

О Т З Ы В
официального оппонента на диссертацию
ЦУКАНОВА Дмитрия Анатольевича
*"Электрическая проводимость наноструктур на реконструированных
поверхностях кремния"*, представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.04.10 – "Физика полупроводников"

Современный этап развития электроники требует разработки технологий создания твердотельных структур нанометрового (и даже атомного!) масштаба и проведения исследований их свойств на таком же уровне. Диссертационная работа Д.А. Цуканова посвящена детальному исследованию электрической проводимости наноструктур и субмонослойных пленок адсорбатов на подложках Si(111) и Si(100) с реконструированными поверхностями и определению влияния поверхностных реконструкций на электрические свойства приповерхностной области подложек. Такие исследования безусловно актуальны для решения фундаментальных проблем физики наноструктур, так как несут ценную информацию о локальных взаимодействиях, электронных свойствах двумерных структур, одноэлектронных и квантоворазмерных эффектах, и являются новым направлением в атомно-масштабной физике поверхности твердого тела. Более того, подобные работы важны и для решения прикладных задач, так как имеют прямое отношение к разработке перспективных нанотехнологий, новым методам синтеза функциональных элементов, получению квантовых наноструктур и созданию на их основе опто- и наноэлектронных приборов нового поколения.

Для проведения этих исследований диссидентом разработан четырехзондовый метод измерения поверхностной проводимости упорядоченных слоев адсорбатов в условиях сверхвысокого вакуума, позволивший экспериментально изучать электрическую проводимость поверхностей Si(100) и Si(111) с различными поверхностными фазами и наноструктурами, а также установить влияние этих покрытий на электропроводность подложки. К новым результатам, приведенным в диссертации, относятся обнаружение влияния дефектов кристаллической структуры поверхностных фаз и морфологии поверхности на электропроводность приповерхностной области, а также впервые обнаруженное воздействие структурно-фазовых превращений в двумерных упорядоченных пленках адсорбатов на электрическую проводимость. Кроме того, автором показана возможность управления свойствами двумерных пленок с целью получения требуемого значения электропроводности.

Сама диссертация (338 страниц текста, включая 131 рисунков) состоит из введения, пяти глав, заключения и обширного библиографического списка из 657 наименований.

Первая глава работы посвящена подробному изложению характеристик поверхностных фаз на кремнии, включая их кристаллическую и электронную структуру, и методам их исследования. В разделе 1.2.1 изложены основные представления двумерной кристаллографии поверхности полупроводников, в разделах 1.2.2–1.2.3 – свойства квантовых наноструктур и поверхностных фаз, в разделе 1.3 подробно рассмотрены проблемы электронного транспорта в упорядоченных поверхностных структурах. При этом автором продемонстрировано безусловное умение анализировать и обобщать результаты, известные из литературных данных. В разделе 1.4 описаны конструкции экспериментальных установок (сверхвысоковакуумные камеры, криостаты, прецизионные манипуляторы, четырехзондовые головки) и методы (дифракция медленных электронов и сканирующая тунNELьная микроскопия), использованные диссертантом в процессе выполнения работы, а в разделе 1.5 подробно излагается и обсуждается процедура проведения измерений поверхностной проводимости.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования электрической проводимости поверхностных структур на Si(100) и Si(111) подложках. В разделе 2.2 обсуждается влияние поверхностных реконструкций, образованных на поверхности Si(100) при нанесении атомов адсорбата (Au, Na, Al, In), на электропроводность подложки, а в разделе 2.3 – обсуждается электропроводность поверхностных фаз с участием различных адсорбатов (Au, Ag, Cu, In, Pb, Sn, Fe, Cr, Mg) на поверхности Si(111). Следует отметить проведенный автором детальный анализ многочисленных результатов, полученных для Si(111) подложки, их обобщение и сравнение с имеющимися литературными данными, а также развивающую им концепцию двух компонент электрической проводимости полупроводниковой подложки, покрытой субмонослойной металлической пленкой: проводимость через объемную подложку и проводимость через поверхностную фазу, играющую роль дополнительного канала проводимости.

Заметно выделяющаяся среди остальных третья глава целиком посвящена исследованию влиянию дефектов кристаллической решетки (в частности, структурного качества поверхности) и морфологии поверхности на электропроводность реконструированной поверхности. Как оказалось, нарушение упорядоченной структуры поверхностных фаз, например, при экспозиции в атмосфере молекулярного кислорода, атомарного водорода или на воздухе, приводит к уменьшению электропроводности подложки. При этом сама реконструированная поверхность может содержать дефекты типа доменных границ, обусловленные несоответствием решеток, или поликристаллическим ростом при эпитаксии.

