

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Путилова Алексея Владимировича *«Исследование пространственно–неоднородных электронных состояний методами низкотемпературной сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии»*, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния.

**Актуальность.** Исследование физических свойств объектов нанометрового масштаба является одной из актуальных задач физики конденсированного состояния. Уменьшение размеров до нанометрового диапазона приводит к существенному изменению плотности электронных состояний и проявлению квантовых эффектов, которые могут быть особенно ярко выражены при низких температурах. Кроме того, заметное влияние на энергетический спектр электронов в наноструктурах могут оказывать дефекты атомного масштаба. Для получения новой информации и понимания физических процессов в таких объектах особенно важны локальные зондовые методы, позволяющие проводить исследования с атомарным пространственным разрешением и напрямую связывать особенности атомной и электронной структуры. Диссертационная работа А.В. Путилова посвящена исследованию пространственно–неоднородных электронных состояний в нормальных металлах и сверхпроводящих структурах пониженной размерности с использованием сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и спектроскопии (СТС) в широком диапазоне температур (от гелиевых до комнатной). Применение современных методов, дающих прямую и достоверную информацию об атомной и электронной структуре нанобъектов с высоким пространственным и энергетическим разрешением, позволило исследовать особенности электронной структуры в ряде систем пониженной размерности, образованных нормальными и сверхпроводящими металлами на поверхностях полупроводников и металлов. В связи с этим, актуальность выполненной работы не вызывает никаких сомнений.

**Структура и основное содержание работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 190 наименований. Во введении автором обоснованы актуальность, цели и задачи работы, выбор объектов и методов исследования, сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, объяснены их новизна, научная и практическая значимость, отмечен личный вклад автора в получение результатов работы.

Первая глава посвящена исследованию атомной и электронной структуры тонких пленок свинца и ниобия на поверхности Si(111), а также наноструктур германия на поверхности Au(111). Исследована пространственная зависимость дифференциальной проводимости ультратонких пленок свинца, осажденных на реконструированную поверхность Si(111)-7×7. Исследованы туннельная проводимость и квантово-размерные эффекты на островках свинца с различным количеством атомных слоев. Показано, что величина туннельной проводимости может изменяться даже в пределах атомарно-гладких террас из-за дефектов кристаллической решетки в приповерхностных слоях. Обнаружено, что при напылении ниобия на подложку Si(111) при комнатной

температуре на поверхности формируются наноразмерные кластеры с металлическим типом туннельной проводимости. Показано, что при напылении ниобия на нагретую подложку формируются низкоразмерные структуры с полупроводниковым типом туннельной проводимости при низких температурах. Установлено, что напыление атомов германия на поверхность Au(111) при комнатной температуре приводит к формированию двухкомпонентных структур, состоящих из атомов золота и германия. Показано, что нагрев системы Ge/Au(111) до 500 К при покрытиях вплоть до одного монослоя приводит к образованию сплава Au-Ge, что делает невозможным формирование однослойного германена на поверхности Au(111).

Глава 2 посвящена исследованию пространственно-неоднородных сверхпроводящих состояний в монокристаллах FeSe. Исследованы особенности структуры вихревой решетки в монокристаллах FeSe во внешнем магнитном поле. Показано, что гексагональная вихревая решетка при увеличении магнитного поля постепенно трансформируется в квадратную. С помощью СТМ и СТС высокого разрешения показано, что анизотропия сердцевин вихря увеличивается с ростом магнитного поля. Представлены результаты численного моделирования в рамках двухзонной модели Гинзбурга-Ландау, которые позволили на качественном уровне воспроизвести наблюдаемые экспериментально особенности вихревой структуры. Выполнены исследования пространственного распределения параметра порядка вблизи дефекта кристаллической структуры в монокристалле FeSe.

Глава 3 посвящена исследованию локализованной и прикраевой сверхпроводимости в микромостиках в резистивном состоянии. Показано, что генерируемое лазерным лучом дополнительное напряжение максимально вблизи краев мостика, что связано с разрушением прикраевой сверхпроводимости. Обнаружено, что величина максимумов у противоположных границ мостика различна, при этом больший максимум соответствует большей величине сверхпроводящего прикраевого тока.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Следует особо отметить проведенный автором детальный анализ имеющихся литературных данных по теме исследования, который позволяет четко понять конкретные задачи, решавшиеся в диссертационной работе, а также сопоставить их с исследованиями, выполненными в других группах. Можно отметить подробное описание деталей проводившихся экспериментов и численных расчетов для каждой из решавшихся в работе задач. Столь подробный методический разбор, во-первых, позволяет независимо воспроизвести полученные результаты на подобных нанообъектах, а во-вторых, не оставляет сомнений в большом личном вкладе автора в проводившиеся исследования.

Необходимо обратить внимание, что сверхвысоковакуумные СТМ/СТС-исследования топографии и электронной структуры низкоразмерных систем с атомным разрешением в широком диапазоне температур (включая гелиевые), в некоторой степени, являются искусством и сами по себе говорят о высоком уровне выполненной работы.

**Новизна и достоверность.** Все основные результаты, представленные в данной работе, являются новыми и получены впервые автором или при его непосредственном участии. Следует особо отметить результаты исследования электронной структуры металлических нанобъектов на поверхности Si(111) и особенностей сверхпроводящего состояния в монокристаллах FeSe, выполненные с использованием высокоразрешающих методов СТМ/СТС в условиях сверхвысокого вакуума при низких температурах. Кроме того, для исследования структуры вихревой решетки в кристаллах FeSe измерения проводились с изменяющимся магнитным полем. Такие эксперименты соответствуют лучшим стандартам исследований поверхности с использованием сканирующей зондовой микроскопии. Экспериментальные данные сопоставлялись с результатами численного моделирования, что свидетельствует об их достоверности. При анализе данных СТМ автором использовались статистические методы, среди которых использовался метод триангуляции Делоне, позволяющий получить информацию о характерных расстояниях между объектами в неупорядоченных системах.

