

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Леньшина Александра Сергеевича
«Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников»

В последние годы стремительно развиваются исследования физических явлений в наноструктурированных материалах. Устройства электронной техники, изготавливаемые из наноматериалов, должны обладать рядом преимуществ: малые габариты, управляющие напряжения и времена срабатывания. Для таких систем характерно проявление нелинейных свойств в чрезвычайно малых внешних полях, изменение температур фазовых превращений, проявление новых механизмов транспорта электрических зарядов (электропроводности, термоэдс, магнитосопротивления, магнитной термоэдс), возникновение большого магнитооптического эффекта и др. Очевидно, что сформировалось новое научное направление, одним из объектов которого являются конденсированные гетерогенные среды с неоднородностями структуры нанометрового масштаба. Особое место среди этих систем занимает пористый кремний (por-Si), наноконпозиты, тонкопленочные или гибридные структуры на его основе. Достаточно легко реализуемая возможность интеграции структур на пористом кремнии с промышленными технологиями электроники в едином устройстве предоставляет существенные преимущества по сравнению с другими подходами. На основе слоев пористого кремния, в зависимости от осаждаемого в поры материала, можно формировать оптические, сенсорные и магнитные структуры, лаборатории-на-чипе, фотонные кристаллы. Кроме того, управляя условиями формирования и постобработки, исследуемых в работе материалов можно существенно увеличить эффективность рабочих

характеристик изделий на основе этих материалов, расширить область применения и сроки использования. В связи с этим диссертация Леньшина А.С., представляющая крупную обобщающую работу по выявлению фундаментальных взаимосвязей между технологическими механизмами формирования широкого ряда композитных структур различного типа и их функциональными характеристиками является **актуальной**, важной и имеющей несомненный научный интерес.

Работа изложена подробно и ясно, а ее структура отличается логикой изложения и последовательностью от более простых объектов к более сложным. В результате масштабной работы с большим количеством объектов и привлечением самых современных аналитических методов автором получен ряд новых важных результатов. К основным результатам, полученным автором и имеющим **научную значимость**, следует отнести:

1. Разработаны оригинальные методики формирования и функционализации наноструктур и нанокомпозитов на основе пористого кремния, в том числе и органо-неорганических. На основе разработанных методик синтезируются различные структуры и установлены закономерности строения пористых слоев кремния с тремя уровнями размеров пор: макропоры (~100-250 нм), мезопоры (≤ 100 нм) и нанопоры (≤ 5 нм).

2. Предложены методики управления составом и эффектами деградации поверхности por-Si и его фотолюминесцентных свойств, связанные с внешними воздействиями и постобработками поверхности наноструктур пористого кремния. Установлена симбатная зависимость люминесцентных свойств пористого кремния видимой области и интенсивности ИК- полосы пропускания 616 см^{-1} , характерной для связей Si-Si в кристаллическом "ядре".

3. Получены новые экспериментальные данные о характере энергетического распределения электронных состояний в валентной зоне и зоне проводимости, о природе межатомных взаимодействий и фазовом составе наноразмерных структур и композитов на основе пористого кремния.

Автором показано, что при формировании нанокомпозитов металл/por-Si (металлы Fe,Co,Ni, Sn, In) как при электрохимическом осаждении металлов из электролитов, так и золь-гель методом, изменяется соотношение фаз кремния и оксидов кремния, что приводит к высокоэнергетическому смещению пика ФЛ до ~ 2.4 эВ и стабилизации интенсивности ФЛ во времени до 180 дней.

4. Впервые исследованы особенности физической адсорбции/десорбции нейротропных лекарственных средств на поверхности пористого кремния. Показана возможность формирования гибридных органо-неорганических композитов на основе пористого кремния с нейротропными лекарственными средствами Винпоцетин и Афобазол и органическим красителем Родамин Б с помощью дополнительной обработки пористого слоя соответствующими органическими растворами.

Личный вклад соискателя состоит в том, что автором поставлены цели и задачи диссертации, решение которых позволило сформировать положения, выносимые на защиту. Автором были разработаны оригинальные методики формирования пористых структур и нанокомпозитов различной морфологии и состава, исследуемые образцы в работе получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором получены основные экспериментальные данные по составу, электронно-энергетическому строению, функциональным характеристикам исследуемых материалов. Основные результаты и выводы получены лично автором.

