

На правах рукописи

**Фокин Денис Александрович**

**СТМ/СТС исследования квантово-размерных  
эффектов в островковых пленках РЬ на  
поверхностях Si**

**01.04.07 — Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук**

Черноголовка — 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте физики твердого тела РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,  
Сергей Иванович Божко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Валерий Владимирович Рязанов

доктор физико-математических наук,  
Константин Николаевич Ельцов

Ведущая организация:

Институт проблем технологии  
микроэлектроники  
и особочистых материалов РАН

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.100.01. в ИФТТ РАН по  
адресу: 142432, Черноголовка, Московская область, Институтская ул.  
д.2, 142432

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН.

Автореферат разослан " \_\_ " \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук

В.Н.Зверев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Поверхности кремния нашли широкое применение в области микроэлектроники, дальнейшее развитие которой в субмикронном и нано диапазонах тесно связано с исследованием свойств таких поверхностей на атомарном уровне. В то же время, когда идет речь об исследовании систем типа “тонкая металлическая пленка на полупроводниковой подложке”, возникает естественный научный интерес, связанный с тем, что такого рода системы открывают большую свободу действий для исследований их электронной структуры, магнитных и транспортных свойств. Одним из наиболее часто используемым материалом подложек является кремний, а это значит, что знание об атомной структуре чистой поверхности кремния очень важно.

С другой стороны, с середины 80-х годов начались активные исследования высокотемпературных сверхпроводников, которые открывают очень широкие возможности технологического применения сверхпроводящих материалов.

Таким образом, система “сверхпроводник на полупроводниковой подложке” представляется одной из наиболее перспективных, как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для различного рода приложений.

Однако, на пути к использованию этих перспективных материалов имеется много проблем, одной из которых остается отсутствие теории, объясняющей сам феномен высокотемпературной сверхпроводимости. Именно поэтому, в настоящее время остро стоит проблема создания такой теории. В этой связи, исследования сверхпроводящих свойств металлов в различных условиях имеют огромную значимость, поскольку позволяют приблизиться к пониманию, в частности, высокотемпературной сверхпроводимости.

Однако, несмотря на огромный интерес к таким системам, на момент начала работы над диссертацией, экспериментальных работ по изучению сверхпроводящих свойств отдельных объектов в режиме сильного размерного квантования не было. Это можно легко объяснить: в этом режиме, в силу полного

проникновения магнитного поля в образец, применение методик, чувствительных к магнитному отклику системы (таких как, например, СКВИД, магнитно-силовая микроскопия, холловская магнитометрия и т.д.) становится невозможным.

### **Цель работы.**

Цель диссертации состоит в экспериментальном исследовании влияния размеров островков Pb на их сверхпроводящие свойства методами сканирующей туннельной микроскопии/спектроскопии (СТМ/СТС). Для достижения этой цели в рамках данной работы были решены следующие экспериментальные и методические задачи:

1. создание экспериментальной установки для изучения квантового размерного эффекта (КРЭ) методами СТМ/СТС в условиях сверхвысокого вакуума, сверхнизких температур и в магнитных полях с возможностью подготовки поверхности образца *in-situ*,
2. отработка методики подготовки упорядоченных атомно-чистых поверхностей Si(111) и вицинальных к ним,
3. изучение роста островковых пленок Pb на поверхностях Si(111) и, в том числе, вицинальных к ним,
4. исследование сверхпроводящих свойств нано-островков Pb на поверхности Si(111) в режиме сильного размерного квантования.

### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту**

1. Методами СТМ и ДМЭ исследована атомная структура поверхности Si(557). Обнаружено, что формирование той или иной структуры поверхности обусловлено различиями в процедуре подготовке поверхности.
2. Методами СТМ исследован механизм роста островковых пленок на поверхностях Si(111) и Si(557). Было обнаружено, что рост островков Pb на поверхности Si(111)

имеет анизотропный характер, а островки, получающиеся в результате роста, обладают интересными свойствами, в частности, ограничены со временем (старение). Рост свинца на вицинальной поверхности Si(557) сопровождается образованием слоистой структуры, что объясняется с позиций модели “Электронного роста”. При этом кристаллографическая плоскость Pb(111) наклонена на  $1^\circ$  относительно плоскости Si(111).

3. Методами СТМ/СТС исследованы сверхпроводящие свойства островка Pb с латеральными размерами порядка  $\xi$ , много меньшими  $\lambda_{eff}$  в магнитном поле и показано, что в исследуемом случае реализуются только три состояния: без вихря, с одним вихрем в центре образца и нормальное состояние.

