

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Спивак Юлии Михайловны на тему “Атомно-молекулярный дизайн наноструктурированных материалов и наноконпозиций. Синтез, контроль технологии, свойства и применение”, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 –Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

1. Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время активно развивается направление в материаловедении, связанное с созданием сложных многокомпонентных наноматериалов, обладающих иерархическим строением. Такие материалы, за счет особенностей наноструктурирования, различных эффектов на интерфейсах, сложного иерархического строения и разной функциональности уровней иерархии, наличия пористости и т.п. особенностям потенциально позволят значительно расширить спектр свойств новых материалов, синтезировать новые материалы, не существующие в природе, улучшить рабочие характеристики приборных структур на основе таких материалов. Для успешного продвижения в данном направлении необходимо развитие как технологических подходов к созданию таких материалов, так и методов диагностики. Методы на основе сканирующей зондовой микроскопии к настоящему времени уже зарекомендовали себя как мощный инструмент качественного и количественного исследования наноматериалов различной природы и приборных структур на их основе.

С этой точки зрения, предлагаемый в работе подход к исследованию такого рода материалов за счет комбинирования различного рода технологических воздействий (химическое травление, химическая обработка, отжиги, закалка при низких температурах и т.п.) и различных методик на основе атомно-силовой микроскопии с учетом физико-химических и механических особенностей разрабатываемого материала позволяет выявить особенности свойств и строения сложных многокомпонентных материалов с иерархическим строением, недоступные другими способами. Предлагаемый подход апробирован на широком круге материалов, в первую очередь полупроводниковых, таких как наноструктурированные твердые растворы соединений группы $A^{IV}B^{VI}$, гетероэпитаксиальные слои и приборные структуры на основе $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$, пористый кремний и композиционные материалы на его основе, актуальные для ИК-оптоэлектроники, микро- и нанoeлектроники, сенсорики, альтернативной энергетики, медицины.

Таким образом, тема работы, посвященная разработке комплекса новых методов и подходов по атомно-молекулярному дизайну иерархических наноматериалов и методов их диагностики на основе атомно-силовой микроскопии, является актуальной и представляет научный и практический интерес.

2. Научная новизна и практическая значимость работы

Основные научные результаты работы обладают научной новизной и практической значимостью. Из наиболее важных результатов необходимо выделить следующие:

- предложен оригинальный метод контроля формирования р-п перехода внутри зерен размером ≈ 80 нм сенсibilизированных наноструктурированных слоев халькогенидов свинца, на основе комбинации методов химического травления, последующего формирования туннельно-прозрачного оксидного слоя и регистрации локальных туннельных спектров, для создания оптимального дизайна фотоприемников для среднего ИК-диапазона, работающих при комнатной температуре;
- предложен оригинальный метод на основе сканирующей туннельной спектроскопии для контроля локального фазового состава оболочек собственных оксидов сенсibilизированных наноструктурированных слоев халькогенидов свинца для фотоприемников и излучателей среднего ИК-диапазона, работающих при комнатной температуре;
- разработан комбинированный метод, включающий методы атомно-силовой микроскопии, силовой литографии и латерально-силовой микроскопии, с помощью которого впервые выявлены особенности строения (пористость, перераспределение компонентов системы от центра к интерфейсу «полупроводниковое зерно-оксидная оболочка», определить толщину оксидной оболочки слоев) фотолюминесцентных слоев на основе твердого раствора PbCdSe , легированного йодом, что позволило сформулировать наиболее эффективные условия формирования и сенсibilизации таких слоев, предложить модель наиболее эффективного строения таких слоев;
- важной практической значимостью обладает предложенный в работе способ диагностики потенциальных отказов приборов на основе гетероэпитаксиальных структур на этапах тест-контроля в процессе производства за счет комбинирования методов прецизионного химического травления с последующим анализом методами атомно-силовой микроскопии (на примере рНЕМТ транзисторов);
- разработан зонд атомно-силовой микроскопии с функциональным покрытием на основе полианилина, свойство электропроводности которого можно направленно обратимо многократно «переключать» из проводящего в диэлектрическое состояние, что расширяет число методов атомно-силовой микроскопии, в которых можно применять зонды такого класса без их замены при переходе от методики к методике;
- предложен новый метод на основе атомно-силовой микроскопии, позволяющий проводить диагностику локального распределения адсорбционных центров (кислотных и основных центров Льюиса и Бренстеда), что имеет важное научное и практическое значение при разработке дизайна поверхности пористых материалов для последующего их инкорпорирования и инкапсулирования, а также широкого круга материалов для сенсорики, альтернативной энергетики, катализа, медицины и т.п.;
- получены экспериментальные зависимости по влиянию плотности тока анодирования на смачиваемость поверхности пористого кремния, состав и концентрацию адсорбционных центров, что позволило оптимизировать технологические условия для получения гидрофильных наночастиц пористого кремния для адресной доставки лекарств;

