

УТВЕРЖДАЮ

« 24 » ноября 2020 г.

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра «Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук»



В.В. Глушков
Глушков В.В.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Путилова Алексея Владимировича **«Исследование пространственно-неоднородных электронных состояний методами низкотемпературной сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность

В настоящее время наблюдается бум исследований в области двумерных (2D) материалов, начало которому было положено созданием графена и экспериментальным обнаружением нового класса объектов - топологических изоляторов. Интерес к физике в указанной области двумерных систем стимулирует движение в область сверхмалых латеральных размеров, т.е. к объектам размерности 1D и 0D, для которых основным методом исследования является сканирующая зондовая микроскопия с ее практически безграничным потенциалом (если речь идет об исследовании единичного объекта). В настоящей работе представлены подходы и результаты исследований квантово-размерных эффектов, наблюдаемых в сверхпроводящих, металлических и магнитных атомных структурах на поверхности. В этом смысле актуальность и необходимость подобных исследований не вызывает сомнений и весь вопрос заключается в качестве

таких исследований. В диссертационной работе были применены продвинутое методы сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии: низкие температуры, магнитные поля и сверхвысокий вакуум, - что сильно усложняет проведение исследований, но в то же время сильно поднимает уровень детализации и информативности получаемых результатов.

Научная и практическая значимость

Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми и оригинальными. Как правило, экспериментальные данные подкреплены теоретическими расчетами и дано физически обоснованное объяснение наблюдаемых явлений. В этом смысле все результаты надежны и достоверны и могут быть использованы при дальнейших исследованиях. В качестве наиболее яркого результата следует отметить обнаружение анизотропии структуры вихря в материале FeSe и ее рост с увеличением магнитного поля. Помимо этого изучено поперечное квантование электронных состояний в тонких островках свинца на поверхности Si(111)-7x7 и выявлена зависимость от поверхностных напряжений на междоменных интерфейсах, исследованы начальные стадии роста германия на поверхности Au(111), выявлены особенности поведения пленок ниобия на кремнии и др. Практическая значимость работы, т.е. польза для последующих применений или исследований, заключается в следующем:

- развиты методы формирования тонкопленочных наноструктур на основе Ge, Nb, Pb в условиях сверхвысокого вакуума;
- развиты методы диагностики уровней размерного квантования и скрытых дефектов в тонких пленках на основе анализа карт дифференциальной проводимости;
- развиты методы определения размеров сердцевин вихря и параметров вихревой решетки в зависимости от магнитного поля.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 121 странице и состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 190 наименований, списка опубликованных работ автора из 7 наименований и содержит 48 рисунков и 2 таблицы.

Во введении обосновывается актуальность темы, кратко описываются объекты и методы исследования, формулируются цель, задачи и научные положения, выносимые на защиту, указываются научная новизна и практическая значимость результатов работы, степень достоверности и апробация результатов, приводятся сведения о публикациях автора, отмечается его личный вклад в разработку проблемы.

В первой главе вначале дан краткий обзор основного метода исследований – сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии вместе с аппаратурой, использованной автором в Институте физики микроструктур (раздел 1.1.), далее дан краткий обзор процессов роста тонких пленок на поверхности твердого тела и некоторых положений физики поверхности, касающихся реконструкции поверхности. В этой же главе представлен анализ литературы по исследованию квантовых размерных эффектов в свинце и других металлах и описаны механизмы размерного квантования (раздел 1.2). После этого приведены и обсуждаются оригинальные результаты работы по формированию и изучению тонких пленок свинца на кремнии. В разделе 1.3. представлено исследование начальной стадии роста ниобий-содержащих структур на поверхности Si(111) 7×7 по той же схеме – анализ литературы, описание механизмов, представление и обсуждение оригинальных результатов диссертации. В разделе 1.4. аналогичным образом обсуждаются результаты осаждения германия на поверхность Au(111). Основная мотивация данного конкретного исследования – поиск путей создания нового двумерного материала германена. Выводы по первой главе приведены в конце главы.