#### **Научная новизна.**

- Впервые предложено объяснение наличия различных периодов расположения ступеней на вицинальной поверхности Si(557)
- Впервые экспериментально обнаружено формирование слоистой структуры островков, которая формируется в ходе роста островковых пленок Pb на вицинальных поверхностях Si(557)
- Впервые осуществлено экспериментальное наблюдение методами СТМ/СТМ перехода островка Pb на поверхности Si(111) из безвихревого состояния в состояние с одним вихрем и последующего перехода в нормальное состояние.

#### **Теоретическая и практическая ценность.**

Изучена структура вицинальной поверхности Si(557) и показано, что в зависимости от используемой процедуры температурной обработки, поверхности может содержать фасетки с различной локальной кристаллографической ориентацией: (557), (223), (7 7 10) и (111), чем и объясняются разногласия в имеющихся литературных данных.

Обнаруженная слоистая структура островков Pb на вивинальной поверхности Si(557) объяснена с позиций модели электронного роста. Таким образом, показано, что особенности роста трехмерных островков определяются условием минимизации энергии электронной подсистемы.

Впервые экспериментально изучены сверхпроводящие свойства островка Pb для случая  $d \sim 3\xi_{eff} \ll \lambda_{eff}$ . Методами СТС показано, что в островках такого размера реализуются только три состояния: безвихревое, одновихревое и нормальное. В силу того, что диамагнитный эффект мейснеровских токов пренебрежимо мал, магнитное поле внутри островка всегда практически равно внешнему. А это означает, что фактически изменяется смысл понятия “вихрь”.

### **Апробация работы.**

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных и национальных конференциях:

1. Dubost V., Fokin D., Cren T., Debontridder F., Sacks W., Bozhko S. and Roditchev D. “Growth and Control of Pb – Nanoislands on Si by STM”. HighMatTech-2007, 15-19 октября 2007г., Киев, Украина.
2. А.Н.Чайка, А.М.Ионов, Д.А.Фокин, С.И.Божко, Д.Родичев. “Исследования атомной и электронной структуры атомно-чистых поверхностей Si(hhm) методами ДМЭ, ФЭС и СТМ”. VI Национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РСНЭ-2007), 12-17 ноября 2007 г., Москва, Россия.
3. А.Н. Чайка, Д.А. Фокин, С.И. Божко, А.М. Ионов, F. Debontridder, V. Dubost, T. Cren, D. Roditchev. “Регулярные системы ступеней на базе чистых поверхностей Si(hhm)  $7 \times 7$ ”. Первый международный междисциплинарный симпозиум “Физика низкоразмерных систем и поверхностей” (LDS-2008), 5-9 сентября 2008 г., п. Лоо, Россия.

4. T. Cren, F. Debontridder, D. Fokin, V. Dubost and D. Roditchev. “New STM Facility in Paris: Ultra-low Temperature, High Magnetic Fields, Ultra-high Vacuum STM/STS with in-situ Growth and Surface Characterization”. Cryoconference 2008, 8-13 сентября 2009, Miraflores de la Sierra (Мадрид), Испания.
5. D.A.Fokin, A.N.Chaika, S.I.Bozhko, A.M.Ionov, F.Debontridder, V.Dubost, T.Cren, D.Roditchev. “Atomic structure of the regular step arrays on clean Si(557) surfaces: STM, LEED and photoemission studies”. 26th European Conference on Surface Science (ECOSS-26), 30.08.2009—04.09.2009, Парма, Италия
6. D.A.Fokin, S.I.Bozhko, V.Dubost, F.Debontridder, A.M.Ionov, T.Cren, D.Roditchev. “Electronic growth of 3-dimensional Pb islands on the Si(557) surface”. 26th European Conference on Surface Science (ECOSS-26), 30.08.2009—04.09.2009, Парма, Италия.
7. T.Cren, D.Fokin, F.Debontridder, V.Dubost and D.Roditchev, “Ultimate Vortex Confinement Studied by Scanning Tunneling Spectroscopy“, GDR 2426, Physique Quantique Mesoscopique, 5-8 октября 2009, Aussois, Франция
8. T.Cren, D.Fokin, F.Debontridder, V.Dubost and D.Roditchev, “Ultimate Vortex Confinement Studied by Scanning Tunneling Spectroscopy“, I.F. Schegolev Memorial Conference “Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems” 11–16 Октября, 2009, Черногловка, Россия

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в работах 1.-5. (см. в конце автореферата)

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, изложена на 133 страницах, иллюстрируется 68 рисунками. Список литературы включает 103 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснован выбор темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, основные положения, представленные к защите, научная новизна и положение данной работы относительно полученных ранее результатов, описан порядок распределения материала по главам, а также представлен список публикаций и докладов на конференциях по материалам диссертации.

