

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Конониной Анастасии Владимировны на тему: «Модификация свойств пористого кремния при помощи ионных пучков» по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника»

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из списка сокращений, введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 115 страницах печатного текста и содержит 39 рисунков, 2 таблицы и список литературы, состоящий из 193 наименований. Диссертационная работа написана понятным языком, соответствует установленным правилам научного цитирования, материал изложен последовательно с учётом поставленных в работе целей и задач.

### **Актуальность диссертационной работы**

По своей сути метод ионной имплантации не является новым, и все основные механизмы взаимодействия ускоренных ионов с макроскопическими образцами различных материалов давно и хорошо изучены. Однако, благодаря развитию нанотехнологических методов, при изготовлении современных структур, включая их микро- и нано- варианты, часто используются наноструктурированные материалы, свойства которых значительно отличаются от свойств их макроскопических однородных аналогов. Их использование на сегодняшний день требует новых исследований, в частности, касающихся взаимодействия ионных пучков с нанообъектами. Одним из таких наноструктурированных материалов является пористый кремний. Необходимо изучить трансформацию таких объектов, вызванную ионно-индуцированными дефектами. Также важно исследовать возможности контролируемой модификации пористого кремния с целью предсказуемого управления его свойствами. Поэтому исследование

взаимодействия заряженных частиц с таким материалом безусловно является актуальным.

### **Новизна полученных результатов**

Среди новых результатов, полученных в диссертационной работе, хотелось бы выделить следующие:

- Исследован процесс дефектообразования в пористом кремнии под действием ионного облучения. Полученные данные сопоставлены со случаем дефектообразования в монокристалле. Показано, что аморфизация в монокристаллическом кремнии происходит при меньших значениях смещений на атом, чем в пористом кремнии. Показано, что размер нанокристаллов, содержащихся в структуре пористого кремния, уменьшается с ростом ионного флюенса.

- Проведено подробное исследование влияния энергии внедряемых ионов и ионных флюенсов на спектр фотолюминесценции пористого кремния. Показано, что спектр фотолюминесценции в диапазоне длин волн от 500 до 700 нм содержит две компоненты с максимумами около 550 нм и около 630 нм.

- Показано, что зависимость концентрации парамагнитных центров в пористом кремнии от ионного флюенса имеет две области с разными темпами роста. При значениях числа смещений на атом меньших 50 происходит быстрый рост числа парамагнитных центров, а при больших значениях смещений на атом кривая переходит в режим насыщения.

**Степень обоснованности и достоверности полученных положений, основных результатов и выводов** подтверждается использованием современных экспериментальных методов анализа вещества (РОР в сочетании с каналированием, КРС, ЭПР), широким набором параметров ионного облучения (энергия и флюенс), отсутствием противоречий с литературными данными.

**Практическая значимость результатов.**

В диссертационной работе Конониной А.В. было проведено исследование дефектообразования в пористом кремнии. Данные результаты необходимы для уточнения механизмов взаимодействия заряженных частиц с пористыми материалами, и для последующей разработки моделей для математического описания взаимодействия пучков ионов с наноструктурами.

В работе показана возможность управления электрофизическими свойствами пористого кремния при помощи ионных пучков. Изучение механизмов влияния ионного облучения на фотoluminesценцию и концентрацию парамагнитных центров позволит создавать структуры с заданными параметрами и эффективно их модифицировать.

Продемонстрирована возможность осуществлять контроль однородности структуры и присутствия различных примесей при помощи метода резерфордского обратного рассеяния.

#### **Апробация работы.**

Все результаты, представленные в диссертации, докладывались на 9 международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

**Содержание автореферата** раскрывает основные результаты и выводы диссертации, соответствует перечню опубликованных работ. Материал автореферата позволяет раскрыть главные достоинства работы.

#### **Вопросы и замечания по работе.**

1. В разделе 2.5.1, посвящённом исследованию исходного пористого кремния методом резерфордского обратного рассеяния, показано, что пористый кремний после травления содержит фтор. Однако ни результаты исследования образцов методом ИК-спектроскопии (раздел 2.5.1.), ни КРС (раздел 3.2.) не показывают присутствие в структуре данного элемента, в том числе в составе соединений. Подвергались ли образцы исследованные методами ИК-спектроскопии и КРС какой-то дополнительной обработке, в ходе которой фтор был удалён из образцов?

Если нет, то чем может объясняться то, что фтор не был обнаружен другими методами анализа?

2. Пористый кремний – это сложная структура с развитой поверхностью, покрытой различными кислородными и водородными соединениями. Однако во всех случаях моделирование взаимодействия ионов с веществом проводилось для чистого кремния, не содержащего примесей. Описанный в разделе 2.4. подход, применяемый для моделирования взаимодействия ионов с пористым кремнием, также не учитывает наличие примесей, что представляется важным в данном случае и влияющем на точность расчётов.
3. В тексте диссертации присутствуют повторы, например, на странице 14 во втором абзаце и на странице 22 в третьем абзаце. Встречаются опечатки. На большом количестве рисунков присутствуют подписи на английском языке.

Однако, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. В целом, по объёму представленного материала, научной новизне, фундаментальности и достоверности результатов, обоснованности защищаемых положений, практической значимости диссертация Конониной Анастасии Владимировны «Модификация свойств пористого кремния при помощи ионных пучков» отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова.

Считаю, что соискательница Кононина Анастасия Владимировна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории "Криоэлектроника", Кафедра физики полупроводников и

криоэлектроники, Отделение физики твёрдого тела, Физический факультет,  
МГУ имени М.В. Ломоносова

Крупенин Владимир Александрович

Контактные данные:

тел.: +7(495)939-30-14, e-mail: [krupenin@phys.msu.ru](mailto:krupenin@phys.msu.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 01.04.04 - Физическая электроника

Адрес места работы: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1,  
строение 2

Подпись Крупенина В.А. удостоверяю.