

УТВЕРЖДАЮ:

“21” ноября 2016 г.

Директор
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института общей физики им. А.М.Прохорова
Российской академии наук



И.А. ЩЕРБАКОВ

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Яковлева Алексея Андреевича «**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

Представленная диссертационная работа Яковлева А.А является интересным экспериментальным исследованием, направленным на создание двумерных систем со спиновым расщеплением на поверхности кремния. Учитывая, что планарные технологии современной микроэлектроники практически достигли своего пространственного предела (20 нм), а характерная толщина слоев, которые обычно относят к поверхности, $1\div 4$ нм, то усилия многих научных групп направлены на разработку новых двумерных материалов с заданными свойствами: транспортными, магнитными, структурными и т.п. – на основе которых могут быть созданы и новые приборы, и новые технологии. Несмотря на прогресс в создании углеродных материалов (графены) и других слоистых систем с вандерваальсовскими связями между слоями, поверхность кремния является именно тем плацдармом, на котором могут и должны разрабатываться новые технологии синтетических двумерных материалов путем адсорбции и коадсорбции активных газов (галогены, кислород), комбинированного нанесения металлов и полупроводников, причем желательно создавать

двумерные системы, состоящие из одного-двух моноатомных слоев. Безусловно, такие исследования представляют собой исключительно важный и необходимый этап развития технологий атомного масштаба.

Данная диссертация посвящена разработке технологических приемов и изучению получаемых атомных структур при комбинированном осаждении металлов с различными свойствами, таких Ag, Au с одной стороны и Na, Cs, Bi, Tl - с другой, на поверхности Si(111). Исходная идея работы – создать однородные упорядоченные слои (1-2 монослоя) с большим спиновым расщеплением, для чего использовались материалы с большим атомным номером (Bi, Tl, Au), и провести исследование атомной, электронной и спиновой структуры синтезированного материала.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 116-ти наименований. Во Введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость основных результатов и выводов, представлены основные научные положения, выносимые на защиту. В Первой главе сделан обзор атомных поверхностных реконструкций на поверхности Si(111), включая реконструкцию (7x7) чистой поверхности, а также реконструкций, индуцированных отдельным адсорбатом (Au или Ag или Bi). Также обсуждается трехкомпонентная система $\text{Si}(111)h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au, In)}$, представляющая пример формирования бинарной адсорбционной двумерной структуры, взятой в качестве базовой для создания новых аналогичных систем. Также здесь рассмотрен эффект Рашбы и обсуждены возможные пути создания двумерной системы с большим спиновым расщеплением.

Вторая глава посвящена описанию методик создания поверхностных объектов и их исследования, а также основных экспериментальных методов анализа, таких как сканирующая туннельная микроскопия/спектроскопия, дифракция электронов, фотоэмиссия с угловым и спиновым разрешением и представлено экспериментальное оборудование, использованное в работе. В

качестве основного метода анализа электронной структуры автор использует ультрафиолетовую фотоэлектронную спектроскопию с угловым и спиновым разрешением для записи дисперсионных кривых в валентной зоне, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию и локальную (сканирующую) туннельную спектроскопию. Для структурной идентификации поверхностных соединений в диссертации используется дифракция медленных электронов и сканирующая туннельная микроскопия с атомным разрешением. Следует признать, что автор задействовал очень мощный экспериментальный арсенал. Уникальным является применение фотоэмиссии со спиновым разрешением совместно с характеристикой поверхностного объекта на атомном уровне, что и определило очень высокое качество полученных экспериментальных результатов.

В Третьей главе представлены оригинальные результаты исследования поверхностных сплавов на основе металлов Ag и Bi. Автором подобраны условия создания новых упорядоченных бинарных систем $\sqrt{19} \times \sqrt{19}$, 4×4 , $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ и других на поверхности Si(111) и проведено тщательное изучение атомной структуры в прямом пространстве с использованием СТМ и особенностей электронного спектра вблизи уровня Ферми с использованием СТС. Показано, что поверхностный сплав Si/Ag/Bi со структурой $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ обладает полупроводниковыми свойствами, а сплавы со структурами $\sqrt{19} \times \sqrt{19}$ и 4×4 - металлическими. Сопоставляя экспериментальные данные с результатами моделирования на основе теории функционала плотности (ТФП), автор высказывает обоснованное предположение о том, что данные структуры ($\sqrt{19} \times \sqrt{19}$ и 4×4) представляют собой монослой Ag(111), развернутый относительно подложки Si(111), в котором часть атомов серебра заменена на атомы висмута.

В Четвертой главе рассматривается модификация атомной и электронной структуры в исходной системе Si(111)/Au путем добавки металлов (Me) Na, Cs, Tl, In при соответствующем термопрограммируемом режиме синтеза структур. В результате удастся создать несколько новых

поверхностных реконструкций типа $\text{Si}(111)h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}(\text{Au}, \text{Me})$. В зависимости от типа адсорбата (Me) происходит изменение как атомной структуры (исчезают исходные доменные стенки), так и электронной структуры – наблюдается расщепление поверхностных состояний S_1 .

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, в первую очередь, четкость постановки задач, экспериментальную аккуратность в реализации измерений, хорошее владение используемыми экспериментальными методами, понимание их возможностей и ограничений. Все выводы работы имеют серьезное обоснование. Применение таких мощных методов как ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением, сканирующая туннельная микроскопия/спектроскопия с атомным разрешением наряду с теоретическим моделированием на основе теории функционала плотности позволило сделать тонкие наблюдения и достаточно обоснованные выводы для очень сложных исследуемых систем. Все защищаемые положения диссертации достаточно надежно аргументированы.

Тем не менее, к работе имеются замечания и вопросы:

1. Более корректным является использование термина «степень покрытия», а не «покрытие», поскольку речь идет о количественной характеристике осажденного (адсорбированного) материала.
2. В главе 4 наблюдается достаточно сильное спиновое расщепление в структурах $\text{Si}(111)h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}(\text{Au}, \text{Me})$, но не обсуждаются вклады в расщепление от атомов золота и дополнительных атомов Na, Tl, In или Cs, хотя сами эти атомы обладают сильно различающимся спин-орбитальным взаимодействием.

Заключение. Полученные А.А. Яковлевым результаты могут быть использованы в таких организациях как Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Институт проблем технологии материалов РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт физики

микроструктур РАН, Институт автоматики и проблем управления ДВО РАН, Квантовый Центр в Сколково, Институт физики твердого тела РАН, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институт физики полупроводников СО РАН.

Автореферат и опубликованные работы правильно отражают содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в трех журнальных статьях в высокорейтинговых журналах (Scientific Reports, Journal of Physics: Condensed Matter, Surface Science) из перечня ВАК и базы данных Web of Science и представлены на многих национальных и международных конференциях. По своей новизне и практической значимости диссертационная работа А.А. Яковлева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной и важной задачи физики полупроводников: *выявлены и экспериментально изучены особенности атомной, электронной и спиновой структуры бинарных адсорбционных систем на поверхности кремния.*

Считаю, что содержание работы и форма его представления соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Алексей Андреевич Яковлев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доклад по результатам диссертационной работы заслушан на семинаре отдела технологий и измерений атомного масштаба Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН 28.10.2016 г.

Отзыв составил:

Зав. отделом технологий и измерений атомного масштаба
д.ф.-м.н.

К.Н. Ельцов

ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

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

Эл.почта: eltsov@kapella.gpi.ru