**Первая глава** представляет собой обзор литературных данных. В ней изложены основные экспериментальные и теоретические результаты, касающиеся атомной структуры поверхностей Si(111) и вицинальных к ним, роста островковых пленок на таких поверхностях, а также сверхпроводящих свойств таких пленок.

Огромное количество работ в последнее время посвящается исследованиям различных свойств систем типа “тонкая металлическая пленка на полупроводниковой подложке”. В исследованиях таких систем были вовлечены такие мощные экспериментальные методики, как дифракция медленных электронов, Оже-спектроскопия, и многие другие. Изобретение туннельного микроскопа существенно облегчило задачу экспериментального изучения таких систем.

Одним из примеров такого рода систем является система Pb/Si. Рост пленки Pb на поверхности Si(111) идет в соответствии с механизмом роста Странски-Крастанова. Одна из причин реализации этого механизма состоит в несоответствии постоянных решеток Pb ( $4,95\text{\AA}$ ) и Si ( $5,43\text{\AA}$ ). В большинстве случаев, смачивающий слой является аморфным, а его толщина составляет 3 моноатомных слоя (МС) [1–4]. Действительно, в одной из первых работ [5], в которой изучался рост свинца на поверхности Si(111) методами дифракции быстрых электронов (ДБЭ), было обнаружено, что при напылении 1-3 МС Pb при 95К формируется сплошной аморфный смачивающий слой. При этом, признаки кристаллической структуры были обнаружены только в пленках толщиной не меньше 4 МС.

После формирования аморфного смачивающего слоя в дальнейшем процессе роста, согласно механизму Странски-

Крастанова, на нем образуются отдельные объемные островки [1–3, 6–11]. Исследованиям роста свинцовых пленок на поверхности Si(111) при низких температурах методами СТМ и ДМЭ посвящен цикл работ группы профессора Трингайда [2, 4, 12–15]. Было показано, что все островки имеют плоские верхние грани и боковые поверхности, причем это свойство роста проявляется вне зависимости от температуры напыления свинца (130–250K). При этом отмечалось, что распределение островков по высотам не является непрерывным, и существуют некоторые выделенные высоты.

Объяснить подобное поведение удалось с помощью, так называемой, модели электронного роста (*Electronic Growth*) (ЭР) [9, 10]. В рамках данной модели предполагается, что газ электронов проводимости находится в двумерной квантовой яме, ширина которой, соответствует толщине островка свинца. Из расчетов электронной энергии следует, что эта энергия осциллирует в зависимости от ширины квантовой ямы. Для случая пленки Pb эти расчеты впервые были выполнены в работе [11] и было показано, что при высоте островка в 7 моноатомных слоев энергия электронной подсистемы минимальна.

Однако, при всем многообразии работ, посвященных исследованиям роста тонких пленок Pb на поверхности Si(111), существует ряд вопросов, по которым нет единого мнения. Так например, нет согласия в том, какие толщины островков считать энергетически выгодными. Эти разногласия базируются на способе экспериментального измерения этих толщин. В части работ толщина островков измеряется от верхней поверхности смачивающего слоя, в то время как, в других работах, авторы предлагают измерять эту толщину от поверхности подложки. В последнем случае разногласия могут объясняться тем, что, как уже указывалось выше, толщина смачивающего слоя может различаться в зависимости от условий напыления [4]. В то же время, существует предположение о том, что под островками происходит преобразование разупорядоченного смачивающего слоя в кристаллический ГЦК свинец [16]. При этом, необходимо помнить, что эффекты, связанные с размерным квантованием, очень чувствительны к толщине объекта и характеру интерфейса. Так, например, если под островком

находится аморфный смачивающий слой, длина свободного пробега электронов в островке будет сильно уменьшена, в то время как в случае кристаллического смачивающего слоя наличие интерфейса не будет оказывать заметного влияния на длину свободного пробега электронов.

Во **второй главе** описаны основы методик, использованных в эксперименте. А именно: сканирующей туннельной микроскопии, сканирующей туннельной спектроскопии и дифракции медленных электронов. Помимо этого в ней также содержатся сведения о конструкции и принципах работы созданной в рамках работы экспериментальной установки.

В начале 80-х годов Гердом Биннигом и Генрихом Рорером была предложена и разработана новая методика для исследования поверхности твердого тела. Эта методика, принципиально отличающаяся от всех методов, применявшихся в физике твердого тела до этого [17–19], получила название “Сканирующая туннельная микроскопия” (СТМ). За это изобретение его авторы в 1986 были удостоены Нобелевской премии, что является свидетельством важности разработанной методики. Изобретение СТМ дало путевку в жизнь целому семейству методик, получившему название сканирующей зондовой микроскопии. В состав этого семейства, помимо СТМ, входят такие широкоиспользуемые методики, как например, атомно-силовая микроскопия и сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля. Разработка этой методики является, по-видимому, одним из наиболее важных событий в области исследования поверхности твердых тел за последнее время. Туннельный микроскоп позволяет получать изображения поверхности с разрешением вплоть до атомного и при этом проводить измерения не только в газообразной среде, но также в жидкой и в вакууме.

