

## 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

Диссертационная работа Хмары Александра Николаевича на тему «Транспортные свойства гетероструктур a-Si+ПК/p-Si, полученных анодированием кремния» несомненно является актуальной, так как посвящена исследованиям двух широко известных материалов на основе кремния в виде микро- и нанопористого и аморфного кремния, решению задачи их интеграции на единой платформе с целью повышения фотовольтаической эффективности. В работах исследователей из МГУ и ФТИ им. Ф.А. Иоффе показано, что такая интеграция нанокристаллов кремния и a-Si снижает отрицательное влияние эффекта Стеблера-Вронского – фотоиндуцированной деградации их фотоэлектрических свойств. В отличие от традиционных эллионных методов и синтеза разложением силана в тлеющем разряде в работе комплексно изучены и проанализированы транспортные свойства гетероструктур a-Si+ПК/p-Si, синтезируемых достаточно доступным электрохимическим методом анодирования, когда в одном технологическом цикле удастся сформировать гетероструктуры a-Si+ПК/p-Si.

**Наиболее значимыми и представляющими научную ценность являются следующие результаты:**

1. Доказательство возможности синтеза методом электрохимического анодирования фотовольтаического гетероструктурного соединения a-

Si+ПК/p-Si, отличающегося тем, что поры оказываются заполненными гидрогенизированным кремнием.

2. Результаты исследования влияния режимов электрохимического анодирования кремния влияют на транспортные свойства гетероструктурного соединения a-Si+ПК/p-S, в частности, на удельную электропроводность, энергию активации проводимости и определение типа низкотемпературной прыжковой проводимости.

3. Установление механизмов проводимости в изучаемых гетероструктурах, а также распределения по энергиям ловушечных уровней, которые оказались близкими к значениям, характерным для аморфного кремния.

**Достоверность полученных результатов** обоснована применением апробированных методов исследования (растровой электронной микроскопии, рамановской спектроскопии, импедансной спектроскопии в широком диапазоне частот и температур, вольтамперных характеристик), повторяемостью результатов, полученных при исследовании гетероструктур a-Si+ПК/p-Si.

Выводы диссертации основываются на результатах исследования транспорта носителей заряда с использованием нескольких 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 разработке на основе гетероструктур a-Si+ПК фотовольтаических и тонкопленочных полупроводниковых элементов.

**Содержание автореферата** в полной мере отражает структуру и основные результаты, представленные в диссертации. Оформление

диссертации и автореферата соответствует требованиям, предъявляемым к научным работам.

**По работе можно сделать следующие замечания:**

1. В диссертации недостаточно полно представлены данные, полученные другими авторами ранее для слоев пористого кремния, с порами частично заполненными вторичным кремнием, отсутствует анализ работ в этой бурно развивающейся области за текущий год. В целом за последние 5 лет, начиная с 2014 года, в работе представлено лишь 2 работы, тогда как их счет за этот период идет на десятки тысяч. При анализе состояния исследований в предметной области следовало бы воспользоваться глубоко и всесторонне представленными хотя бы обзорами. Вызывает недоумение отсутствие ссылок на собственные работы.

2. Краткость описания во второй главе методов исследования и методик получения образцов для исследований несколько снижает важность решаемой в работе задачи, оптимально соответствующей триаде «состав-структура-свойства». У автора потенциально были все возможности раскрыть ее в полной мере, начиная от синтеза образцов и до анализа результатов исследования их свойств.

3. Линейная зависимость средней по распределению энергии делокализации объясняется тем, что функция распределения плотности локализованных состояний по энергии имеет экспоненциальный вид, тогда как подобная зависимость может быть вызвана изменением ширины зоны состояний, связанных с дефектами.

4. По спектру комбинационного рассеяния свет по линии  $520.7 \text{ см}^{-1}$  (рисунок 2.4) сделан вывод о наноразмерности кремния, исходя только из ее несимметричной формы, тогда как следовало бы произвести расчет этих размеров.

5. Не получило объяснение, отсутствие у образца В3 вольт-амперной характеристики, свойственной обращенному диоду.

## Оценка работы в целом

Сделанные выше замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы Хмары Александра Николаевича. Диссертантом поставлены и успешно решены задачи по получению гетероструктур  $a$ -Si+ПК/p-Si и достаточно полно исследованы их транспортные свойства. Материалы диссертационной работы были изложены 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 и 1 тезисы международной конференции.

Диссертация Хмары А.Н. обладает целостностью изложения материала и достаточным объемом, для получения представленных в ней результатов были использованы опробованные методы и теоретические модели. 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 весомый вклад в изучение транспортных свойств неупорядоченных материалов и получение новых материалов.

## Заключение

Приведенные выше доводы позволяют считать представляемую к защите диссертационную работу на тему «Транспортные свойства гетероструктур  $a$ -Si+ПК/p-Si, полученных анодированием кремния» завершенной научно-квалификационной работой, отвечающей 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»,

