

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Хмары Александра Николаевича «Транспортные свойства гетероструктур a-Si+ПК/p-Si, полученных анодированием кремния», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Актуальность диссертационной работы

Пористый кремний (ПК) обычно получают анодированием кристаллического кремния в электролитах на основе плавиковой кислоты. В отличие от кристаллического кремния он является прямозонным материалом и обладает высокой удельной поверхностью. Механизмы образования ПК до сих пор полностью не изучены, но согласно одной из устоявшихся моделей образования ПК, основную роль в его образовании играет вторичный аморфный кремний (a-Si), образующийся на поверхности и стенках пор, благодаря чему травление кремния становится анизотропным. Образующееся при этом количество аморфного кремния мало, но он также может образовываться при электрохимическом осаждении кремния из растворов его соединений. И, как показывает данная диссертационная работа, при анодировании кремния может образовываться достаточно большое количество аморфного кремния, способное заполнить поры в ПК. Согласно существующим публикациям, транспортные свойства гетероструктур, сочетающих в себе свойства аморфного и пористого кремния, являются практически неизученными. Эти материалы могут быть использованы в качестве анодов с высокой удельной емкостью для литий-ионных батарей и поглощающего слоя солнечных батарей.

Исходя из сказанного, тематика диссертационной работы представляется весьма актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Для решения поставленных в работе задач соискатель использовал комплекс методов, включающих растровую электронную микроскопию, спектроскопию комбинационного рассеяния, исследование частотных и температурных зависимостей удельной электропроводности и вольтамперных характеристик полученных гетероструктур. Полученные результаты согласуются как между собой, так и с результатами, ранее опубликованными другими авторами, исследовавшими похожие материалы. Это позволяет утверждать, что полученные вышеупомянутыми методами результаты исследования транспортных свойств гетероструктур обладают достоверностью.

Новыми результатами работы, представляющими несомненную научную и практическую ценность, являются следующие установленные факты:

1. Перемешивание электролита влияет на морфологию поверхностных слоев a-Si+ПК, приводя к образованию слоя ПК с порами, полностью заполненными вторичным кремнием.

2. Интенсивность перемешивания, состав электролита и плотность тока при анодировании кремния влияют на такие свойства получаемых гетероструктур a-Si+ПК/p-Si, как величина удельной электропроводности, энергия активации проводимости, а также механизм

низкотемпературной прыжковой проводимости.

3. Полученные значения глубины залегания хвоста зоны проводимости и плотности локализованных состояний в запрещенной зоне материала слоя a-Si+ПК близки к значениям, которые были определены для аморфного кремния, полученного другими методами.

Достоверность полученных результатов обоснована применением современных методов исследования и воспроизводимостью результатов получения и исследования свойств гетероструктур a-Si+ПК/p-Si.

Выводы диссертации сделаны на основе комплексного исследования транспорта носителей заряда с использованием нескольких взаимодополняющих методик и согласуются с теоретическими и экспериментальными данными, полученными ранее другими авторами.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании устройств на основе слоев a-Si+ПК, таких как литий-ионные батареи, солнечные батареи и фотодатчики.

Содержание автореферата в полной мере отражает структуру и основные результаты диссертации, а также содержит перечень опубликованных работ. Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам такого рода.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Во второй главе диссертации отсутствуют данные о морфологии и размерах слоев оксида цинка, полученных центрифугированием золь-геля.

2. В третьей главе диссертации не совсем понятно объяснено, как из общей емкости гетероструктуры определялась емкость слоя a-Si+ПК.

3. В четвертой главе диссертации недостаточно полно раскрыта методика определения распределения плотности локализованных состояний по вольтамперным характеристикам.

4. В тексте автореферата и диссертации встречаются небольшие опiski и опечатки.

Оценка работы в целом

Сделанные выше замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы Хмары Александра Николаевича. Диссертантом поставлены и успешно решены основные задачи по разработке технологии получения гетероструктур a-Si+ПК/p-Si и комплексному исследованию их транспортных свойств. Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены на 2-й Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур». Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 5 печатных работах, включая 4 статьи в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация Хмары А.Н. обладает достаточным объемом и целостностью изложения материала, для исследования были широко используемые методы и подходы. Научные положения и выводы, представленные соискателем, обоснованы и согласуются с существующими на данный момент в физике конденсированного состояния представлениями о переносе носителей заряда в неупорядоченных полупроводниках.

Диссертация является законченным квалификационным научным исследованием и вносит существенный вклад в изучение транспортных свойств неупорядоченных материалов и получение новых материалов электроники.

Заключение

Вышеизложенное позволяет считать, что представленная диссертационная работа «Транспортные свойства гетероструктур a-Si+ПК/p-Si, полученных анодированием кремния», является завершенной научно-квалификационной работой и отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановления Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года (в редакции Постановления Правительства РФ №335 от 21 апреля 2016 года), а ее автор Хмара Александр Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук
(научная специальность 01.04.05 – оптика),
доцент, декан факультета «Математика и
естественные науки», профессор кафедры
«Физика и оптотехника» Ижевского
государственного технического университета
им. М.Т. Калашникова.

Соболев Валентин Валентинович

Подпись д.ф.м.-н. Соболева В.В. заверяю:
проректор ИжГТУ им. М.Т. Калашникова
по научной и инновационной деятельности
д.т.н., профессор



Щенятский Алексей Валерьевич

Соболев Валентин Валентинович

Адрес: 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая 7,

ФГБОУ ВО Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,

E-mail: Soboleff.val@vandex.ru

Тел. раб. 8 (3412) 77-60-55 доб. 1300, сот. 89128578195.

Д.ф.-м.н., доцент, декан факультета «Математика и естественные науки»,
профессор кафедры «Физика и оптотехника».