Эксперименты по исследованию чистой поверхности кремния, а также пленок свинца на этой поверхности проводились на экспериментальной установке “МЗ”, изготовленной в группе профессора Дмитрия Родичева в INSP (CNRS, Université Pierre et Marie Curie) в Париже в коллаборации с компаниями Omicron Nanotechnology и ICE Oxford. Эксперименты по исследованиям структуры чистой поверхности кремния проводились на

установке LAS-3000 фирмы RIBER, оснащенной узлом сканирования RT STM GPI-300 (разработка ЦЕНИ ИОФАН) в ИФТТ РАН в Черноголовке.

В **третьей главе** представлены результаты по СТМ/ДМЭ исследованиям структуры атомно-чистых поверхностей Si(557). Такие поверхности являются вицинальными и состоят террас Si(111)- $7 \times 7$  и тройных ступеней (ТС).

При проведении экспериментов использовались монокристаллические образцы Si(557) n-типа, легированные фосфором ( $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $25 \Omega \times \text{см}$  при 300 К). Образцы были получены отклонением от плоскости (111) в направлении  $[\bar{1}\bar{1}2]$  на угол  $9.45^\circ$ . Для приготовления поверхности в данных экспериментах использовалась следующая процедура. После загрузки в вакуумную камеру образцы обезгаживались в течение нескольких часов при температуре около  $600^\circ\text{C}$  таким образом, чтобы последующий высокотемпературный нагрев образца не приводил к существенному ухудшению вакуумных условий. Критерием достаточности отжига служило давление в камере. Отжиг прекращался, когда вакуум в камере становился лучше, чем  $1 \times 10^{-9}$  мбар. После этого образец остывал в течение 2-3 часов и подвергался кратковременному высокотемпературному прогреву прямым током в направлении, перпендикулярном ребрам ступеней, до температуры  $1200^\circ\text{C}$ , давление в камере во время такой “вспышки” не превышало  $5 \times 10^{-10}$  мбар. После вспышки, температура понижалась до  $900^\circ\text{C}$  со скоростью  $100\text{-}200^\circ\text{C}/\text{мин}$ , выдерживалась 1 минуту, и затем понижалась до комнатной ( $20\text{-}40^\circ\text{C}/\text{мин}$ ). Остановка температурного хода при температуре  $900^\circ\text{C}$  обусловлена наличием при этой температуре фазового перехода  $1 \times 1$  в структуру  $7 \times 7$ . Значения промежуточной температуры и времени выдержки в разных экспериментах варьировались. Температура поверхности образцов в процессе подготовки контролировалась с помощью оптического пирометра.

На рис. 1 представлено СТМ изображение поверхности площадью  $100 \times 45 \text{ нм}^2$ , из которого видно, что период структуры вицинальной поверхности, подготовленной с использованием процедуры, описанной выше, составляет 4,8 нм. Из представленного СТМ изображения также видно, что

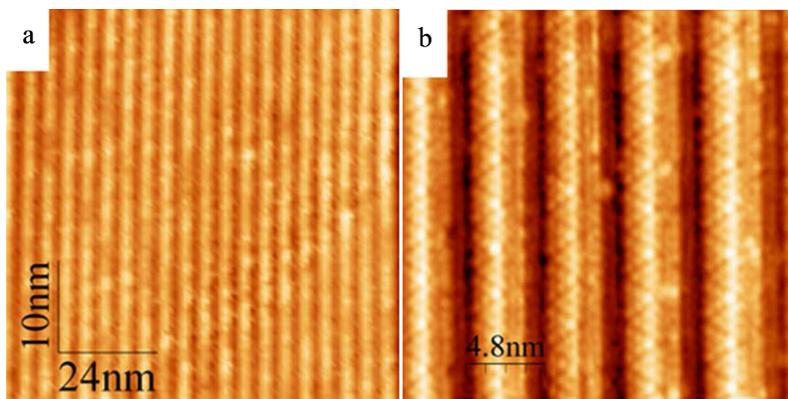


Рис. 1: СТМ изображения поверхности Si(223)  $V = -2,1 \text{ В}$ ,  $I = 80 \text{ пкА}$

эта величина не изменяется на размерах порядка 20 периодов структуры поверхности. Представляется важным отметить, что присутствие на поверхности структуры  $7 \times 7$  и атомных ступеней делает возможным достоверное определение структуры поверхности, поскольку эти объекты могут быть использованы для калибровки сканера СТМ.

