

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».

Актуальность работы. Обусловлена созданием наноструктурированных материалов, обладающих улучшенными или уникальными физическими свойствами по сравнению с их объемными аналогами. К таким материалам относятся пористый кремний (por-Si), нанокompозиты, а также тонкопленочные или гибридные структуры на его основе. Интеграция структур на пористом кремнии с промышленными технологиями электроники в едином устройстве обеспечивает существенные преимущества по сравнению с другими подходами. Пористый кремний как материал для современной электроники интересен в первую очередь своими люминесцентными и адсорбционными свойствами, что делает его перспективным материалом оптоэлектроники и сенсорики, а формирование металлосодержащих и биосовместимых композитных структур на основе пористого кремния существенно расширяет области его применения. При этом пористый кремний и композиты на его основе представляют собой сложные для анализа многофазные системы, состав и функциональные характеристики которых находятся в сильной зависимости от условий их формирования. Поэтому диссертационная работа Леньшина А.С., направленная на развитие методик формирования, установление особенностей и закономерностей атомного и электронного строения наноструктур на основе пористого кремния, их связей с функциональными характеристиками, разработку методик управления составом и свойствами этих структур является актуальной.

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. В диссертационной работе автором получен ряд **новых результатов**,

имеющих существенное значение для физики полупроводников, среди которых можно выделить следующие:

- разработаны методики формирования и постобработки образцов пористого кремния, а также нанокompозитов на его основе;
- предложена методика экспресс-контроля люминесцентных свойств пористого кремния;
- установлены закономерности формирования и особенности фазового состава металлосодержащих нанокompозитов на основе por-Si;
- впервые методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота на подложках с пористым буферным слоем сформированы интегрированные гетероструктуры $In_xGa_{1-x}N$ с улучшенными фотолюминесцентными характеристиками;
- разработаны эффективные методики формирования нанопорошков из пористого кремния (получены соответствующие патенты), а также гибридных органо-неорганических систем на их основе для применения в персонализированной медицине.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач диссертации, решение которых позволило сформировать выносимые на защиту положения. Автором разработаны оригинальные методики формирования наноструктур на основе пористого кремния и получены основные экспериментальные данные по составу и свойствам объектов. Автором лично получены результаты и сформулированы выводы по работе.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что установленные закономерности атомного, электронного строения и функциональных характеристик наноструктур и нанокompозитов на основе пористого кремния значительно расширяют существующие представления о строении и свойствах исследуемых систем. Разработанные методики формирования, а также управления оптическими характеристиками наноструктур на основе Por-Si могут быть использованы для создания широкого спектра многофункциональных материалов на основе кремниевой

технологии для целей оптоэлектроники, включая гибридную электронику и медицинские приложения.

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов и выводов, изложенных в диссертации, определяются использованием комплекса взаимодополняющих современных методов исследования состава и свойств наноструктур на основе пористого кремния, включая уникальное научное оборудование, соответствием представленных в работе экспериментальных данных, наличием патентов на изобретения.

Замечания

1. Целесообразно было бы оптимизировать структуры диссертации, а именно, методики исследований представить в отдельной главе, а не описывать их в различных разделах работы.

2. В работе рассматриваются топологические модели нанокompозитов пористого кремния с 3d-металлами, сформированные методом электрохимического осаждения, однако аналогичные модели для композитов металлов, полученных другими методами (золь-гель методом, магнетронным напылением, MOCVD, и др.) не приводятся.

3. При моделировании спектров USXES в качестве эталонов использовался дефектный оксид SiO_x , хотя известно существование нескольких промежуточных субоксидов с $0 < x < 2$. Из работы не совсем ясно, какой конкретно из субоксидов кремния и в каком случае использовался для моделирования фазового состава пористого кремния?

4. Не приводится сравнение состава и функциональных характеристик части из разработанных автором нанокompозитов на основе пористого кремния с составом и характеристиками объектов, известных из литературных источников, что необходимо для оценки уровня полученных результатов.

5. Замечания по оформлению диссертации.

- отсутствуют в тексте диссертации формулы (7) и (8), ссылки на которые приведены на странице 296;

- отсутствуют в тексте диссертации рисунки 9 и 10, ссылки на которые представлены на страницах 297 и 298.

Диссертация производит положительное впечатление, сделанные замечания не ставят под сомнение новизну и значимость выносимых на защиту положений и выводов. Результаты, полученные автором, обладают высокой научной и практической значимостью и востребованы в научном сообществе при дальнейших фундаментальных и прикладных исследованиях в области физики полупроводников и для медицинских приложений.

Результаты диссертации прошли полную апробацию на российских и международных конференциях, опубликованы более чем в 30 статьях в журналах из перечня ВАК, индексируемых в международных системах Scopus и Web of Science, монографиях, получено 5 патентов на изобретения.

Суть опубликованных работ в полной мере отражена в диссертации. Автореферат правильно и полно передаёт содержание диссертации.

Диссертация Леньшина А.С., представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, представляет собой законченное крупное научное исследование, выполненное на высоком уровне, содержащее решение ряда проблем, имеющих важное значение для физики полупроводников. Тематика и содержание диссертации полностью соответствует формуле специальности 01.04.10 - «Физика полупроводников».

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», 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».

Заведующий кафедрой нано- и микроэлектроники,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
доктор технических наук
(05.11.14 – Технология приборостроения;
01.04.10- Физика полупроводников),
профессор

Аверин Игорь Александрович

18 января 2021 года

Адрес организации: Россия, 440026, г. Пенза, ул.Красная, 40
Телефон: 8 (986) 942-40-95
E-mail: nano-micro@mail.ru

Ученый секретарь ученого совета
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет», к.т.н., доцент



О.С. Дорофеева