В четвертой главе диссертации рассматриваются способы управляемой модификации электропроводности поверхностных наноструктур, что важно для

практического использования поверхностных фаз при создании новых наноэлектронных устройств. В первом разделе рассмотрены результаты исследования проводимости трехкомпонентных поверхностных фаз, включающих в состав кроме атомов Si еще две компоненты (Au-Ag, Au-In или Au-Na). При исследовании системы Au,In/Si(111) установлено, что адсорбция 0,15 монослоя In или 0,1 монослоя Na на реконструкцию Si(111)- $a-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, характеризующуюся большим количеством доменных стенок, с последующим ее отжигом при 600 °C снимает напряжение решетки благодаря удалению доменных границ, формируя гладкую поверхность Si(111)- $h-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,In) или Si(111)- $h-\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -(Au,Na), и приводит к увеличению электропроводности, однако дальнейший рост In-покрытия (>0,7-0,8 монослоев) ведет к ее уменьшению, связанному с образованием островков и дополнительному рассеянию на них носителей тока, а также увеличению плотности заряда в зоне S₁ поверхностных состояний. В то же время рост Na-покрытия приводил к уменьшению проводимости из-за снижения плотности состояний в зоне S₁. Диссертантом предложен и другой подход к управлению электропроводностью Si-подложки на атомном уровне путем регулирования стехиометрического состава поверхностной фазы. Так, для реконструкции Si(111)- $\sqrt{21}\times\sqrt{21}$ -(Au,Ag) в зависимости от соотношения количества атомов золота и серебра установлена корреляция между отношением числа электронов проводимости к числу атомов и ее кристаллической структурой.

И, наконец, в последней, пятой главе диссертации приведены результаты исследования электрической проводимостиnanoструктур (сверхтонких пленок и нанопроволок) на поверхностях кремния Si(001) и Si(111) с различными реконструкциями, что актуально для практических приложений в наноэлектронике. Так, электропроводность даже монослойной пленки золота на поверхности Si(001) носит перколяционный характер и оказывается на два порядка меньше, чем для объемного Au благодаря большому количеству дефектов, а также проявлению размерного эффекта. Диссертантом показано, что поверхностные реконструкции могут различным образом влиять на механизмы роста пленок и тем самым определять их электрические свойства, что убедительно продемонстрировано на примере систем In/Si(111), Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In, Si(111) $\sqrt{31}\times\sqrt{31}$ -In, Si(111)4 $\times 1$ -In, Si(111) $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ -In. Эксперименты с поверхностной фазой Si(111)-5,55 \times 5,55-Cu, блокирующей образование силицидов и играющей роль модификатора поверхности, позволили установить влияние морфологии адсорбированной пленки на ее проводимость, а также обнаружить стабильную по отношению к экспозиции в кислороде слоистую структуру Au/Si(111)5,55 \times 5,55-Cu. На этой же поверхности с использованием рельефа подложки при нанесении 15 монослоев Cu ав-

тору удалось вырастить массив нанопроволок меди и обнаружить анизотропию его электропроводности.

Особое место в этой главе занимает раздел 3, где описано влияние молекул фуллерена C_{60} на проводимость реконструированной поверхности Si(111). На чистой поверхности Si(111) и поверхности Si(111) 3×1 -Na адсорбция этих молекул, проявляющих акцепторные свойства, приводила к возрастанию электропроводности благодаря образованию канала проводимости по фуллереновой пленке, но на подложке с “металлической” поверхностью Si(111) 5×2 -Au наблюдался обратный эффект. Для поверхностной фазы Si(111)- α - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, где взаимодействие молекул C_{60} с подложкой выражено гораздо слабее, изменений электропроводности обнаружено не было. Вместе с тем осаждение атомов металлов (Ag, Au, Na) на поверхность фуллереновой пленки приводило к образованию обогащенного носителями тока объемного заряда в приповерхностной области слоя с фазой Si(111)- α - $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Au, так что формирование канала проводимости начинало происходить при больших степенях покрытия адсорбатом, причем в случае адсорбции натрия могла контролируемым образом образоваться сверхтонкая пленка фуллерида Na_2C_{60} и этим процессом можно было управлять.