Согласно полученным СТМ данным с атомным разрешением, исследуемая поверхность состоит из ступеней и террас Si(111) сравнимой ширины. Все ступени на представленном СТМ изображении (рис. 1b) имеют высоту, равную утроенному межплоскостному расстоянию в направлении (111). Такие ступени будем называть тройными (ТС). При этом, ширина террас Si(111) соответствует размеру элементарной ячейки поверхностной реконструкции Si  $7 \times 7$ . Из представленных СТМ изображений поверхности и простых геометрических соображений следует, что средняя плоскость такой поверхности отклонена от плоскости Si(111) на  $11,3^\circ$ . Таким образом, средняя кристаллографическая ориентация вицинальной поверхности, СТМ изображения которой представлены на рис. 1 соответствует кристаллографической плоскости (223). Однако, поскольку

изначальное отклонение средней плоскости поверхности образца от плоскости (111) составляло  $9,45^\circ$ , то можно предположить, что исследуемая поверхность Si(557) состоит из плоских фасеток Si(111), содержащих поверхностную реконструкцию  $7 \times 7$  и вицинальных участков Si(223). При этом, из геометрических соображений можно сделать вывод о том, что доля участков поверхности Si(111) не превышает 15% всей площади исследуемого образца.

Сравнение результатов проведенных расчетов обратных решеток для квазиодномерных моделей поверхности в рамках кинематического приближения с экспериментальными данными ДМЭ показало, что ТС представляется в виде последовательности моноатомной и двойной ступеней. При этом возможна аппроксимация ТС фасеткой с кристаллографической ориентацией (113). В то же время, из проведенных расчетов следует, что аппроксимация ТС фасеткой с кристаллографической ориентацией (112), по-видимому, не верна. Отметим, что результаты расчетов и экспериментов, представленные в этой главе, находятся в противоречии в результатами работ [20, 21], однако, в силу того, что обсуждаемые структуры, по-видимому, обладают близкими поверхностными энергиями, расхождения с литературными данными могут быть обусловлены с незначительными, на первый взгляд, различиями в используемых процедурах термической подготовки, уровнем легирования образцов и т.д.

В **четвертой** главе представлены результаты по исследованию механизма роста островковых пленок Pb на поверхностях Si(111) и вицинальной к ней Si(557), полученные методами СТМ.

Для проведения исследований роста островковых пленок Pb на вицинальных поверхностях Si была выбрана поверхность Si(557). Как было сказано в главе 3, эта поверхность может содержать области с различной локальной кристаллографической ориентацией. Наиболее часто встречались в наших экспериментах области с локальными ориентациями (223),  $(7 \times 7)$  и (557). В данном параграфе приведены экспериментальные данные, относящиеся к росту островковых пленок Pb на участке поверхности с локальной

кристаллографической ориентацией (7 7 10).

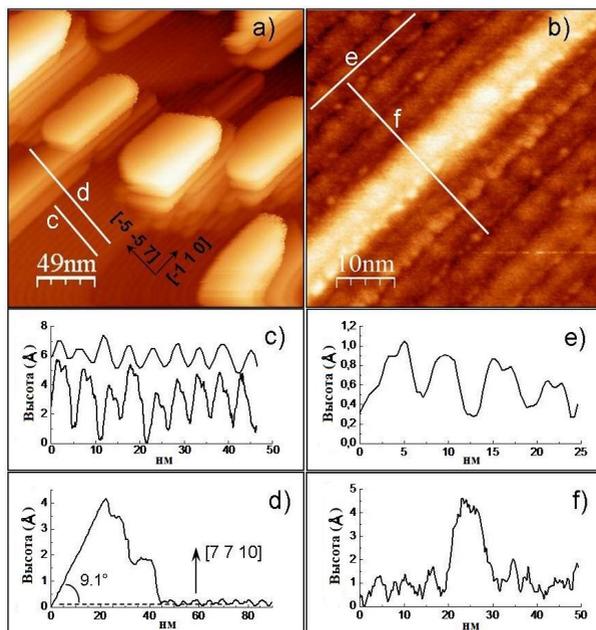


Рис. 2: а:СТМ изображение вицинальной поверхности Si(7 7 10) после напыления Pb, б: СТМ изображения смачивающего слоя между островками, с-ф: сечения СТМ изображений вдоль линий на рис.а и б

На рис. 2а представлено СТМ изображение участка поверхности Si(7 7 10), полученное после напыления 16 МС свинца. Из этого СТМ изображения видно, что на поверхности присутствуют отдельные трехмерные островки, вытянутые в направлении, параллельном ребрам ступеней. При этом между ними видна ступенчатая структура подложки, покрытой смачивающим слоем. Таким образом, рост островковой пленки Pb идет в соответствии с механизмом Странски-Крастанова.

