на SiC/Si(001)

А.Н. Чайка<sup>1</sup>, O.V. Molodtsova<sup>2</sup>, D.V. Potorochin<sup>2,3</sup>, H.-C. Wu<sup>4,5</sup>, B. Walls<sup>5</sup>,  
K. Zhussupbekov<sup>5</sup>, I.V. Shvets<sup>5</sup>, В.Ю. Аристов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики твердого тела РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2.

<sup>2</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, D-22607, Hamburg, Germany

<sup>3</sup>ITMO University, Kronverksky prospekt 49, 197101 Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>4</sup>School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, People's Republic of China

<sup>5</sup>CRANN, School of Physics, Trinity College Dublin

Упорядоченные системы нанополос графена представляют интерес для фундаментальных исследований и технологических применений, так как границы доменов могут отражать электроны в широком диапазоне энергий, а изгиб графеновых слоев может приводить к появлению спин-поляризованных электронных состояний. В докладе представлены исследования атомной и электронной структуры нанополос графена, синтезированных в сверхвысоком вакууме на тонких (1-2 мкм) пленках кубического карбида кремния ( $\beta$ -SiC), выращенных на стандартных пластинах кремния Si(001). Исследования электронной структуры нанополос графена на  $\beta$ -SiC/Si(001), выполненные методами фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, демонстрируют наличие локальной энергетической щели в местах наибольшего изгиба графенового слоя и существенное изменение плотности заполненных электронных состояний вблизи границ нанодоменов.

Работа выполнена в рамках госзадания при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00489).

## Investigation of the atomic and electronic structure of self-aligned graphene nanoribbons on SiC/Si(001)

А.Н. Чайка<sup>1</sup>, O.V. Molodtsova<sup>2</sup>, D.V. Potorochin<sup>2,3</sup>, H.-C. Wu<sup>4,5</sup>, B. Walls<sup>5</sup>,  
K. Zhussupbekov<sup>5</sup>, I.V. Shvets<sup>5</sup>, V.Yu. Aristov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Moscow district, 2 Academician Ossipyan str., 142432, Russia

<sup>2</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, D-22607, Hamburg, Germany

<sup>3</sup>ITMO University, Kronverksky prospekt 49, 197101 Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>4</sup>School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, People's Republic of China

<sup>5</sup>CRANN, School of Physics, Trinity College Dublin

Self-aligned graphene nanoribbons are highly appealing for fundamental research and technological applications because the nanodomain boundaries can reflect electrons in a wide energy range while graphene layer bending can induce spin-polarized electron states. We report high-resolution studies of the atomic and electronic structure of graphene nanoribbons synthesized in ultra-high vacuum on thin films of cubic silicon carbide ( $\beta$ -SiC) grown on Si(001) wafers. Investigations of the electronic structure of graphene synthesized on  $\beta$ -SiC/Si(001) conducted using angle resolved photoelectron spectroscopy and scanning tunneling microscopy and spectroscopy demonstrate substantial modification of the local electronic structure near the nanodomain boundaries.

This work was carried out within the state task of ISSP RAS and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 20-02-00489).

## **Формирование двумерных слоев Sb и Pb: ТФП моделирование**

А.С. Ксёنز, С.И. Божко, А.М. Ионов, С.В. Чекмазов

*ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2*

В настоящее время вопрос влияния электронной системы на формирование кристаллической структуры обычно не затрагивается. Однако еще Пайерлс задался вопросом: почему Sb и Bi не имеют простую кубическую решетку, ответом на который стало подробное рассмотрение влияния электронной системы на кристаллическую структуру полуметаллов. В нашей работе продемонстрировано, как электронная подсистема может оказывать влияние на генерацию двумерных дефектов в Sb(111) и Pb(111), которые, в свою очередь, приводят к формированию двумерных слоев. В случае Pb влияние электронной системы реализуется в рамках электронного роста, что приводит к образованию слоистых наностроек. В то же время нарушение ковалентной связи в Sb(111) возмущает электронную систему, вследствие чего образуется солитон. Полученные результаты позволяют по-новому взглянуть на роль электронной системы в формировании кристаллической структуры и генерации дефектов в нанобъектах.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФТТ РАН.

