

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

М.С. Куприянов



ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на диссертационную работу «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» Леньшина Александра Сергеевича, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «физика полупроводников»

Диссертационная работа Леньшина А.С. на тему «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» посвящена разработке методик формирования и исследованию особенностей атомного и электронного строения, характера межатомных взаимодействий и функциональных характеристик широкого ряда наноструктур и многофункциональных нанокompозитов на основе пористого кремния.

Актуальность темы. Многофункциональные наноразмерные структуры вызывают большой научный и практический интерес благодаря набору уникальных физико-химических свойств, которые не могут быть реализованы в объемных материалах. К таким объектам относятся пористый кремний (por-Si) нанокompозиты, нанопорошки, гибридные органо-неорганические структуры на пористом кремнии, комплексные исследования которых представлены в диссертации.

Композитные и тонкопленочные структуры на основе por-Si, представляют собой сложные мультикомпонентные объекты для исследования. Разработка методик формирования и управления размерами, составом и

формой нанообъектов обеспечивает получение материалов с улучшенными или совершенно новыми физическими свойствами, нехарактерными для отдельных компонентов системы. Исследованные в диссертации наноматериалы имеют значительные перспективы для формирования качественно новых многофункциональных материалов, совместимых с современными промышленными технологиями и проявляющих люминесцентные, сенсорные, магнитные и другие свойства для создания на их основе устройств полупроводниковой нано - и оптоэлектроники, а также материалов для биомедицинских применений. Поэтому диссертационное исследование А.С. Леньшина является **актуальным**.

Тематика исследования, формулировка целей и задач исследования, области применения результатов подтверждают, что данная диссертация соответствует специальности 01.04.10 - «физика полупроводников».

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 382 страницах машинописного текста, включая 183 рисунка, 40 таблиц и список литературы из 342 наименований.

Диссертационная работа по содержанию и структуре отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе литературных данных даётся обзор основных свойств пористого кремния, композитов на его основе, а также области их применения. Описываются особенности электрохимического, химического и других методов формирования структур пористого кремния и нанокомпозитов на его основе. Излагаются общие физические принципы основных используемых в работе методов. В заключении главы дается обоснование актуальности проводимых в диссертации исследований.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей формирования и закономерностей электронного и атомного строения различных структур пористого кремния. Исследованы особенности состава поверхностных слоев

por-Si и процессы, оказывающие влияние на оптические свойства исследуемых материалов. Представлены закономерности изменения фазового состава образцов пористого кремния с различным размером пор, обсуждаются особенности изменения состава химических связей поверхностного слоя при различных внешних воздействиях. В главе предложены перспективные методики управления составом поверхности пористого кремния, сохранения и модификации его оптических свойств.

В третьей главе обсуждаются особенности формирования и функциональные характеристики нанокompозитов металл (оксид металла)/пористый кремний, полученных методикой электрохимического осаждения металла в пористый слой. Рассмотрены зависимости электронно-энергетической структуры нанокompозитов 3d-металлов и их смесей на основе пористого кремния в зависимости от осаждаемого металла, изменение фазового состава нанокompозитов по глубине и со временем выдержки на атмосфере. Предложены топологические модели образования нанокompозитов 3d-металл/пористый кремний и обсуждаются механизмы физико-химических взаимодействий в пористом кремнии с осажденными металлами, демонстрируется их влияние на фотолюминесцентные свойства разработанных композитов.

В четвертой главе представлены особенности формирования и функциональные характеристики тонких пленок и нанокompозитов металл(оксид металла)/пористый кремний, полученных золь-гель и эпитаксиальными методиками. Исследованы физико-химические взаимодействия в пористом кремнии с осажденными 3d-металлами (Fe, Co, Ni) и s, p-металлами (Al, Ga, In, Sn), оптические и адсорбционные свойства разработанных композитов. Показаны возможности формирования гибридных наногетероструктур A^3N/Si через буферный «податливый» слой пористого кремния ($A^3N/por-Si/Si$), проведен анализ особенностей роста и характеристик полученных структур.

В пятой главе представлены особенности формирования, состава и функциональные характеристики органо-неорганических гибридных систем на пористом кремнии для медицинских применений. Исследованы особенности осаждения нейротропных лекарственных средств «Винпоцетин» и «Афобазол»,

а также органического красителя Родамин Б на поверхность пористого кремния.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в диссертации.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и дает полное представление о научной новизне, практической значимости, актуальности исследования, личному вкладу, достоверности и значимости научных результатов.

Научная новизна исследования. В рамках диссертации А.С. Леньшина разработаны оригинальные методики формирования и управления свойствами широкого ряда наноструктур и нанокомпозитов на основе пористого кремния, в том числе наногетероструктур и гибридных органо-неорганических композитов, содержащие нейротропные лекарственные средства. Предложены эффективные методики управления составом и эффектами деградации поверхности por-Si и его фотолюминесцентных свойств. На основе оригинальных технологических разработок предложен подход к формированию гибридных наногетероструктур $\text{A}^3\text{B}^5/\text{por-Si}/\text{c-Si}$ с использованием переходного слоя пористого кремния, обладающих улучшенными оптическими характеристиками. В работе получены комплексные экспериментальные данные об атомном и электронном строении, характере межатомных взаимодействий, морфологических особенностях и функциональных характеристиках разработанных структур. Особенностью данной работы, помимо развития оригинальных методик формирования наноструктур на основе пористого кремния, подтвержденных значительным количеством публикаций и патентов, является привлечение уникального научного оборудования, в том числе источников синхротронного излучения.