На данном изображении хорошо видно, что островки

Pb имеют слоистую структуру. Такую слоистую структуру островков можно объяснить в рамках модели ЭР [9, 10], где рассматривается газ электронов проводимости, находящийся в двумерной квантовой яме, ширина которой равна толщине островка свинца. Для случая пленки Pb эти расчеты впервые были выполнены в работе [11]. Зависимость поверхностной энергии от толщины ямы для случая бесконечно глубокой ямы имеет синусоидальную форму вида:

$$E_s = \frac{C \sin(2k_F N a + \varphi)}{N^\alpha} + B \quad (1)$$

где  $C$  и  $B$  - постоянные,  $\alpha$  показатель затухания, который может зависеть от  $N$ , и лежит в диапазоне  $1,77 \pm 0,09$  [11].

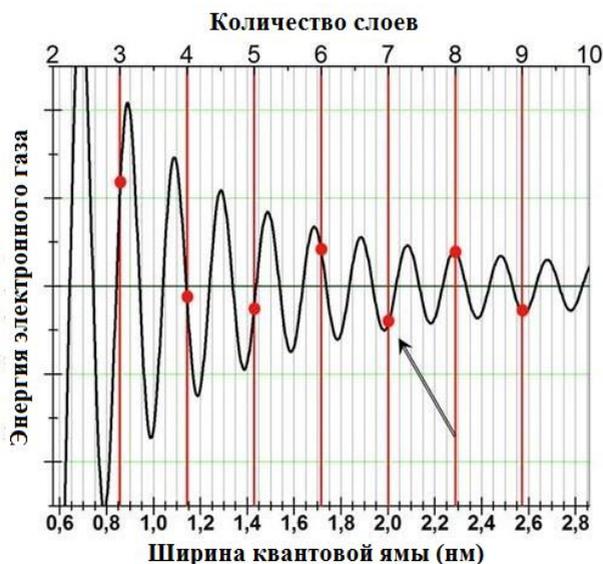


Рис. 3: Зависимость энергии двумерного электронного газа от ширины квантовой ямы

На рис.3 представлена зависимость энергии электронного газа от ширины квантовой ямы.  $E$  осциллирует в зависимости

от толщины островка и при больших толщинах совпадает с энергией Ферми для объемного кристалла  $E_F$ . На представленной зависимости для простоты принято  $E_F = 0$ . На представленной осциллирующей зависимости  $E(d)$ , отмечены точки, в которых значение  $E$  соответствует полной электронной энергии островков состоящих из целого числа атомных слоев Pb. На представленном графике показано, что при ширине квантовой ямы в 7 моноатомных слоев, значение энергии двумерного электронного газа совпадает с локальным минимумом. Таким образом, энергия электронной подсистемы островка Pb, не разбитого на слои, превосходит суммарную энергию электронных подсистем всех слоев, такого же по размеру слоистого островка. Это является причиной образования в ходе роста островков 7 моноатомных слоев и дефектов между ними.

**Пятая глава** посвящена основной цели диссертации и содержит результаты, полученные в ходе исследований влияния размеров островков Pb на их сверхпроводящие свойства.

Основная цель данной работы состояла в исследовании сверхпроводящих свойств нано-островков Pb в режиме сильного размерного квантования. Для того, чтобы провести эти исследования сначала необходимо было создать экспериментальную установку и изучить структуру подложки и рост Pb/Si как это было описано в предыдущих главах.

Для проведения исследований сверхпроводящих свойств методами СТС был выбран отдельный островок с латеральными размерами  $d \simeq 110$  нм и высотой 5.5 нм, что соответствует 19 моноатомным слоям Pb. Это означает, что об этом островке можно говорить, как о двумерном объекте, действительно, для него  $h \ll \xi_{Pb}, \lambda_{Pb}$ .

Эксперимент по исследованию сверхпроводящих свойств выбранного островка состоял в том, что проводилось снятие туннельных характеристик образца при различных значениях внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно поверхности образца. Поскольку время, необходимое для записи одного полного изображения в растровом режиме СТС ( $I(x, y, V)$ ,  $\Delta z(x, y)$ ) составляет несколько часов, сканирование проводилось вдоль только одной прямой,