## **Formation of two-dimensional Sb and Pb layers: DFT simulation**

A.S. Ksenz, S.I. Bozhko, A.M. Ionov, S.V. Chekmazov

*ISSP RAS, Chernogolovka, Moscow District, 2 Academician Ossipyan str., 142432*

The influence of the electron system on formation of crystalline structures generally is not studied in detail. However, Peierls questioned why Sb and Bi crystals do not have simple cubic structure that led to extensive study of the influence of electron system on crystal structure of semimetals. In this report, the significant influence of the electron system on defect generation in 2D Sb(111) and Pb (111) layers is demonstrated. In Pb nanostructures, the influence of the electron system leads to electronic growth and formation of stratified nanoislands with twin boundaries. At the same time, breaking covalent bonds upon cleavage of Sb(111) disturbs the electronic system and leads to soliton formation. The obtained data allow us to take a fresh look on the influence of electron system on formation of crystal structures and generation of defects in nanoobjects.

This work was carried out within the state task of the Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences.

28 ОКТЯБРЯ

СРЕДА

## Доменная структура двухфазных микропроводов $\alpha$ -Fe/PrDy-FeCo-B

О.В. Коплак, Е.В. Дворецкая, В. Л. Сидоров

*ИПХФ РАН, 142432, Черноголовка*

Ферромагнитные микропровода привлекают внимание специалистов благодаря новым фундаментальным явлениям и широкому практическому применению. В работе будет представлен анализ методом магнито-силовой микроскопии нового типа микропроводов, содержащих ядро  $\alpha$ -Fe и оболочку (PrDy)(FeCo)B. Бистабильность микропроводов  $\alpha$ -Fe/PrDy-FeCo-B связана с однодоменным состоянием внутреннего ядра  $\alpha$ -Fe, выявленным с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Мы непосредственно определяем размеры доменов и визуализируем перемагничивание в ядре и оболочке микропроводов. Редкоземельная аморфная оболочка микропровода PrDy-FeCo-B была отсканированная в магнитном поле различной напряженности. Темные области, вытянутые вдоль оси микропровода, соответствуют ядрам перемагничивания, подтверждающим радиальную намагниченность редкоземельной оболочки микропровода. Изображения MFM соответствуют реальному распределению намагниченности в ферромагнитном ядре. Обнаружена взаимосвязь объемной интегральной намагниченности, определенной SQUID-магнитометром, с распределением поверхностной намагниченности, определенной с помощью магнитооптического эффекта Керра (МОКЕ) и MFM.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (20-32-70025, «Стабильность»).

## Domain structure of two-phase $\alpha$ -Fe/PrDy-FeCo-B microwires

O.V. Koplak, E.V. Dvoretzkaya, V. L. Sidorov

*Institute of Problems of Chemical Physics, 142432 Chernogolovka*

Ferromagnetic microwires attract attention of specialists due to new fundamental phenomena and wide practical application. We will present MFM analysis of new type of microwires containing  $\alpha$ -Fe core and (PrDy)(FeCo)B shell. Bistability of the  $\alpha$ -Fe/PrDy-FeCo-B microwires relates to single domain state of the  $\alpha$ -Fe inner core revealed by scanning electron microscopy (SEM). We directly determine domains sizes and visualize magnetization reversal in the core and shell of microwires. Rare-earth amorphous PrDy-FeCo-B shell of the microwire scanned under magnetic field of different intensity. The dark areas elongated along the axis of microwire correspond to the magnetization reversal nuclei verifying radial magnetization of the rare-earth shell of the microwire. MFM images correspond to real distribution of magnetization in the ferromagnetic core. Interrelation between volume integral magnetization, determined by SQUID magnetometer, with distribution of surface magnetization determined by magneto-optical Kerr effect (MOKE) and MFM was found.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 20-32-70025, "Stability").

