

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Яковлева Алексея Андреевича на тему: «Структура и свойства поверхностных реконструкций $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Bi}$ и $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$, модифицированных атомами металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Современное направление квантовой электроники – спинтроника, которая изучает перенос спин-поляризованных электронов в твердых телах, вызывает повышенный интерес, обусловленный созданием быстродействующих устройств хранения и обработки информации. В связи с этим не прекращается поиск новых физических явлений управления спин-электронными состояниями, а также материалов, в которых они проявляются. Традиционным способом снятия вырождения по спину является использование внешнего магнитного поля. Однако расщепления вырожденного состояния на два новых с противоположно направленными спинами можно добиться и без магнитного поля в системах, содержащих двумерный электронный газ и обладающих сильным спин-орбитального взаимодействием. Это явление носит название эффекта Рашбы. Он проявляется на поверхности некоторых металлов, в квантово-размерных объектах, полупроводниковых гетероструктурах, графене и т.д. Одним из путей увеличения разновидностей таких материалов является модифицирование поверхности кремния посредством выращивания на ней тонких плёнок и двумерных структур с использованием атомов металлов. Таким образом, **актуальность диссертации**, цель которой заключалась в поиске новых двумерных бинарных материалов со спин-расщеплёнными металлическими состояниями на поверхности кремния на основе висмута и золота, исследование их атомной структуры и электронных свойств, не вызывает сомнения.

Защищаемые положения, сформулированные в диссертации, основные выводы проведенных исследований о формировании новых поверхностных реконструкций системы $(\text{Bi,Ag})/\text{Si}(111)$, а также $\text{Au}/\text{Si}(111)$, модифицированной адсорбатами (In , Tl , Na и Cs), их электронной структуре и свойствах, **научно обоснованы** в полной мере, поскольку опираются на точные экспериментальные данные и не противоречат мировому опыту, представленному в литературных источниках по теме исследований.

Достоверность полученных результатов определяется использованием широкого комплекса современного измерительного оборудования и методов,

таких как сканирующая туннельная микроскопия, сканирующая туннельная спектроскопия, дифракция медленных электронов, фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, а также повторяемостью результатов экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Исследованы структурные и электронные свойства новых двумерных сплавов Bi-Ag на поверхности Si(111), имеющих различную периодичность, в т.ч. квазипериодических. Для реконструкций $\text{Si}(111)\sqrt{19}\times\sqrt{19}\text{-(Bi,Ag)}$ и $\text{Si}(111)4\times4\text{-(Bi,Ag)}$ построены структурные модели. Установлено, что упорядоченная реконструкция $\text{Si}(111)4\times4\text{-(Bi,Ag)}$ обладает структурными и электронными характеристиками, аналогичными для поверхностного сплава BiAg_2 на поверхности $\text{Ag}(111)$, у которого в электронной структуре есть спин-расщеплённые поверхностные состояния.

2. Показано, что модификация системы Au/Si(111) адсорбатами из Na и Cs приводит к исчезновению доменных стенок и формированию структуры со свойствами двумерного электронного газа. Для структур на кремнии наблюдалось расщепление поверхностных металлических зон на спиновые подзоны, при этом величина расщепления по волновому вектору на уровне Ферми достигает $0,027^\circ\text{Å}^{-1}$ и по энергии – 110 мэВ.

3. Показано, что модификация системы Au/Si(111) адсорбатом Tl, а, также In, приводит к исчезновению доменных стенок и формированию структуры со свойствами двумерного электронного газа. Наблюдалось расщепление поверхностных металлических зон на спиновые подзоны, при этом величина расщепления по волновому вектору на уровне Ферми достигает $0,052^\circ\text{Å}^{-1}$ и по энергии – 190 мэВ.