Научная и практическая значимость работы. Разработанные А.С. Леньшиным оригинальные методики формирования и управления функциональными характеристиками наноструктур и нанокомпозитов, в том числе гибридных органо-неорганических, на основе пористого кремния могут быть использованы для создания многофункциональных материалов на основе современной кремниевой технологии для задач оптоэлектроники, включая гибридную электронику на основе $\text{A}^3\text{B}^5/\text{Si}$, сенсорные и медицинские

(тераностические) применения. Предложенные подходы и технические решения имеют патентную защиту и внедрены в научную сферу для проведения дальнейших исследований в рамках НИОКР. Установленные в рамках диссертационной работы фундаментальные закономерности атомного строения и функциональных характеристик наноструктур и нанокомпозитов на основе пористого кремния значительно расширяют существующие представления о строении и свойствах исследуемых систем и вносят определенность в поисках границ и условий их применения.

Научные положения, выносимые на защиту, полностью отражают научную новизну и практическую значимость и имеют хорошую доказательную базу.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов.

Обоснованность научных положений и результатов работы обеспечивается применением комплексного подхода к анализу строения и свойств наноструктур современными экспериментальными методами с установлением общих закономерностей для исследуемых объектов, в том числе с использованием синхротронного излучения, сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными; сходимостью результатов косвенных экспериментов с визуальными данными (микрофотографии); значительным объемом хорошо воспроизводимых экспериментальных исследований, статистически значимым объемом экспериментальных данных; а также представленными в диссертации исследованиями воспроизводимости характеристик исследуемых объектов, стабильности проявляемых свойств и деградиационных эффектов в исследуемых системах, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений. Результаты работы были достаточно широко опубликованы в рецензируемых журналах с высоким рейтингом (более 70 работ), монографиях, представлены на российских и международных конференциях, разработки имеют патентную защиту.

Выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Научные результаты не противоречат существующим научным представлениям, одновременно дополняя их.

Личный вклад автора заключался в планировании экспериментов, приготовлении экспериментальных образцов, проведении экспериментов, выполнении большей части измерений, обработке результатов экспериментов,

анализе, сопоставлении, интерпретации и обобщении полученных экспериментальных результатов, построении гипотез и их доказательстве, формулировке расширенных научных выводов, их представлении в форме патентов, научных статей и докладов.

Автором предложены и реализованы оригинальные методики формирования и управления составом и оптическими свойствами нанокompозитов на основе пористого кремния, установлены закономерности роста, атомного и электронного строения металлосодержащих нанокompозитов и гетероструктур на основе пористого кремния, полученных различными методиками, их взаимосвязи с функциональными характеристиками, определены механизмы деградации состава химических связей поверхностных слоев структур пористого кремния и связанных с ними фотолюминесцентных свойств и разработаны эффективные методики их коррекции и устранения.

По диссертации Леньшина А.С. имеются следующие замечания:

1. Не ясно, чем обоснован выбор сред и их уровня рН при исследовании динамики высвобождения нейротропных лекарственных средств «Винпоцетин» и «Афобазол» из наночастиц пористого кремния (глава 5) в экспериментах *in vitro*? Исследуемые препараты традиционно вводятся перорально. Нормальная кислотность в просвете тела желудка натошак: рН = 1,5-2,0. Почему был выбран буферный раствор с рН=6,8?

2. Также неясным остается будут ли разрабатываемые в диссертационном исследовании наночастицы пористого кремния с нейротропными препаратами преодолевать гематоэнцефалический барьер, другими словами, чем обоснован выбор параметров наночастиц пористого кремния для адресной доставки выбранных лекарств в мозг?

3. В диссертации автор использует свою условную классификацию, разделяет пористый кремний на *нанопористый*, мезопористый, макропористый, хотя по общепринятой международной классификации IUPAC (Международный союз чистой и прикладной химии) поры радиусом менее 2 нм называют микропорами (не нанопорами).

4. При исследовании деградационных эффектов на состав и оптические свойства пористого кремния работу для усиления практического значения

результатов работы целесообразно было бы дополнить исследованиями влияния температуры и влажности.

Сделанные замечания являются частными и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы Леньшина А.С. и не ставят под сомнение достоверность и значимость полученных результатов и сделанных на их основе выводов.

Заключение

Диссертация Леньшина А.С. «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» представляет собой завершённое комплексное исследование на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для физики полупроводников, физики и технологии многофункциональных низкоразмерных систем и композитов на основе кремния. Выводы и рекомендации в диссертации достаточно обоснованы. Основные результаты диссертации широко известны в научном сообществе.

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов диссертация Леньшина А.С. на тему «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» соответствует всем требованиям п. 9 – 14, действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335), 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».

Диссертация Леньшина Александра Сергеевича «Формирование и функциональные свойства наноструктур на основе пористого кремния» прошла обсуждение на заседании кафедры Фотоники «28» декабря 2020 г., протокол № 6. Отзыв на диссертацию Леньшина Александра Сергеевича рассмотрен и одобрен на заседании кафедры Фотоники «28» декабря 2020 г., протокол № 6. Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты

голосования: «за» - 18 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел.,
протокол № 6 от 28.12.2020 г.

Заведующий кафедрой Фотоники
Доктор технических наук,
Специальность 05.27.01 – Твердотельная
электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах,



Сергей Анатольевич Тарасов

Доцент кафедры Фотоники
Кандидат технических наук
Специальность 05.27.01 – Твердотельная
электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах



Иван Анатольевич Ламкин

Ведущая организация
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова
(Ленина)"
СПбГЭТУ "ЛЭТИ"
Почтовый адрес: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5
Телефон: +7 (812) 234-15-43
E-mail: depnauki@etu.ru

Подписи руки Тарасова С.А. и Ламкина И.А. удостоверяю
Начальник ОДС
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
к.э.н. _____ Русяева Т.Л.