## **Визуализация областей обращенной намагниченности на поверхности тонких пленок CoFeB в поле рассеяния наночастиц Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**

Е.И. Куницына, О.В. Коплак, Р.Б. Моргунов

*Институт проблем химической физики, 142432 Черноголовка*

Перспективным направлением регистрации и отбора магнитно-меченных биологических объектов является технология, основанная на датчиках гигантского магнитосопротивления (GMR) благодаря их высокой точности. Магниторезистивные датчики основаны на перемагничивании тонких ферромагнитных слоев под воздействием дипольного магнитного поля магнитной частицы. Наночастицы Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> были осаждены на поверхности ультратонкой пленки CoFeB и гетероструктуры CoFeB/Ta/CoFeB, с целью обнаружения локального перемагничивания структур за счет поля рассеяния, создаваемого одной частицей или кластером частиц. Сравнение изображений, полученных с помощью атомно-силового и магнито-силового микроскопов, и вычитание соответствующих фазовых контрастов позволяет визуализировать намагниченность пленки, на которую влияют частицы. Продемонстрирована оценка количества частиц по магнитному отклику гетероструктуры CoFeB. Получены теоретическая оценка и OOMMF-моделирование диаметра области пленки CoFeB, намагниченность которой меняется на противоположную под действием дипольного магнитного поля, создаваемого частицей Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Они находятся в хорошем согласии с областью, наблюдаемой экспериментально. Результаты будут полезны для разработки сенсоров "лаборатория на кристалле" магнитно-меченых ячеек. Работа выполнена в рамках государственного задания (AAAA 0089-2019-0011) для ИПХФ РАН.

## **Visualization of reversed magnetization areas on the surface of the CoFeB thin films under stray field of Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles**

E.I. Kunitsyna, O.V. Koplak, R.B. Morgunov

*Institute of Problems of Chemical Physics, 142432 Chernogolovka*

A promising direction of registration and selection of magnetically labelled biological objects is the technology based on of sensors of giant magnetoresistance (GMR), due to the accuracy of the sensors. Magnetoresistive sensors are based on the magnetization reversal of thin ferromagnetic layers under the influence of a dipole magnetic field of a magnetic particle. The Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles have been deposited on the surfaces of ultra-thin CoFeB film and CoFeB/Ta/CoFeB heterostructure to be detected of magnetization reversal of these thin film structures caused by the stray field generated by one particle or a cluster of particles. Comparison between the Atomic Force and Magnetic Force Microscope images and subtraction of corresponding phase contrasts allows visualization of the film magnetization affected by the particles. Estimation of particles number by magnetic response of the CoFeB heterostructure is demonstrated. Theoretical estimation and OOMMF modeling of the diameter of the CoFeB film area, which magnetization is reversed under the dipolar magnetic field created by the Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particle, are obtained. They are found to be in good agreements with the area observed experimentally. The results will be useful for the development of lab-on-chip sensors of magnetically labeled cells. This work was carried out within the state assignment (AAAA 0089-2019-0011) for the IPCP RAS.

28 ОКТЯБРЯ

СРЕДА

## **Исследование свойств электронной системы полупроводниковых нановискеров и углеродных нанотрубок сканирующими методиками на базе атомно-силового микроскопа**

А.А. Жуков

*ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2*

Детально исследованы локальные особенности электронных систем углеродных нанотрубок (УНТ) и полупроводниковых нановискеров InN и InAs при помощи различных зондовых методик на основе атомно-силового микроскопа. В УНТ продемонстрировано наличие полупроводниковой щели в спектре, применяя только измерение топографии поверхности. Показана высокая пространственная разрешающая способность такого подхода. Методикой измерения магнитотранспорта в присутствии заряженного зонда атомно-силового микроскопа продемонстрировано как существенное влияние пространственного распределения неоднородностей в нановискере на магнитотранспорт, так и наличие устойчивых траекторий тока в нановискерах InN. Подробно обсуждается возможность наблюдения универсальных флуктуаций проводимости в квазиодномерных системах. Работа выполнена в рамках государственного задания для ИФТТ РАН, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 19-29-03021мк.