Практическая ценность работы состоит в выявлении фундаментальных закономерностей формирования широкого ряда сложных композитных систем на основе пористого кремния, в определении факторов, формирующих особенности их морфологии, атомного и электронного строения и их долговременными функциональными свойствами, определяющими области применения. Отдельное внимание в диссертации отведено описанию и устранению деградиационных эффектов в исследуемых системах, что крайне важно с практической точки зрения.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, изложенных в диссертации, определяется большим количеством исследованных наноструктур на основе пористого кремния, позволяющей делать обобщающие заключения, многократной воспроизводимостью экспериментальных результатов, использованием комплекса современных, неразрушающих и информативных методов, в том числе с использованием источников синхротронного излучения, позволяющих провести подробное изучение строения и функциональных свойств на поверхности и в объеме исследованных объектов.

По диссертации можно сделать следующие **замечания и пожелания**:

1. В работе автором вводится несколько понятий наблюдаемого в процессе исследований кремния: «стандартно пористый», «нанопористый», «мезопористый», «макропористый», «низкокоординированный», «аморфный», «разупорядоченный» и др., но не для всех из них дает определения этим терминам, что затрудняет понимание процессов, протекающих при получения пористого кремния. Например, не совсем понятно, чем «частично разупорядоченный кремний» отличается от «сильно разупорядоченного кремния»?
2. При исследовании нанокомпозитов металл(оксид металла)/пористый кремний автор основное внимание уделяет электронному строению и физическим свойствам, определяемых матрицей пористого кремния. При этом физическим свойствам, связанным с внедренными в кремний ферромагнетикам уделено мало внимания, хотя в таких структурах следует ожидать усиление магниторезистивного эффекта за счет создания структур, управляемых как электрическим, так и магнитным полем. В этом плане автору можно пожелать более тщательного анализа результатов исследования магнитосиловой сканирующей микроскопии, проведенным им на композитах por-Si:Fe , por-Si:Co , por-Si:Ni для установления в них преимущественной магнитной анизотропии.

3. Из представленной топологической модели порошков на основе кремния (рис. 5.2) неясна структура кремниевого ядра (аморфная или кристаллическая)?

4. В тексте диссертации имеются отступления от общепринятых правил ее оформления:

- список литературы диссертации распечатан через 1 интервал, а сам заголовок списка отсутствует;

- с новой страницы в работе начинаются не только главы, но и разделы, что приводит к большому количеству «пустых» мест;

- в работе имеются отдельные опечатки (например, с. 62, 203, 217 и др.);

- отсутствуют знаки препинания после некоторых формул (например, с.216, 254, 328 и др.).

Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости полученных результатов и общую положительную оценку работы, а в значительной степени носят характер пожеланий. Диссертация представляет собой самостоятельно выполненную, цельную и завершенную научно-исследовательскую работу на достаточно актуальную тему. Работа прошла хорошую апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах, результаты работы достаточно полно опубликованы в более чем 30 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК, Scopus и Web of Science, монографиях, технологические разработки получили патентную защиту. Суть опубликованных работ в полной мере отражена в диссертации. Автореферат диссертации дает полное представление о проведенных автором исследованиях и о полученных результатах.

Диссертация Леньшина А.С., представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, представляет собой выполненное на высоком уровне законченное крупное научное исследование, в котором содержится решение ряда проблем, имеющих серьезное значение

для современной физики полупроводников. Тематика и содержание диссертации полностью соответствует формуле специальности 01.04.10 - «физика полупроводников».

Заключение. Диссертация «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» по своей актуальности и новизне, достоверности и совокупности полученных результатов, уровню их апробации соответствует всем требованиям п. 9 - 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Леньшин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «физика полупроводников».

Официальный оппонент,

Профессор кафедры физики твердого тела,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
доктор физико-математических наук
(01.04.07: Физика конденсированного состояния),
профессор



Калинин Юрий Егорович

23.12.2020 г.

Адрес: 394006, Воронеж, ул. 20 лет Октября, 84
Телефон: 8 (473) 246-66-47
E-mail: kalinin48@mail.ru

Подпись профессора кафедры физики твердого тела
факультета радиотехники и электроники ВГТУ
Ю.Е. Калинина удостоверяю



Ученый секретарь



В.П. Трофимов