

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Дмитрия Анатольевича Цуканова «Электрическая проводимость наноструктур на реконструированных поверхностях кремния», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников

Наноструктуры на поверхности полупроводников уже много лет являются объектом пристального внимания исследователей, занятых созданием физических основ нанoeлектроники, и в первую очередь это касается кремния — основного материала в производстве интегральных схем. Главным же физическим процессом, лежащим в основе работы интегральных схем, является движение электрических зарядов — электронов и дырок. Исследование проводимости наноструктур на поверхности кремния — необходимый и важный шаг на пути к созданию принципиально новых полупроводниковых приборов, отличающихся высочайшей компактностью и быстродействием. Поэтому **актуальность работы Д.И. Цуканова не вызывает сомнения.**

Диссертация состоит из 338 страниц, включая 131 рисунок и список цитированной литературы из 657 (!) наименований. Исследования, вошедшие в нее, выполнялись в течение 16 лет и опубликованы в 27 статьях и обсуждены на многих международных и российских конференциях. **Методика исследования** основана на изучении поверхности кремния и различных наноструктур на ней в условии сверхвысокого вакуума с использованием таких апробированных методов как дифракция медленных электронов, сканирующая туннельная микроскопия, а также **разработанный диссертантом четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления в условиях сверхвысокого вакуума.**

Диссертантом сформулировано **семь защищаемых положений.** Их обоснованность и достоверность определяется взаимодополняемостью использованных методов исследования, а также сопоставлением полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Основные результаты и выводы состоят из 11 разделов. Каждый из них носит частный характер и касается условий электрической проводимости конкретных наносистем и наноструктур на кремнии, поэтому нет особого смысла обсуждать их в отдельности. Обобщая же результаты, можно видеть, что нанесение на кремний атомов различных металлов как правило приводит к увеличению электрической проводимости, однако в отдельных случаях проводимость, напротив, падает. В каждом случае автор дает разумное объяснение наблюдаемым эффектам, связывая их либо с изменениями плотности состояний на уровне Ферми, либо с особенностями формируемой структуры поверхности и

нанообразований на ней. Отсюда следует, что **неких единых рекомендаций по управлению электрической проводимостью наносистем на кремнии выработать нельзя, поэтому разработчики будущих технологий нанoeлектроники должны уделять тщательное внимание составу и строению наноструктур на поверхности кремния и подходить к каждому случаю индивидуально.**

Работа Д.А. Цуканова отличается высокой цельностью и единством, в ней нет ничего лишнего, вся она подчинена единой цели: исследованию электрической проводимости наноструктур и сверхтонких пленок адсорбатов на подложках кремния Si(100) и Si(111) с реконструированной поверхностью и определение влияния поверхностных реконструкций и наноструктур на электрические свойства приповерхностной области подложек. Все изложенные в работе **результаты соответствуют этой цели и решению сформулированных в ней задач.**

Научная новизна работы заключается в создании нового научного направления в области физики наноструктур, связанного с изучением процессов электрической проводимости в периодических реконструкциях на поверхности кремния, а также наноструктур, сформированных на такой поверхности. Автором предложено рассматривать поверхностные фазы на кремнии как дополнительные каналы проводимости, в которых электрический ток протекает в направлении, параллельном поверхности подложки, им **изложены многочисленные экспериментальные результаты, имеющие мировую новизну, опубликованные в том числе в таких авторитетных журналах как Успехи физических наук, Physical Review, Известия Академии наук, Физика и техника полупроводников, Surface Science и др.**

Текст диссертации радует хорошим стилем, редкой в наше время грамотностью, список цитированной литературы демонстрирует глубокие знания диссертанта в области физики полупроводников и методик исследования. В качестве недостатков можно отметить некую вольность в использовании понятия **подложка**. Диссертант неоднократно пишет, что **проводимость подложки изменяется после нанесения на нее адсорбата**. Это в корне неверно. Подложка — это то, что имелось до нанесения адсорбата — пластина чистого кремния или пластина кремния с предварительным адсорбатом. Проводимость подложки есть величина **неизменная**. Именно она вычитается из проводимости общей системы «подложка+адсорбат». Поэтому следует говорить просто об изменении измеряемой проводимости вследствие изменения системы. У меня же в этой связи возникает вопрос: а как изменится проводимость той или иной изученной наносистемы, если ее извлечь из вакуумной камеры? Или покрыть какой-то защитной пленкой? Ведь, в конце концов, технологам придется это делать. Впрочем, это уже из области пожеланий на будущее. Однако

напрашивается и другой вопрос, имеющий непосредственное отношение к результатам диссертанта: подробно обсудив в первой главе особенности электронной и дырочной проводимости, Д.А. Цуканов в остальных главах своей работы ни разу не задумывается: к какому же типу относится измеряемая им проводимость? А ведь он не может не понимать всю важность ответа на этот вопрос для приборных приложений его результатов.

Бросается в глаза также мелкая оформительская неряшливость: соблюдая в тексте обязательное для российской научной литературы правило об использовании **запятой** как разделителя целых и дробных частей в числовых данных, автор ставит англоязычную **точку** в числах на осях графиков.

Сделанные мной замечания ни в коей степени не умаляют достоинства данной диссертации, которая вполне соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, и я считаю, что ее автор, Дмитрий Анатольевич Цуканов, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой степени.

16 декабря 2013 года

Доктор физико-математических наук,
профессор, директор Института материаловедения
ХНЦ ДВО РАН

В.Г. Заводинский

Подпись В.Г. Заводинского заверяю:
Ученый секретарь ИМ ХНЦ ДВО РАН

Л.Л. Бару