## **Investigations of features of electronic systems of nanowhiskers and carbon nanotubes using scanning probe techniques based on atomic force microscope**

A.A. Zhukov

*ISSP RAS, Chernogolovka, Moscow District, 2 Academician Ossipyan str., 142432*

Local peculiarities of electronic systems structures of semiconductor nanowhiskers InAs and InN and carbon nanotubes (CNT) have been investigated by set of probe techniques based on atomic force microscope. In CNT we demonstrate the presence and of the semiconducting gap just measuring topography only. The high lateral resolution of such technique was demonstrated. Using scanning gate microscopy technique, we demonstrate the essential role of the spatial distribution of the defects on the magnetotransport in nanowhiskers and stable current trajectories in InN structures. The observation of the universal conductance fluctuations in quasi-one dimensional structures is discussed in details. This work was carried out within the state assignment for the ISSP RAS and was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 19-29-03021mk).

28 ОКТЯБРЯ

СРЕДА

## Эмиссионные резонансы и квантово-размерные эффекты для электронов над поверхностью проводящих плёнок

А.Ю. Аладышкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, 603087, Нижний Новгород, ул. Академическая, д.7.

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д.23.

В докладе будет представлен обзор работ по исследованию квазистационарных электронных состояний над поверхностью металлов и полупроводников. Такие состояния соответствуют локализации электрона в потенциальной яме, одна из стенок которой образована поверхностью образца, а другая – неоднородным электрическим потенциалом сил изображения или потенциалом внешних источников. Наличие таких состояний приводит к осцилляциям туннельной проводимости в зависимости от разности потенциалов между иглой сканирующего туннельного микроскопия и образцом (так называемые осцилляции Гундлаха) на пороге появления холодной полевой эмиссии. Анализ особенностей туннельных спектров позволяет получить, например, локальную работу выхода и другие параметры.

Оригинальная часть доклада будет посвящена изучению дифференциальной проводимости и эмиссионных резонансов для тонких Pb плёнок методом низкотемпературной сканирующей туннельной спектроскопии в диапазоне напряжений  $V$  от 0.1 до 10 В в двух режимах: заданной высоты ( $z$ ) и заданного туннельного тока ( $I$ ). Было обнаружено, что при  $V \geq 4.5$  вольт наблюдаются пики  $dI/dV$  и  $dz/dV$ , связанные с формированием квантованных электронных состояний в потенциале электростатического изображения, модифицированного внешним электрическим полем. При  $V \leq 4.5$  вольт осцилляторное поведение  $dI/dV$  и  $dz/dV$  связано с формированием стоячих электронных волн в Pb пленке, при этом положение таких резонансных пиков на оси энергий определяется локальной толщиной слоя в точке измерения и не зависит от высоты иглы. Исследование особенностей туннельных спектров в широком диапазоне напряжения позволяет экспериментально исследовать параметры зонного спектра, в частности, оценить энергии, соответствующие дну и потолку зоны проводимости в Pb плёнках, и их пространственные вариации. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-02-00528).

## Emission resonances and quantum size effects for electrons

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

<sup>1</sup> Institute for Physics of Microstructures RAS, 603087, Nizhny Novgorod, Academicheskaya str., 7.

<sup>2</sup> N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin avenue, 23.

This talk is devoted to an overview of recent studies of quasi-stationary electronic states above the surface of metals and semiconductors. These states correspond to the localization of an electron in the potential well, formed by the surface of the sample and by an inhomogeneous electric potential induced by an image source or external sources. The presence of such the states leads to the oscillations of the differential tunneling conductivity as a function of the bias potential between the tip of scanning tunneling microscopy and the sample (the so-called Gundlach oscillations) at the threshold of the appearance of cold electronic emission. The analysis of the features of the tunneling spectra allows one to obtain, for example, the local work function and other parameters.