Таким образом, Д.А. Цукановым получен значительный объем новых результатов, достоверность которых обеспечена применением апробированных взаимодополняющих экспериментальных методов исследования и подходов, обоснованных математических моделей, а также соответствием этих результатов известным теоретическим и экспериментальным данным. В диссертации изложена четкая картина состояния технологий получения и современного научного представления о строении и свойствах твердотельныхnanoструктур. Работа заметно выделяется среди подобных широтой использования методов сверхвысоковакуумной СТМ при проведении экспериментов. Основные положения работы сформулированы и изложены ясным литературным языком, а ключевые термины и определения представлены в различных вариантах их использования в научной литературе. В работе получило заметное развитие новое научное направление по исследованию на атомном уровне электропроводности nanoструктур на реконструированных поверхностях кремния.

Однако диссертация Д.А. Цуканова не свободна от недостатков. Основные замечания по соответствующим разделам работы состоят в следующем.

По главе 1.

1. В диссертации утверждается, что при измерении поверхностной проводимо-

сти подложек с реконструированной поверхностью необходимо учитывать анизотропию проводимости, то есть зависимость электропроводности от азимутального угла, в направлении которого пропускается ток (раздел 1.5.5). Однако такие измерения были выполнены только для субмонослоиной системы In/Si(111), а именно поверхностных реконструкций $\text{Si}(111)\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-In}$ и $\text{Si}(111)4\times1\text{-In}$, где эта зависимость выражена явно, в то время как для других поверхностных реконструкций измерения анизотропии поверхности проводимости проведены не проводились.

2. Кроме этого, для полноты картины представляется целесообразным добавить результаты измерений температурной зависимости поверхностной проводимости для всех упомянутых в работе поверхностных реконструкций, что позволило бы оценить характер их проводимости – металлический или полупроводниковый.

По главе 2.

3. В разделе 2.2.4, посвященном исследованию электрической проводимости поверхностной фазы $\text{Si}(100)2\times3\text{-Na}$, в постановке задачи говорится, что формирование данной реконструкции сопровождается перестройкой нижележащих слоев кремния, в отличие от реконструкций 2×3 , образуемых на поверхности $\text{Si}(100)$ атомами K, Cs, Ba, Sr (стр. 93). При этом, однако, для этих реконструкций измерения поверхностной проводимости не проводились. Поэтому утверждение, что шероховатость поверхности $\text{Si}(100)2\times3\text{-Na}$ приводит к уменьшению поверхностной проводимости такой подложки, не является убедительным без сравнения с результатами исследования упомянутых систем.

По главе 5.

4. Измерения электрической проводимости сверхтонких плёнок фуллеренов на подложке Si(111) представляют значительный интерес, в частности, для молекуллярной микроэлектроники, поэтому представленные в разделе 5.4 результаты исследований важны для практического применения. Однако, для полноты картины явно не хватает результатов исследования адсорбции других щелочных металлов на сверхтонкие слои фуллера C_{60} , например, рубидия или калия, фуллериды которых были бы интересны для изучения металлической проводимости, а также проявления низкотемпературной сверхпроводимости.

Тем не менее, учитывая широту охвата исследованных вопросов и большой объем проделанной работы, эти замечания скорее можно считать пожеланиями. Они не снижают общей высокой оценки научного уровня проведенных исследований. Работа прекрасно иллюстрирует развитие методики сверхвысоковакуумной сканирующей микроскопии и блестяще показывает успехи этого

развития многими приложениями. Материалы диссертации докладывались на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, хорошо известны и одобрены научной общественностью, достаточно полно (27 статей) представлены в специализированных высокорейтинговых научных журналах, защищены двумя патентами РФ. Все новые результаты, сформулированные положения и выводы, выносимые на защиту, не вызывают возражений. Автореферат диссертации хорошо отражает её основное содержание.

Считаю, что представленная работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам Дмитрий Анатольевич Цуканов в полной мере заслуживает присуждения ему искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – “Физика полупроводников”.

Заведующий кафедрой физической электроники и нанофизики Башкирского государственного университета, доктор физико-математических наук,

профессор



Ган

Р.З. Бахтизин

Подпись Бахтизин Р.З.
Заверяю: ученый секретарь БашГУ
Бахтизин
« 30 » декабря 2013 г.