- разработанные гидрофильные наночастицы пористого кремния успешно применены в *in vivo* эксперименте по адресной доставке антибиотика ко внутреннему уху крысы при внутривенном интернировании наночастиц;
- в технологической части работы также следует отметить новую методику, позволяющую достигать равномерного распределения одного или нескольких заданных элементов в объем пористых материалов, включая микро-мезо-макропористые материалы со сложным иерархическим строением, за счет использования агента-носителя на основе фуллеренолов;

3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается грамотным обоснованием всех выводов и научных положений. В тех случаях, когда возможно сравнение с известными зависимостями, полученные результаты согласуются с литературными данными. Результаты диссертационной работы опираются на значительный объем экспериментальных данных, полученных на современном оборудовании, что обеспечивает надежность и обоснованность основных положений и выводов работы. Положительное впечатление оставляет внимательный подход к выбору условий сканирования.

4. Апробация работы

По теме диссертации опубликованы 43 научные статьи в ведущих российских и международных рецензируемых научных изданиях, 33 из них в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 10 научных статей опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus уровня Q1 и Q2. Результаты диссертации были широко представлены на международных и всероссийских научно-технических конференциях. Результаты диссертационной работы защищены 4 патентами на полезные модели, получены 3 свидетельства программ ЭВМ.

5. Общая характеристика работы

Диссертационная работа Спивак Юлии Михайловны на тему «Атомно-молекулярный дизайн наноструктурированных материалов и наноконпозиций. Синтез, контроль технологии, свойства и применение», представленная к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» является самостоятельным законченным научно-квалификационным исследованием и соответствует паспорту специальности.

Диссертация общим объемом 383 страницы состоит из введения, семи глав, заключения, 4 приложений и библиографического списка, который включает 531

наименование. Все главы являются оригинальными и содержат результаты экспериментальной работы.

Материал изложен последовательно и логично, диссертация написана грамотным научно-техническим языком. Текст автореферата соответствует основному содержанию работы. Диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, все поставленные в работе задачи выполнены.

6. Замечания

1. При исследовании приборных структур рНЕМТ транзисторов предложенным комбинированным методом выявления упруго-напряженных и деформированных участков на гетерогранице, было бы полезно привести сравнительные данные атомно-силовой микроскопии после их прецизионного химического травления для качественной и дефектной приборных структур.

2. Также остается неясным, каким образом технически контролировалась величина разности потенциала зонд-образец в эксперименте по детектированию областей с аномальным характером протекания тока в локальных областях в фотодиодных структурах In/PbTe(111)/CaF₂/Si при предварительной зарядке поверхности потенциалом противоположного знака и последующей смене полярности напряжения (точность относительно положения нулевого значения потенциала)

3. Автор пишет в диссертации на стр. 182: «На рис. 5.21 представлено изображение латеральной силовой спектроскопии, точки для силовой спектроскопии выбраны предположительно в области адсорбционных центров (1 и 3) и на поверхности пористого кремния (2 и 4). Как видно из рисунка, силовые кривые в точках 1 и 3 обладают значительным гистерезисом. В отличие от них, силовые кривые в точках 2 и 4 качественно и количественно близки силовым кривым, полученным для не функционализированных образцов por-Si».

На этом рисунке показано тоновое изображение карты латеральных сил и 4 графика с данными DFL(Z) - силовой спектроскопии (сигнал DFL соответствует нормальной силе), что отражено и в подписи к рисунку.

А. Не понятно о каком «...изображении латеральной силовой спектроскопии...» идет речь в приведенной выше цитате.

В. Что значит значительный гистерезис? Все представленные четыре нагрузочно-разгрузочных цикла силовых кривых имеют гистерезис. Т.е. точки 1 и 3 не отличаются от точек 2 и 4.

7. Заключение

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Диссертационная работа Спивак Ю.М. является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему, имеющим важное научное и практическое значение, полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор – Спивак Юлия Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.06 –Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

194021, Санкт Петербург, ул. Политехническая, дом 26, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Телефон: +7 (812) 297-2245, +7(931) 362-4317

E-mail: alexander.ankudinov@mail.ioffe.ru

Лаборатория физико-химических свойств полупроводников

Ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.,

Анкудинов Александр Витальевич


подпись автора отзыва

15 сентября 2022 год

Подпись доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника
Лаборатории физико-химических свойств полупроводников ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН
Анкудинова Александра Витальевича верна.

Зам. зав. отделом кадров
Н.С. Бузнецкая

