

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»

На смену хорошо изученным объёмным монокристаллическим материалам постепенно приходят наноструктуры. Одним из таких перспективных наноматериалов является пористый кремний. Он обладает большой площадью поверхности, биологической совместимостью и собственной фотолюминесценцией.

При этом необходимо развивать эффективные способы контроля и изменения свойств наноматериалов. Одним из таких методов является ионная имплантация. Механизмы взаимодействия заряженных частиц с наноструктурами, например пористым кремнием, значительно отличаются от случая взаимодействия с хорошо изученными массивными монокристаллами, и требуют отдельного детального исследования.

Поэтому **актуальность** диссертационной работы Конониной А.В., посвящённой экспериментальному исследованию влияния ионного облучения на свойства пористого кремния, не вызывает сомнений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Во введении обоснованы актуальность, цели и задачи диссертационного исследования, описаны объекты и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности, перечислены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературы. Рассматриваются особенности структуры пористого кремния, области и перспективы применения этого наноматериала. Обсуждаются вопросы природы

фотолюминесценции пористого кремния и проблема её стабильности. Приводятся основные механизмы фотолюминесценции в полупроводниках. Подробно рассматриваются механизмы взаимодействия заряженных частиц с массивными подложками.

Во второй главе приводится описание аппаратуры и методов исследования, использованных в диссертационной работе. В качестве модифицируемых материалов используются два типа пористого кремния: мезопористый и макропористый. Подробно описано устройство ускорителя HVЕЕ-500, на котором было проведено ионное облучение. Приведены основные принципы использованных методик анализа образцов до и после облучения. Описана методика сравнения накопления дефектов, сформированных при различных параметрах облучения, введены единицы измерения дра . Также в данной главе приведены результаты исследования исходного пористого кремния до облучения методом РОР и ИК спектроскопии. Убедительно продемонстрирована возможность анализа состава и структуры пористого кремния методом РОР в сочетании с каналированием.

Третья глава посвящена исследованию ионно-индуцированного дефектообразования в пористом кремнии. На примере монокристаллического кремния продемонстрирована методика анализа накопления дефектов при помощи комбинационного рассеяния света (КРС). Сравнение результатов исследования с литературными данными позволяет судить о возможности применения данного метода для анализа дефектов в кремниевых структурах. Далее было проведено исследование дефектообразования в пористом кремнии. Показано, что аморфизация пористого кремния наступает при больших ионных флюенсах, чем монокристаллического. По спектрам КРС был определён размер нанокристаллов в структуре пористого кремния. Показано, что с ростом ионного флюенса размер нанокристалла уменьшается.

Четвёртая глава посвящена исследованию влияния ионного облучения на спектр фотолюминесценции и на концентрацию парамагнитных центров в пористом кремнии. Показано, что при помощи метода ионной имплантации можно изменять спектр фотолюминесценции пористого кремния. Показано, что спектр фотолюминесценции пористого кремния состоит из нескольких компонент, обусловленных разными механизмами. Одна из них относится к дефектам, а другая к кислородным и водородным соединениям, присутствующим в структуре пористого кремния. Показано, что ионное облучение способствует улучшению стабильности фотолюминесценции пористого кремния. Также показано, что ионное облучение приводит к значительному возрастанию концентрации парамагнитных центров в пористом кремнии.

В **заключении** приведены в обобщённом виде основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Степень обоснованности и достоверности полученных положений, основных результатов и выводов подтверждается систематическим характером исследований, использованием современных экспериментальных методов анализа наноструктур (комбинационное рассеяние света, резерфордовское обратное рассеяние, сканирующая электронная микроскопия), а также сравнением с данными других авторов.

Научная новизна диссертационной работы А.В. Конониной включает ряд положений, из которых можно выделить следующие:

1. Было проведено исследование процесса образования дефектов в пористом кремнии под действием ионного облучения. Установлено, что для аморфизации пористого кремния необходимо воздействие бóльшего ионного пучка, чем в случае монокристалла.
2. Проведены систематические исследования влияния ионного облучения на спектр фотолюминесценции пористого кремния. Выявлены механизмы, отвечающие за фотолюминесценцию в диапазоне длин волн от 500 до 700 нм.

3. Показано, что концентрация парамагнитных центров, образовавшихся в пористом кремнии при ионном облучении, на порядок превосходит концентрацию парамагнитных центров, образовавшихся в монокристаллическом кремнии при аналогичных экспериментальных условиях.

Замечания и вопросы по диссертации:

1. Обычно в литературе пористый кремний обозначается как por-Si, p-Si – это кремний, легированный акцепторной примесью.

2. В работе автор не останавливается на конкретной модели возникновения и изменения ФЛ в пористом кремнии при ионном облучении, просто констатируются и описываются эффекты воздействия с некоторыми возможными вариантами механизмов.

3. В работе в качестве величины, характеризующей количество ионов, упавших на образец, используется понятие ионного флюенса [см^{-2}]. Однако, кое-где в работе, например на страницах 26, 30, 72, 78, 89 использовано слово «доза» с теми же единицами измерения.

4. В разделе «4.1.1. Влияние энергии ионов на ФЛ p-Si» (стр. 80) указаны не полные параметры ионной имплантации. В частности, отсутствует значение ионного флюенса (пучка), при котором проводилось облучение, что затрудняет восприятие и оценку результатов.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. В работе представлен большой объём экспериментальных данных, представляющий интерес, как для фундаментальной, так и для прикладной науки. Представленные в диссертационной работе результаты прошли апробацию в докладах на международных и всероссийских конференциях и опубликованы в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а Кононина Анастасия Владимировна заслуживает

присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – «Физическая электроника».

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, совместная учебно-научная лаборатория физики наногетероструктур и полупроводниковых материалов ВГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова

Александр Сергеевич Леньшин

Контактные данные:

тел.: +7 (473) 220 83 63, e-mail: lenshinas@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.10 – физика полупроводников

Адрес места работы: 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1, Воронежский государственный университет, Физический факультет