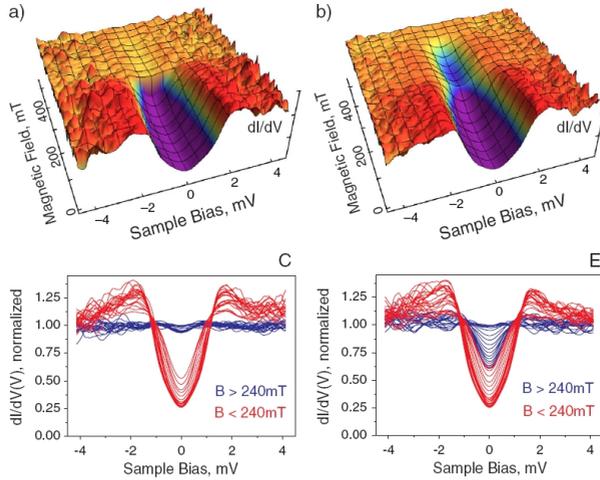


Рис. 4: Полученные спектры  $dI/dV(V)$  в зависимости от величины магнитного поля, для центральной части (a) и края островка (b).

проходящей через центр островка. На рис. 4а представлены полученные зависимости  $dI/dV(V)$ , снятые в центральной части островка, а спектры, представленные на рис. 4б сняты на краю островка при различных значениях внешнего магнитного поля. Красным цветом выделены спектры, соответствующие значениям магнитного поля, меньшим 240 мТ, синим - - большим. Из представленных спектров  $dI/dV(V)$  видно, что при увеличении внешнего магнитного поля происходит постепенное заполнение щели - ZBC повышается как в краевой части образца, так и в центральной, где токи не текут. Это связано с тем, что хотя СТС и позволяет исследовать плотность состояний с атомным разрешением, в данном случае разрешение ограничено тем, что параметр порядка  $\xi_{eff}$  изменяется на длине порядка  $\xi_{eff}$ . Таким образом, значение волновой функции сверхпроводящего состояния определяется на площади порядка  $\pi\xi^2$ . Характерно, что заполнение щели

происходит быстрее в краевой части, что объясняется наличием сильных мейснеровских токов в этой области образца. При значении магнитного поля 240 мТ ситуация скачкообразно меняется. В центре образца в туннельных характеристиках  $dI/dV$  щель отсутствует, в то же время, на краю образца - остается. Логично предположить, что при значении внешнего магнитного поля 240мТ образец переходит в состояние с одним вихрем, находящемся в центре образца. Такая одновихревая конфигурация соответствует нормальному состоянию в центре - коре вихря, и сверхпроводящему состоянию на периферии образца. При дальнейшем увеличении поля, остальная часть островка остается в сверхпроводящем состоянии, до того момента, когда внешнее магнитное поле не достигнет критического значения и весь островок не перейдет в нормальное состояние при 460 мТ.

Каждая глава содержит краткие выводы, по результатам, изложенным в этой главе.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, а также представлены перспективы:

- Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования поверхности методами СТМ/СТС в условиях сверхвысокого вакуума ( $P < 10^{-10}$  мБар), сверхнизких температур (до 0,28К) и в магнитных полях (до 8Т) с возможностью подготовки образцов in-situ.
- Изучена атомная структура поверхности Si(557) и показано, что в зависимости от способа подготовки поверхности, она может содержать фасетки Si(111)- $7 \times 7$ , Si(223), Si(7 7 10), Si(557). А также предложены модели атомной структуры тройной ступени.
- Обнаружено, что рост островков Pb на ступенчатой поверхности Si(557) сопровождается образованием слоистой структуры. Предпочтительная толщина слоя составляет 7 монослоев (2нм), а плоскость Pb(111) наклонена на  $1^\circ$  по отношению к плоскости Si(111). Образование слоистой структуры обусловлено

квантованием энергетического спектра электронов и объясняется с позиций модели электронного роста.

- Исследованы сверхпроводящие свойства островка Рb для случая  $d \sim 3\xi_{eff} \ll \lambda_{eff}$ . Методами СТС показано, что в островках такого размера реализуются только три состояния: безвихревое, одновихревое и нормальное. Это означает, что изученный случай соответствует вихревому пределу: в образцах меньшего размера вихревое состояние не реализуется, а в больших островках возможны многовихревые состояния.

В качестве дальнейших исследований, перспективными представляются эксперименты по изучению многовихревых состояний островков. Для этого предполагается использование в качестве объектов исследования островков больших латеральных размеров. Помимо этого, представляется интересным проведение исследований сверхпроводящих свойств островков более сложной геометрии. В частности, исследование вихревой конфигурации в зависимости от толщины образца. Для этого планируется использовать островки, содержащие корону. Более того, результаты, полученные в главе 4 настоящей диссертационной работы, позволяют предположить интересное поведение сверхпроводящих свойств в островках свинца на вицинальных поверхностях, поскольку в этом случае островок имеет переменную толщину.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