The original part of the talk is devoted to the experimental investigations of differential tunneling conductivity and emission resonances for thin Pb films by the method of low-temperature scanning tunneling spectroscopy in the voltage range  $V$  from 0.1 to 10 volt in two regimes: for a given height ( $z$ ) and for a given tunneling current ( $I$ ). It has been found out that at  $V \geq 4.5$  volt, both dependences  $dI/dV$  and  $dz/dV$  have peaks at the same energies, what can be associated with the formation of quantized electronic states in the image electrostatic potential modified by an external electric field. At  $V \leq 4.5$  volt, the oscillatory behavior of  $dI/dV$  and  $dz/dV$  is associated with the formation of standing electron waves in the Pb film, and the position of such resonance peaks on the energy axis is mainly determined by the local thickness of the Pb film at the measurement point and it does not depend on the tip height. The study of the features of tunneling spectra in a wide voltage range allows us to investigate experimentally the parameters of the band spectrum, in particular, to estimate the energies corresponding to the bottom and top of the conduction band in Pb films and their spatial variations. This work was financially supported by the Russian Fund for Basic Research (project 19-02-00528).

---

## **Магнитно-резонансная силовая спектроскопия ферромагнитных тонкопленочных наноструктур**

В.Л.Миронов, Е.В.Скороходов

*ИФМ РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105*

В докладе приводятся результаты исследований 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 с перпендикулярной осевой анизотропией.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (проект 18-02-00247)

## **Magnetic resonance force spectroscopy of ferromagnetic thin-film nanostructures**

V.L. Mironov, E.V. Skorohodov

*IPM RAS, 60950, Nizhny Novgorod, GSP-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 Russian Foundation for Basic Research (project # 18-02-00247).

---

## Спонтанные паттерны вихревой материи в сверхпроводниках между типами I и II

A. Вагов<sup>1,2</sup>, S. Wolf<sup>3</sup>, M. D. Croitoru<sup>1</sup>, A. A. Шаненко<sup>4</sup>, В. С. Столяров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Theoretical Physics III, University of Bayreuth, Bayreuth 95440, Germany*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700 Москва, Россия*

<sup>3</sup>*School of Physics, University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia*

<sup>4</sup>*Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE 50740-560, Brazil*

Эксперименты с сверхпроводниками между стандартными типами I и II выявили экзотические паттерны магнитного потока конденсата, в которых мейсснеровские домены сосуществуют с островками вихревой решетки, а также с вихревыми кластерами и цепочками. До сих пор не была представлена исчерпывающая теория таких конфигураций. Мы решаем эту давнюю фундаментальную проблему, развивая подход, который сочетает в себе расширение теории возмущений микроскопической теории со статистическим моделированием и который не требует предварительного предположения о распределении вихрей. Наше исследование предлагает наиболее полную картину кроссовера между типами сверхпроводимости I и II, доступными в настоящий момент.

## Spontaneous patterns of vortex matter in superconductors between types I and II

A. Vagov<sup>1,2</sup>, S. Wolf<sup>3</sup>, M. D. Croitoru<sup>1</sup>, A. A. Shanenko<sup>4</sup>, and V. S. Stolyarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Theoretical Physics III, University of Bayreuth, Bayreuth 95440, Germany*

<sup>2</sup>*MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russian Federation*

<sup>3</sup>*School of Physics, University of Melbourne, Parkville, VIC 3010, Australia*

<sup>4</sup>*Departamento de Física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE 50740-560, Brazil*

Experiments with the crossover superconductors between standard types I and II revealed exotic magnetic flux patterns where Meissner domains coexist with islands of the vortex lattice as well as with vortex clusters and chains. Until now a comprehensive theory for such configurations has not been presented. We solve this old-standing fundamental problem by developing an approach which combines the perturbation expansion of the microscopic theory with statistical simulations and which requires no prior assumption on the vortex distribution. Our study offers the most complete picture of the interchange of the superconductivity types available so far. The mixed state in this regime reveals a rich manifold of exotic configurations, which reproduce available experimental results.

