

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Шевченко Алексея Ивановича** «Влияние неидеальности решётки кремниевых и фуллеренсодержащих структур на их оптические и электрические свойства», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Современное материаловедение не ограничивается лишь структурами на основе монокристаллических твердых тел. Применение в технике микро-, нанокристаллических и аморфных полупроводников является перспективным, благодаря наличию у данных материалов некоторых специфических свойств, а также возможности существенно снизить стоимость создаваемых на их основе устройств. В частности, широкие возможности открываются при использовании в полупроводниковой электронике аморфного, микро- и нанокристаллического кремния, в том числе в комбинации с фуллеренами. На данный момент не до конца изучены вопросы влияния дефектных состояний и неупорядоченной структуры некристаллических твердых тел на их оптические и электрические свойства. Актуальным вопросом является и поиск новых методов производства данных веществ, в частности фуллеренсодержащих материалов. Поэтому диссертация А.И. Шевченко, посвященная экспериментальным исследованиям и разработке модельных представлений, описывающих оптические и электрические свойства неупорядоченных и дефектных кремниевых и фуллеренсодержащих материалов, является **значимой и актуальной**.

Объем диссертации составляет 143 страницы. Она включает 4 главы с соответствующими выводами, введением и заключением, а также 76 рисунков и 4 таблицы. Список литературных источников представлен в количестве 172 единиц.

В диссертации А.И. Шевченко определены зависимости удельного сопротивления и энергии активации проводимости от прикладываемого

давления для нанокристаллического порошкового кремния, получаемого методом высокотемпературного плазмохимического синтеза. Впервые показано, что при крекинге резины с применением железо-медно-цинкового катализатора при температуре 450-500 °С образуется фуллеренсодержащий материал. Особо следует отметить, что данный метод получения фуллеренсодержащего материала представляет интерес с экологической точки зрения, позволяя утилизировать резиносодержащие отходы. Найдены удельные сопротивления и энергии активации проводимости для полученного таким способом фуллеренсодержащего материала. Представлена модель, описывающая поглощение ИК излучения полупроводниковым материалом с дефектами, которая предоставляет возможность анализа вклада дефектных уровней и может быть полезна с точки зрения подбора наилучших технологических режимов для получения структур с приблизительно заданным распределением дефектов и, следовательно, требуемыми оптическими и фотоэлектрическими свойствами. Показано, что неидеальность атомной решётки даже кристаллических твёрдых тел, в которые проводится диффузия, влияет на профиль распределения легирующей примеси. Разработан способ расчета энергетической зонной диаграммы кремниевых фотоэлектрических преобразователей, полученных методом термодиффузии, с учетом влияния неидеальности кристаллической решётки на профиль распределения донорной примеси. **Научная новизна** перечисленных выше результатов не вызывает сомнений.

**Практическая значимость** диссертации А.И. Шевченко состоит в возможности использования полученных результатов для повышения эффективности работы кремниевых фотопреобразователей, а также в найденных способах получения порошков нанокристаллического кремния и фуллеренсодержащего материала, которые могут удешевить производство полупроводниковых наноструктурных элементов.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов диссертационного исследования подтверждается использованием целого ряда



современных приборов и многочисленными повторениями экспериментов с применением нескольких типов измерительных установок. Производилось также сравнение полученных в диссертации результатов с известными литературными данными для схожих образцов. Кроме того, сравнивались теоретически рассчитанные и экспериментально полученные характеристики.

Для решения поставленных в диссертации задач применялись как теоретические, так и экспериментальные методы. В ходе выполнения работы проводились аналитические расчёты параметров твёрдых тел. Использовались строгие математические методы и современные математические пакеты прикладных программ. Оптические свойства в видимом диапазоне моделировались зависимостями с учётом влияния непрямых переходов. Для вывода формулы коэффициента поглощения в ИК области спектра применялась дипольная теория поглощения. При расчётах профиля диффузии использовался второй закон Фика, зонной диаграммы – уравнение Пуассона, теорема Гаусса и другие зависимости электростатики. Применялись формулы для нахождения энергии активации проводимости и описывающие вольт-амперные характеристики полупроводниковых переходов. Экспериментальные методы, с помощью которых изучались структура и свойства кремниевых и фуллеренсодержащих материалов, включали в себя исследования поверхности, температурной зависимости проводимости, оптических спектров, вольт-амперных характеристик, рентгенофазовый анализ.

Основные результаты диссертации отражены в 53 публикациях, 13 из которых – статьи в рецензируемых научных журналах, в том числе в ведущих международных научных журналах и журналах из списка ВАК. Получено одно свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

По диссертации можно сделать несколько **замечаний**:

1. К настоящему моменту накоплен уже достаточно большой материал по влиянию структурных параметров неупорядоченных систем (в частности, аморфного кремния и микрокристаллического кремния) на их оптические и электрические свойства. Желательно было бы в диссертации в значительно

большой степени сопоставить полученные данные с имеющимися и обосновать необходимость разработки новых моделей.

2. При рассмотрении поглощения аморфного кремния в среднем ИК диапазоне используются такие термины как междоузельные атомы и вакансии. В то же время аморфный кремний имеет неупорядоченную структуру атомов, поэтому введение узлов решетки и вакансий (определяемых в кристаллических материалах) представляется не совсем корректным.

3. При исследовании проводимости порошков некристаллического кремния говорится о прыжковом механизме переноса носителей заряда на основании увеличения проводимости с увеличением приложенного к порошку давления. Данный вывод нуждается в более подробном обосновании.

4. На странице 89 сообщается об увеличении энергии активации проводимости порошка нанокристаллического кремния от приложенного к порошку давления, сама зависимость энергии активации от давления приведена на рисунке 3-21. Однако с учетом отложенной на рисунке погрешности нельзя сделать вывод об увеличении энергии активации (энергии активации совпадают в пределах погрешности).

Указанные выше замечания носят, в большей степени, характер пожеланий и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Представленные результаты соответствуют высокому научному уровню, характеризуются оригинальностью, новизной и практической значимостью. Эти результаты опубликованы в ведущих научных журналах и докладывались на многих российских и международных конференциях. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

По результатам рассмотрения диссертации можно сделать следующее **заключение:**

Диссертация А.И. Шевченко «Влияние неидеальности решётки кремниевых и фуллеренсодержащих структур на их оптические и электрические свойства» представляет собой законченную научно-



квалификационную работу, является актуальной и значимой и соответствует п. № 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Считаю, что Шевченко Алексей Иванович заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент –

доктор физико-математических наук, доцент,

ведущий научный сотрудник кафедры

общей физики и молекулярной электроники

физического факультета

Форш Павел Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет.

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Тел.: 8(495)9393922, e-mail: forsh@physics.msu.ru

Подпись П.А. Форша заверяю:

Декан физического факультета МГУ

профессор



Сысоев Николай Николаевич