Новизна, актуальность и достоверность результатов диссертационной работы не вызывают никаких сомнений и подтверждаются как высоким уровнем использованных в работе современных методов исследования, так и уровнем журналов, в которых они были опубликованы. Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах (Письма в ЖЭТФ, Physical Review B, Superconductor Science and Technology и др.), рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных исследований, а также были доложены на российских и международных научных конференциях.

**Научная и практическая значимость.** Полученные в работе результаты дают новую информацию о связи атомной и электронной структуры в металлических объектах нанометрового размера и вносят существенный вклад в понимание структуры смешанного состояния в монокристаллах FeSe. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для развития методов формирования низкоразмерных структур в условиях сверхвысокого вакуума, а также методов диагностики дефектов в тонких металлических пленках и островках с помощью сканирующей туннельной спектроскопии.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в организациях, занимающихся исследованием поверхностных атомных структур с помощью сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии, а также свойств сверхпроводящих объектов пониженной размерности (например, Институт автоматизи и процессов управления ДВО РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики РАН, Институт физики твердого тела РАН и других).

Вместе с тем, по диссертации хотелось бы сделать следующие **замечания**:

1. Несмотря на то, что вывод о возможности обнаружения дефектов наноструктур при измерении пространственного распределения туннельной проводимости является обоснованным, связь «плавно-неоднородного» распределения на Рис. 15 с напряжениями на краях островка не очень хорошо объяснена. Мне осталось непонятным, каким образом деформации на краях могут влиять на электронную

структуру в центре островка (на расстояниях порядка 100 межатомных расстояний от края). Также непонятно, почему такие искажения карты плотности состояний и топографии поверхности на экспериментальных изображениях (Рис. 15) видны только с одного края островка. Одним из возможных объяснений могло бы быть искажение истинной топографии и карты проводимости из-за неконтролируемого дрейфа и крипа керамики, которые могут проявляться при длительных измерениях.

2. В разделе 1.3.4 (стр. 49) не объяснено, каким образом толщина одного монослоя формирующихся на Si(111) наноструктур ниобия (0.265 нм) связана с исследовавшимися островками толщиной 0.7, 1.2, и 1.6 нм.

3. В разделе 1.3.5 обсуждается перенос атомов подложки в ниобий-содержащие островки на поверхности. Вывод о переносе атомов делается на основании СТМ-изображения, представленного на Рис. 20а. К сожалению, не объяснено почему «ямки» вблизи островка наблюдаются только с одной стороны, но совсем не заметны с противоположной стороны и слабо выражены на остальных боковых сторонах островка.

4. На стр. 23 утверждается, что матричный элемент  $M$ , определяющий величину туннельного тока в контакте «зонд-образец», может зависеть от формы острия. К сожалению, автор никак не пояснил эту возможную зависимость, которая не так очевидна, как зависимость матричного элемента от симметрии электронных состояний иглы и образца, участвующих в туннелировании.

5. Автором диссертационной работы иногда используется сомнительная терминология. Например, на стр. 19 используется термин «режим заданного тока» вместо устоявшегося в сканирующей туннельной микроскопии термина «режим постоянного тока», а на стр. 25 и 36 используются термины «ускорительное напряжение» и «гранецентрическая кубическая решетка», которые, как мне кажется, следовало бы заменить на «ускоряющее напряжение» и «гранецентрированная кубическая решетка», соответственно. Также в тексте диссертации часто используется термин «туннельная плотность состояний» в тех случаях, когда по логике изложения речь идет только о плотности состояний поверхности, без возмущения ее иглой (например, на стр. 39, где речь идет о связи плотности электронных состояний в пленках свинца с их кристаллической структурой).

6. В тексте диссертации содержится большое количество опечаток и неточностей, которые сильно осложняют прочтение работы. Приведу лишь один пример. На стр. 29 автором упоминается «фотография держателя с закрепленным Si кристаллом», изображенная (согласно тексту диссертации) на Рис. 4а. Но при длительном рассмотрении Рис. 4а мне удалось найти на нем только СТМ-изображение реконструкции Si(111)-7×7. Рисунок же 4в, упоминающийся в этом же разделе, в диссертации просто отсутствует. В связи с этим, хотелось бы пожелать автору быть более аккуратным при оформлении результатов работы.

Сделанные замечания носят, скорее, оформительский характер. Они несколько не снижают общую положительную оценку работы и не влияют на обоснованность результатов диссертации, выносимых на защиту.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, выполненным на очень высоком методическом уровне. Новизна, актуальность и

достоверность результатов не вызывают сомнений. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертационная работа А.В. Путилова удовлетворяет всем требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Чайка Александр Николаевич,  
кандидат физико-математических наук,  
специальность 01.04.10 – физика полупроводников и диэлектриков  
старший научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт физики твердого тела Российской академии наук

23.11.2020 г.

Почтовый адрес:  
ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна д.2,  
142432, Россия  
Тел.: +7 (496) 522-29-22  
e-mail: chaika@issp.ac.ru

Подпись А.Н. Чайки заверяю  
Ученый секретарь ИФТТ РАН  
кандидат физико-математических наук



А.Н. Терещенко