1. T.Cren, D.Fokin, F.Debontridder, V.Dubost and D.Roditchev “Ultimate Vortex Confinement Studied by Scanning Tunneling Spectroscopy”, *Phys.Rev.Lett.* 102 (2009) 127005
2. A.N.Chaika, D.A.Fokin, S.I.Bozhko, A.M.Ionov, F.Debontridder, V.Dubost, T.Cren, and D.Roditchev “Regular stepped structures on clean Si(hhm)  $7 \times 7$  surfaces”, *Journal of applied Physics*, 105 (2009) 034304

3. A.N.Chaika, D.A.Fokin, S.I.Bozhko, A.M.Ionov, F.Debontridder, T.Cren, D.Roditchev "Atomic structure of a regular Si(223) triple step staircase", Surface Science 603 (2009) 752-761
4. А.Н.Чайка, Д.А.Фокин, С.И.Божко, А.М.Ионов, F.Debontridder, V.Dubost, T.Cren, D.Roditchev "Регулярные системы ступеней на базе чистых поверхностей Si(hhm) $7 \times 7$ ", Известия РАН. Серия физическая, 73 (2009) 716-718
5. D.A.Fokin, S.I.Bozhko, V.Dubost, F.Debontridder, A.M.Ionov, T.Cren, D.Roditchev "Electronic Growth of Pb on the Vicinal Si Surface" Phys.Rev.B, submitted

## Список литературы

- [1] H.H.Weitering, D.R.Heslinga, T.Himba, Phys. Rev. B, 45 5991 (1992)
- [2] K. Budde, E. Abram, V. Yeh, and M. C. Tringides, Phys. Rev. B, 61, R10602 (2000)
- [3] I.B.Altfeder, K.A.Matveev and D.M.Chen, Phys. Rev. Lett. 78, 2815 (1997)
- [4] M.Hupalo, S.Kremmer, V.Yeh, L.Berbil-Bautista, E.Abram, M.C.Tringides, Surf. Sci., 493, 526 (2001) *и ссылки, приведенные в работе*
- [5] M. Jalochowski and E. Bauer, J. Appl. Phys. 63, 4501(1988)
- [6] C.M.Wei and M.Y.Chou Phys. Rev. B 66, 233408 (2002)
- [7] Shao-Chun Li, Xucun Ma, Jin-Feng Jia, Yan-Feng Zhang, Dongmin Chen, Qian Niu, Feng Liu, Paul S. Weiss and Qi-Kun Xue, Phys. Rev. B 74, 075410 (2006)
- [8] Z. Kuntova, M. Hupalo, Z. Chvoj, M.C. Tringides, Surf. Sci. 600, 4765-4770 (2006)

- [9] Zhenyu Zhang, Qian Niu, and Chih-Kang Shih, *Phys. Rev. Lett.* 80, 5381 (1998)
- [10] W. B. Su, S. H. Chang, W. B. Jian, C. S. Chang, L. J. Chen, and Tien T. Tsong, *Phys. Rev. Lett.* 86, 5116 (2001)
- [11] P. Czoschke, Hawoong Hong, L. Basile, and T.-C. Chiang, *Phys. Rev. B* 72, 075402 (2005)
- [12] M.Hupalo, M.C.Tringides, *Phys. Rev. B* 65, 115406 (2002)
- [13] V. Yeh, L. Berbil-Bautista, C. Z. Wang, K. M. Ho, and M. C. Tringides *Phys. Rev. Lett.*, 85, 5158 (2000)
- [14] M.Hupalo, V.Yeh, L.Berbil-Bautista, S.Kremmer, E.Abram, and M.C.Tringides, *Phys. Rev. B* 64, 155307 (2001)
- [15] C. A. Jeffrey, E. H. Conrad, R. Feng, M. Hupalo, C. Kim, P. J. Ryan, P. F. Miceli, and M. C. Tringides *Phys. Rev. Lett.* 96, 106105 (2006)
- [16] R. Feng, E. H. Conrad, M. C. Tringides, C. Kim, P. F. Miceli *Appl. Phys. Lett.* 85, 3866 (2004)
- [17] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, “7x7 Reconstruction on Si(111) resolved in real space”, *Phys. Rev. Letters* 50 (1983) 120-123
- [18] Binnig G., Rohrer H., *IBM J.Res.Dev.* 30, 355-369 (1986)
- [19] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber E. Weibel, *Appl. Phys. Lett.* 40 178 (1982)
- [20] A. Kirakosian, R. Bennewitz, J. N. Crain, Th.Fauster, J.-L. Lin, D. Y. Petrovykh, and F. J. Himpsel, *Appl. Phys. Lett.* 79, 1608 (2001)
- [21] M. Henzler, R. Zhachuk, *Thin Solid Films* 428, 129-132 (2003)