Выводы и рекомендации, полученные в диссертации, имеют неоспоримую **практическую значимость** для науки и технике. Определено влияние условий формирования двумерной системы (Bi,Ag)/Si(111) на степень ее упорядоченности. Полученные новые пленки висмута и серебра на поверхности Si(111) обладают спин-расщеплёнными поверхностными состояниями, что может быть использовано при разработке элементов устройств для спинтроники. Главное преимущество таких устройств заключается в низком энергопотреблении и высокой скорости перехода спина из одного состояния в другое, что важно для быстродействующих компьютерных процессоров, сенсоров, и энергонезависимой памяти высокой плотности.

Для представленной работы характерно **внутреннее единство ее структуры**. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 119 страниц, включая 50 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 116

наименований. Повествование в тексте диссертации логически выстроено. В первой главе представлен обзор о строении и электронных свойствах реконструкций на поверхности чистого кремния, а также кремния, модифицированного атомами Au, Ag, Bi, In, кратко изложена суть эффекта Рашбы. Во второй главе описаны методики формирования двумерных структур и методы их исследования. В третьей главе представлены результаты исследования структурных особенностей и данные сканирующей туннельной спектроскопии новых двумерных Ag-Bi сплавов на поверхности Si(111). Модификация структурных и электронных свойств системы Au/Si(111) в зависимости от природы адсорбента (Na, Cs, In, Tl) изложена в четвертой главе. На приведенных иллюстрациях наглядно показано расщепление энергетических уровней по спину в исследуемых системах. В конце каждой главы имеются выводы. Заключение оформлено в форме обобщенных выводов по всей работе. Текст автореферата согласуется с повествованием диссертационной работы.

Полученные в ходе выполнения исследований **результаты** полностью **соответствуют поставленной цели и задачам**. Содержание диссертации в достаточной мере представлено в научных публикациях в высокорейтинговых научных журналах. Основные результаты работы доложены на международных конференциях в Японии и Корее, а также российских конференциях по наноструктурным полупроводниковым и магнитным материалам.

К изложению работы имеется **ряд критических замечаний**:

1. В третьей главе на стр. 82-83 упоминается о расчетах из первых принципов функционала плотности состояний, на основании которых определялась энергетически выгодная позиция для атомов натрия. Однако во второй главе, содержащей описание методов исследования, методика данных расчетов не приведена.

2. В третьей главе изложены результаты исследований методами СТМ и ДМЭ двумерных структур Ag-Bi, но, исходя из внутреннего единства диссертации, не упомянуты какие-нибудь исследования методом ФЭСУР – или причина отсутствия таковых.

3. В начале главы 4 присутствует повторное повествование об эффекте Рашбы и о материалах, в которых он наблюдается. Этот текст было бы целесообразно расположить в литературном обзоре, в разделе 1.4.

4. В четвёртой главе приводится сравнение с реконструкциями из атомов In, и даны её некоторые характеристики, хотя предоставленных о ней данных мало.

5. В четвёртой главе приведены результаты исследований о смещении положения уровня Ферми под влиянием адсорбатов, но только в виде данных

ФЭСУР и диаграмм. Однако стоило бы упомянуть какие-либо данные других методов исследования, таких как СТМ и ДМЭ.

6. В бумажном варианте некоторые иллюстрации (рисунки 3.6, 4.1, 4.3) имеют насыщенный темный фон, поэтому трудно различить изображенные на них объекты и надписи.

7. Ссылки на некоторые рисунки в тексте диссертации приводятся позже, чем сами иллюстрации.

Тем не менее, следует отметить, что перечисленные недостатки не влияют на высокий уровень результатов проведенных исследований.

В целом, диссертационная работа по ее содержанию, объему, достоверности полученных результатов и новизне соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Яковлев Алексей Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Кандидат физ.-мат. наук по специальности
01.04.07 – «физика конденсированного состояния»,
доцент по специальности «физика конденсированного состояния»,
заведующий лабораторией функциональных материалов и покрытий
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института материаловедения Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения
Российской академии наук



Пячин Сергей Анатольевич

« 9 » ноября 2016 г.

680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153
ФГБУН Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН
тел. (4212)22-65-98, e-mail: pyachin@mail.ru

Подпись Пячина С.А. заверяю

Ученый секретарь института



Бару Любовь Лазаревна