Вторая глава посвящена обсуждению результатов, полученных при исследовании пространственно неоднородных квазичастичных состояний в

сверхпроводниках и нормальных металлах. Структурно Глава 2 построена сходим образом с Главой 1: анализ имеющейся литературы и современного состояния исследований в данной области, включая развитые теоретические представления, затем представление и обсуждение оригинальных результатов. Основным исследуемым материалом был FeSe. Автором подробно рассмотрены все выявленные эффекты и проведено подробное сравнение с теорией, сделаны соответствующие умозаключения.

Третья глава посвящена исследованию поверхностной сверхпроводимости в микромостиках с использованием зондирующего лазерного излучения. Достаточно серьезное внимание уделено теоретической проработке проблемы, включая обсуждение теории Ландау-Гинсбурга и ее применению у полученным экспериментальным результатам.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Достоверность основных результатов диссертации Путилова Алексея Владимировича подтверждается применением хорошо апробированных экспериментальных методов исследования структуры вещества, использованием современного поверенного измерительного оборудования, а также согласием полученных основных экспериментальных результатов работы с расчетами и фундаментальными представлениями физики конденсированного состояния.

В то же время по диссертации имеются замечания:

1. При анализе атомной структуры в системе Ge/Au(111) сравнение экспериментальных СТМ-данных проводится с расчетами на основе теории функционала плотности и делается вывод о внедрении атомов германия в верхний слой золота. Однозначность такого вывода вызывает определенные сомнения, поскольку не проведено сравнение расчетных и экспериментальных СТМ-изображений при разных туннельных напряжениях и токах, что в настоящее время считается стандартом подобного анализа.

2. В процессе дискуссии на семинаре отдела технологий и измерений атомного масштаба было высказано пожелание несколько поменять порядок представления материала, поставив на центральное место сверхпроводящие системы, в которых получены наиболее значимые результаты.
3. Более подробно следовало бы представить оборудование, на котором проводились эксперименты по сверхпроводимости как СТМ/С, так и лазерные. В работе представлено описание только одной экспериментальной установки UHV LT SPM Omicron Nanotechnology в ИФМ РАН.
4. В работе обнаружено интересное явление, достаточно часто встречающееся на начальных стадиях формирования монослоя инородного материала на полносимметричных гранях: рост одномерных структур. В данном случае имеется в виду рост ниобия на поверхности Si(111)-7x7. Следовало бы дать пояснения, почему так происходит для данной системы и в чем возможная причина явления.

Сформулированные выше замечания не затрагивают основных выводов диссертации и, тем самым, не влияют на важность и достоверность проведенных исследований. Эти замечания могут быть в значительной мере учтены как пожелания для проведения последующих научных исследований.

Автореферат полностью отражает основные результаты диссертации, которые опубликованы в лучших российских и международных журналах.

Результаты диссертации Путилова Алексея Владимировича могут быть рекомендованы для использования в ВУЗах, научно-исследовательских учреждениях, занимающихся исследованиями в области физики конденсированного состояния, в частности, в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, НИЦ "Курчатовский институт", Московском государственном университете им. М. Ломоносова, Санкт-Петербургском государственном университете, Институте автоматики и проблем управления

ДВО РАН, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и других образовательных и научно-исследовательских учреждениях.

Заключение о диссертации

Диссертация Путилова Алексея Владимировича соответствует паспорту научной специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния и требованиям пунктов 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней в редакции постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, Путилов Алексей Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад по результатам диссертационной работы был представлен 20 ноября 2020 г. на семинаре отдела технологий и измерений атомного масштаба Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ОТИАМ ЦЕНИ ИОФ РАН). Отзыв о диссертации Путилова А. В. обсужден и утвержден на Ученом совете ОТИАМ ЦЕНИ ИОФ РАН, протокол №2 от 23 ноября 2020 года. Присутствовало 3 человека. Результаты: «за» - 3, «против» - нет, «воздержались» - нет.

Отзыв составил:

Зав. отделом технологий и измерений атомного масштаба

ЦЕНИ ИОФ РАН

д.ф.-м.н.



К.Н. Ельцов

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

119991 Москва, ул. Вавилова, д.38. Тел. +7 499 5038769.

Эл.почта: eltsov@kapella.gpi.ru