

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Яковлева Алексея Андреевича по теме: «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.

Прогресс современной микроэлектроники связан с поиском новых решений при построении активных и пассивных ее элементов при постоянном уменьшении их элементов и уменьшении потребления энергии. Одним из перспективных подходов здесь является использование спин-зависимого тока в элементах спинтроники, направление которой сформировалась в последние 20 лет и элементы которой сейчас широко используются на практике, например, в магнитных головках для записи/считывания информации с магнитных дисков. Это направление подразумевает управление спином электрона посредством внешнего магнитного поля, и тем, самым, возможностью модулирования спинового тока. В последние годы появилась возможность влиять на спин электрона не посредством магнитного поля, что сложно исполнять на наноуровне, а посредством спин-орбитального взаимодействия, благодаря релятивистскому эффекту Рашбы, в котором происходит расщепление зонной структуры данного материала в зависимости от направления спина. Круг материалов, в которых наблюдается эффект Рашбы, в настоящее время мал, поэтому поиск новых двумерных структур с существенным спиновым расщеплением становится актуальной задачей. При этом для нужд электроники и спинтроники необходимо иметь такой поверхностный материал, на проводимость которого бы не влияла (через шунтирование) проводимость подложки (металла). Поэтому с целью создания устройств спинтроники необходимо использовать полупроводниковые подложки, совместимые с текущими или разрабатываемыми технологиями. Одним из многообещающих путей синтеза таких двумерных материалов для спинтроники является синтез пленок металлов на поверхностях кремния с полупроводниковыми свойствами, который де-факто является основой современной микроэлектроники и технология изготовления пленок и поверхностей которого хорошо развита.

Диссертационная работа Яковлева А.А. как раз и была посвящена исследованиям в таком направлении, а именно-экспериментальному исследованию двумерных структур с заданными свойствами и со спин-расщепленными состояниями на модифицированной поверх-

ности кремния Si(111). Им были поставлены задачи исследования структурных и электронных свойств двумерных сплавов, состоящих из атомов Bi и Ag на поверхности Si(111), а также изучение влияния атомов Na, Tl и Cs на структурные и электронные свойства поверхностных реконструкций системы Au/Si(111).

К основным результатам работы, представляющим несомненную научную ценность, следует отнести следующие:

- Были исследованы структурные и электронные свойства новых двумерных поверхностных сплавов Bi-Ag на поверхности Si(111), имеющих различную периодичность, в т.ч. квазипериодических. Установлено, что упорядоченная реконструкция Si(111) 4×4 -(Bi,Ag) обладает структурными и электронными свойствами, аналогичными свойствам известного поверхностного сплава BiAg₂ на поверхности Ag(111), у которого в электронной структуре есть спин-расщеплённые поверхностные состояния из-за эффект Рашбы.
- Показано, что модификация системы Au/Si(111) адсорбатами из элементов I группы, Na и Cs, приводит к исчезновению доменных стенок и формированию структуры со свойствами двумерного электронного газа, при этом наблюдалось расщепление поверхностных металлических зон на спиновые подзоны.
- Показано, что модификация системы Au/Si(111) адсорбатом Tl, также как для другого адсорбата из этой группы, In, приводит к исчезновению доменных стенок и формированию структуры со свойствами двумерного электронного газа, при этом также наблюдалось расщепление поверхностных металлических зон на спиновые подзоны.

Практическая значимость работы заключается в том, что в ней были экспериментально созданы новые двумерные сплавы на основе реконструкций висмута и золота на поверхности кремния Si(111). Также в ней были получены новые двумерные покрытия Bi-Ag на этой же поверхности кремния, обладающие спин-расщеплёнными поверхностными состояниями. На примере модификации реконструкции Si(111) $_{-\sqrt{3}\times\sqrt{3}}$ -Au было продемонстрировано качественное улучшение структурных и электронных свойств, в частности, существенное снижение плотности дефектов на поверхности и формирование спин-расщеплённых поверхностных состояний. Формирование таких низкодефектных поверхностных слоев является крайне важным для нужд изготовления устройств спинтроники и электроники.

Результаты работы в дальнейшем могут быть использованы для исследований в области спинтроники и для создания прототипов новых устройств и приборов.

Очень интересным, на наш взгляд, результатом работы, который не был никак обсужден, является определение факта того, что “средняя эффективная масса электронов в системе $\text{Si}(111)h\text{-}\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,Na)}$ около уровня Ферми была определена как $(0,028\pm0,006)$ m_e , что в 10 раз меньше, чем эффективная масса электронов до адсорбции атомов Na – $0,3m_e$ (стр. 87 диссертации)” Такая низкая величина эффективной массы электрона может быть использована на практике для создания высокоскоростных переключательных элементов нанoeлектроники и дальнейшие исследования в этой области представляются весьма желательными.

Из недостатков работы следует указать, что в тексте были использованы некоторые неправильные термины и выражения. Например – преобразования Лоуренса вместо Лоренца (стр. 33 диссертации); “...величина этого эффективного магнитного поля, и следовательно, значение энергии расщепления зависят от момента импульса... “(необходимо использовать – от импульса) (стр. 34 диссертации); на стр. 33 диссертации написано “В условиях магнитного поля появляется симметрия по отношению к обращению времени, то есть $E(k, \uparrow) = E(k, \downarrow)$ ”, и где должно было быть- исчезает, и некоторые другие.

Данные замечания не умаляют общей, безусловно, положительной оценки диссертационной работы Яковлева Алексея Андреевича. Диссертант провел обширный анализ литературных данных по теме исследования, провел основную часть экспериментов на самом высоком уровне, о чем говорят полученные многочисленные рисунки и графики, выполнил обработку и анализ экспериментальных данных.

Работа в данной области потребовали от диссертанта хорошего понимания физических концепций физики поверхностных состояний, а также владения несколькими современными экспериментальными методиками исследования таких систем.

Диссертация Яковлева А. А. также оставляет хорошее впечатление объемом проделанной работы и полученными в ней результатами. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивалась наличием аттестованного высококачественного оборудования для синтеза таких систем и нескольких апробированных экспериментальных методик исследования, что было подтверждено воспроизводимостью полученных результатов..

Изложенные в диссертации Яковлева А. А. положения, установленные закономерности и сделанные соискателем выводы в целом обоснованы и способствуют углублению

представлений о формировании, структуре и свойствах поверхностных слоев на кремнии Si(111). Материалы диссертации неоднократно были доложены на многих международных и отечественных конференциях и научных школах-семинарах. Основное содержание диссертации было опубликовано в 3 статьях в международных академических журналах, правильно отражено в автореферате. Диссертация Яковлева А. А. написана грамотным техническим языком, является законченным квалификационным научным исследованием и вносит существенный вклад в развитие представлений о процессах, происходящих при формировании нанослоев металлов на подложке кремния.

Считаю, что диссертационная работа Яковлева Алексея Андреевича «Структура и свойства поверхностных реконструкций Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Bi и Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, модифицированных атомами металлов» по объему проделанной работы, основным положениям, выносимым на защиту, и выявленным закономерностям отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор - Яковлев Алексей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Старший научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

д.ф.-м.н.(специальность 01.04.07), доцент  Александр Семенович Федоров

т: (391)2494965, г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 38, email: alex99@iph.krasn.ru