## **Микроволновая спектроскопия кубита Мейснера сильно взаимодействующего с вихрями Абрикосова**

А.В. Безрядин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Университет штата Иллинойс, 61801 Урбана-Шампайн, США*

<sup>2</sup> *В настоящее время на сабатикиал в Московском физико-техническом институте, Долгопрудный, 141700 Москва, Россия*

В докладе будут продемонстрированы результаты по разработке и тестированию новой модификации кубитов типа транзмон, названного Мейснерон. Кубит контролируется мейснеровскими токами в электродах и позволяет осуществлять сильную связь с вихрями Абрикосова. Такой режим используется для изучения и спектроскопии электронных состояний локализованных в корах вихрей. В отсутствие вихрей, наилучшее измеренное время релаксации ( $T_1$ ) было порядка 50 мкс, а время сбоя фаз ( $T_2$ ) составило около 40 мкс. Измерения в магнитном поле показали, что если кубит связан, например, с  $\sim 4$  вихрями, времена релаксации и сбоя фазы становятся меньше, порядка 10 мкс. Тем не менее, такие времена достаточны для спектроскопии кора вихря. Релаксация данных кубитов анализируется в рамках квантовой теории диссипации Калдейры-Леггетта.

## **Microwave Spectroscopy of Meissneron-transmon qubit strongly coupled to Abrikosov vortices**

A. Bezryadin<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> *On sabbatical leave at Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141700 Moscow, Russia*

We present a type of transmon split-junction qubit which can be controlled by Meissner screening currents flowing in the adjacent superconducting film electrodes. The design of this qubit allows coupling to Abrikosov vortices in cases when the qubit serves as a tool to study the core electronic states. Without vortices, the best detected relaxation time ( $T_1$ ) was of the order of 50  $\mu\text{s}$  and the dephasing time ( $T_2$ ) about 40  $\mu\text{s}$ . We present a quantitative analysis of the radiation-free relaxation in the qubit strongly coupled to vortices. If the qubit is coupled to  $\sim 4$  vortices the relaxation and decoherence times become lower, of the order of 10  $\mu\text{s}$ . This is still sufficiently long times for the spectroscopy of the vortex core. The relaxation of the qubit is analyzed in terms of the Caldeira-Leggett quantum dissipation theory.

## **Заряженные дефекты на поверхности Si(100)-2×1-H и Si(100)-2×1-Cl**

Т.В. Павлова, В.М. Шевлюга, К.Н. Ельцов

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

Оборванные связи кремния на поверхности Si(100)-2×1, покрытой водородом или хлором, представляют собой одноатомные квантовые точки, зарядовым состоянием которых можно управлять с использованием СТМ. Оборванная связь атома кремния на месте удаленного атома водорода на поверхности Si(100)-2×1-H является наиболее изученной квантовой точкой. Нами теоретически показано, что не только при удалении, но и при внедрении адатома водорода в Si(100)-2×1-H возникают оборванные связи кремния, которые могут быть заряжены. Такие состояния наблюдались ранее в ряде экспериментальных работ, но не были правильно идентифицированы. Для хлорированной поверхности Si(100)-2×1, экспериментально показано создание оборванных связей как при удалении, так и при внедрении отдельных атомов Cl. Продемонстрировано контролируемое переключение заряда на таких оборванных связях с использованием СТМ.

## **Charged defects on Si(100)-2×1-H and Si(100)-2×1-Cl surfaces**

T.V. Pavlova, V.M. Shevlyuga, K.N. Eltsov

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

Silicon dangling bonds on the Si(100)-2×1 surface covered with hydrogen or chlorine can work as single-atom quantum dots, which charge states can be controlled using STM. The most studied quantum dot is the dangling bond of the silicon atom at the site of the removed hydrogen atom on the Si(100)-2×1-H surface. We have theoretically shown that not only the removal but also the insertion of a hydrogen adatom into Si(100)-2×1-H leads to the creation of the silicon dangling bond, which can be charged. Such states were observed earlier in several experimental works. For a chlorinated Si(100)-2×1 surface, the creation of dangling bonds has been shown experimentally both upon removal and insertion of individual Cl atoms. The controlled switching of the charge on such dangling bonds is demonstrated using STM.