

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО

«Юго-Западный государственный университет»,

профессор

С.Г. Емельянов



« 5 » сентября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Родригеса Веласкеза Гуни

на тему: «Однопереходные фотовольтаические гетероструктуры на основе нитрида и карбида кремния», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Родригеса Веласкеза Гуни на тему «Однопереходные фотовольтаические гетероструктуры на основе нитрида и карбида кремния» посвящена получению фотовольтаических гетероструктур и тонких плёнок на основе карбида и нитрида кремния и исследованию их свойств, что хорошо согласуется в программой «Стратегиям развития электронной промышленности России на период до 2025 года», предусматривающей широкое внедрение солнечной энергетики.

Карбид и нитрид кремния находят широкое практическое применение в электронике и других отраслях науки и техники благодаря своим уникальным свойствам. Одной из областей их применения является солнечная энергетика. Стоимость энергии производимой солнечными батареями неуклонно понижается, а ее производство растёт. Росту способствует применение новых технологий и материалов. Самые высокие показатели по эффективности

преобразования солнечной энергии достигнута на основе многопереходных фотовольтаических элементах, коэффициент полезного действия которых превышает 40%. В то же время наиболее эффективным с экономической точки зрения представляется развитие кремниевой и совместимой с ней солнечной энергетики. Исследования в этой области интенсивно развиваются и недавно сообщалось о разработке на основе наноразмерных структур кремниевого фотоэлектрического преобразователя с КПД 42,8%, который может быть существенно повышен за счёт гибридных термофотовольтаических структур, которые по теоретическим пороговым оценкам вполне способны обеспечить достижение максимальной эффективности преобразования света вплоть до 73% на ячеистых структурах без использования концентраторов.

Таким образом, развитие кремниевой технологии производства фотовольтаической элементной базы за счёт применения наноразмерных слоёв SiC и Si₃N₄ и создания на их основе новых конструкций солнечных элементов представляется нам актуальной задачей.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

В диссертационной работы Родригес В.Г. методом ВЧ-магнетронного распыления твёрдотельных мишеней были получены и с применением современного наноинструментария комплексно изучены наноразмерные слои карбидов и нитридов кремния. В качестве наиболее значимых полученных результатов, обладающих новизной, можно выделить.

- 1) Методом ВЧ-магнетронного распыления получены наноразмерные плёнки SiC и, впервые, создан однопереходный гетероструктурный солнечный элемент Cu(Ag)/p-Si(100)/Cu(Ag) и изучены его спектральные характеристики и фотовольтаические свойства. С помощью солнечного имитатора по методике AM 1.5 было доказано, что вся область пространственного заряда сосредоточена в зоне Si, по темновым измерениям ВАХ определена высота барьера на границе Si/SiC (0.9 – 1.0 эВ) с преобразованием солнечной энергии до 7.22%.

- 2) Наноразмерные пленочные гетероструктуры $\text{Cu(Ag)/SiC/p-Si(100)/Cu(Ag)}$ по данным атомно-силовой и электронной микроскопии, рамановской микроспектрометрии структурированы в виде аморфных островков. Доказано, что среднеквадратичная шероховатость таких пленок возрастает по мере их утолщения.
- 3) Впервые, методом ВЧ-магнетронного распыления из твердофазной мишени был создан гетероструктурный солнечный элемент $\text{Cu(Ag)/Si}_3\text{N}_4/\text{p-Si(100)/Cu(Ag)}$ на основе наноразмерных плёнок Si_3N_4 , с солнечным имитатором проведены исследования фотовольтаических свойств и определена высота барьера на границе $\text{Si/Si}_3\text{N}_4$, оценки которой по темновым измерениям ВАХ при изменении температур в диапазоне 300-450 К варьировались от 0.9 эВ до 1.0 эВ, получен солнечный элемент с эффективностью преобразования солнечной энергии – 7.41%;
- 4) По результатам исследований фазового состава, морфологии поверхности плёнок Si_3N_4 , и поперечного сечения гетероструктуры $\text{Cu(Ag)/Si}_3\text{N}_4/\text{p-Si(100)/Cu(Ag)}$ установлено, что плёнка Si_3N_4 представлена сочетанием аморфного и микрокристаллического состояния ($\alpha + \mu\text{c}$), рассчитанные по данным электронной дифракции на нанокристаллах Si_3N_4 межплоскостные расстояния показали, что они обладают кубической пространственной группе Fd-3m .

Степень обоснованности и достоверности положений, выводов и заключений, содержащихся в диссертации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением контролируемых технологий получения образцов, применением современных методов контроля фотовольтаических свойств; использованием современных стандартных методик исследования фазового состава, морфологии поверхности плёнок и поперечного сечения гетероструктур методами атомно-силовой, электронной микроскопии и рамановской спектроскопии, корректным использованием современных методов обработки эксперименталь-

ных результатов, апробированных на родственных материалах, воспроизведением результатов, полученных различными методами, их согласованием с данными других авторов. Научные положения диссертации апробированы в печати и на научных конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа изложена на 124 страницах машинописного текста, проиллюстрирована 47 рисунками, 6 таблицами. Работа состоит из введения, обзора литературы (глава 1), результатов ВЧ-магнетронного напыления Si_3N_4 и исследования $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{p-Si}$ (100) гетероструктур (глава 2), результатов ВЧ-магнетронного напыления SiC и исследования $\text{SiC}/\text{p-Si}(100)$ (глава 3), результатов получения и исследования наноразмерных плёнок карбида кремния с использованием магнетронного напыления углерода и карботермического восстановления диоксида кремния (глава 4), обсуждения результатов, заключения, выводов, перечня сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 133 источника, в том числе 126 зарубежных.

Замечания по диссертации и автореферату

1. Во второй и третьей главах диссертации, содержащих оригинальные результаты описания впервые полученных однопереходных солнечных элементов на основе наноразмерных плёнок карбида и нитрида кремния не был проведен детальный анализ путей повышения эффективности работы, вновь созданных фотовольтаических гетероструктур.

2. Отсутствуют результаты экспериментов по исследованию температурных зависимостей фотовольтаических свойств гетероструктур на основе карбида и нитрида кремния особенно при повышенных температурах, что позволило бы оценить перспективы повышения их КПД путем создания комбинированных термофотовольтаических приборов.

3). В первой обзорной главе, учитывая рост востребованности разработок и исследований в области элементной базы для развития солнечной энергетики

не в полной мере освещены различные типы существующих солнечных элементов и физические принципы лежащие в основе их действия.

Основные результаты работы и рекомендации по их использованию

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке солнечных элементов на кремниевых подложках с использованием наноразмерных слоёв карбида и нитрида кремния в качестве материалов, создающих одновременно потенциальный барьер для разделения зарядов, пассивирующий и антирефлекторный слой. Одновременно нанометровые слои SiC и Si₃N₄ защищают солнечный элемент от механических и химических воздействий окружающей среды. В работе показано, что однопереходные солнечные элементы на основе наноразмерных плёнок карбидов и нитридов кремния имеют перспективы повышения эффективности преобразования солнечного света за счёт оптимизации конструкции с применением элементов термофотовольтаики (одним из простейших вариантов является использование концентраторов солнечного света). Полученные в работе результаты могут найти применение в научных центрах занимающихся получением и изучением свойств СЭ: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт твёрдого тела РАН, Московский институт электронной техники, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, а также в вузах в качестве материалов для специальных курсов, читаемых студентам, магистрантам и аспирантам.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации представлены на 3 российских и международных конференциях и выставках.

Публикации

Основные результаты исследования опубликованы в 4 работах в международной, центральной и местной печати, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, и содержат полный объем информации, касающейся темы диссертации.

Заключение

Диссертация Родригеса Веласкеза Гуни на тему: «Однопереходные фотовольтаические гетероструктуры на основе нитрида и карбида кремния», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 физика конденсированного состояния является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором технологических работ, экспериментальных исследований и обработки результатов с использованием существующих моделей и методик получены новые научные результаты. Представленная диссертационная работа соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», Утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09. 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям и п.1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и, в том числе, материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления; п.6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами; п.7. Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния паспорта специальности 01.04.07 физика конденсированного состояния, а её автор – Родригес Веласкез Гуни заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

