

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию: Родригеса Веласкеза Гуни

«Однопереходные фотовольтаические гетероструктуры на основе нитрида и карбида кремния», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Исследования и разработки новых материалов, создание и исследование тонкоплёночных гетероструктур на их основе играют решающую роль в развитии солнечной энергетики и занимают важное место в физике конденсированного состояния, определяя во многом уровень и качество научно-технического прогресса. В настоящее время большой интерес вызывает поиск новых материалов и одновременно применение известных в различных областях науки и техники материалов, с целью удешевления солнечных элементов и повышения их коэффициента полезного действия. Особое внимание привлекают к себе экологически чистые материалы и технологические процессы. При этом очень широкий спектр материалов для фотовольтаики определяется тем, что очень важно, чтобы они могли эксплуатироваться в специфических условиях, в частности, при экстремальных значениях температур, давлений, скоростей, напряжений, радиационных потоков и т.д. Благодаря своим уникальным свойствам нитрид и карбид кремния представляются весьма перспективными материалами для создания фотовольтаических устройств. Одной из основных задач в данной области является удешевление и упрощение конструкции солнечных элементов (СЭ) и сопряжение с широко применяемой в настоящее время в электронике кремниевой технологией производства полупроводниковых приборов. Как известно карбид и нитрид кремния часто используются в сложных гетероструктурах (СЭ) в качестве пассивирующих или антирефлекторных слоёв. Кроме того, повышенный интерес к данному типу материалов обусловлен их высокой термостабильностью и химической устойчивостью в агрессивных средах. Как известно SiC термостабилен до $\sim 1700^{\circ}\text{C}$ и может работать до $\sim 800^{\circ}\text{C}$ на воздухе без окисления. Si_3N_4 термостабилен до 1600°C и не окисляется на воздухе до 600°C . Химическая и термическая стабильность позволит применить концентраторы солнечного света для повышения КПД СЭ на основе SiC и Si_3N_4 . Поликристаллические карбид и нитрид кремния применяемые в качестве материала мишени при вч-магнетронном напылении тонких плёнок являются дешёвым материалом, что очень важно при массовом производстве СЭ. Таким образом, диссертационная работа Родригеса Веласкеза Гуни посвящена тематике, направленной на получение тонких плёнок карбида и нитрида кремния.

гетероструктур на их основе и изучение их свойств. В полученных автором солнечных элементах слои карбида и нитрида кремния выполняют одновременно несколько функций: во первых, создают на поверхности монокристаллической подложки p-Si (100) потенциальный барьер разделяющий заряды; во вторых, производит пассивацию поверхности и снижение скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда; в третьих выполняет роль антирефлекторного покрытия.

В рамках данной работы впервые получены однопереходные солнечные элементы на основе карбида и нитрида кремния. Получен патент на изобретение на СЭ на основе слоёв Si_3N_4 и патент на изобретение связанный с модернизацией установки магнетронного напыления ВН-2000. материалы являются новыми и ранее не изученными. Был проведен комплекс измерений свойств тонких плёнок и гетероструктур, что способствовало оптимизации технологического процесса вч-магнетронного напыления.

Согласно вышеизложенному, тематика диссертационной работы представляется весьма актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Кроме того, в работе использовались такие современные методы исследования полученных автором тонких плёнок и гетероструктур, как растровая и просвечивающая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, рентгенофазный анализ, исследование фотовольтаических и спектральных свойств СЭ, в том числе с применением стандартной методики АМ 1.5, и другие. Современная приборная база для перечисленных исследований была предоставлена автору Центром коллективного пользования НИУ «БелГУ», а также институтом прикладной физики АН республики Молдова.

Для решения поставленных в работе задач автор убедительно обосновала использование предложенных методов в качестве базовых в сочетании с применением комплекса дополнительных физических методов исследований. Возможность проведения исследований в широком интервале температур, параметров, характеризующих структуру и морфологию поверхности плёнок в гетероструктурах, и использования стандартной методики исследования фотовольтаических свойств позволяет автору рассматривать в данной работе вышеозначенные методы, как пригодные для получения комплекса данных о новых однопереходных СЭ на основе карбида и нитрида кремния.

К основным результатам работы, представляющим несомненную научную и практическую ценность, следует отнести следующее:

- 1) впервые методом вч-магнетронного напыления получил однопереходный солнечный элемент $\text{Cu}(\text{Ag})/\text{SiC}/\text{p-Si}(100)/\text{Cu}(\text{Ag})$ на основе наноразмерных плёнок SiC. Впервые на основании исследования спектральных характеристик и фотовольтаических свойств гетероструктуры однопереходного солнечного элемента $\text{Cu}(\text{Ag})/\text{SiC}/\text{p-}$

Si(100)/Cu(Ag), в том числе на солнечном имитаторе по методике AM 1.5 установлено, что вся область пространственного заряда расположена в Si. Высота барьера на границе Si / SiC, оцененная по темновым измерениям ВАХ, составила порядка 0.9-1.0 эВ, преобразование солнечной энергии составило 7.22%.

2) установлено на основании исследования фазового состава, морфологии поверхности плёнок SiC, и поперечного сечения гетероструктуры Cu(Ag)/SiC/p-Si(100)/Cu(Ag) методами атомносиловой и электронной микроскопии, рамановской спектроскопии, что тонкие пленки SiC состоят преимущественно из аморфных островков с нанокристаллическими включениями, а средний квадрат шероховатости плёнки, Sq, увеличивается от 0.3 нм до 9 нм, когда толщина пленки SiC увеличивается с 2 нм до 56 нм соответственно;

3) впервые получена методом вч-магнетронного напыления из твердофазной мишени гетероструктура солнечного элемента Cu(Ag)/Si₃N₄/p-Si(100)/Cu(Ag) на основе наноразмерных плёнок Si₃N₄. Впервые проведены исследования фотовольтаических свойств, в том числе на солнечном имитаторе по методике AM 1.5, высота барьера на границе Si / Si₃N₄ была оценена по темновым измерениям ВАХ в диапазоне температур 300-450 К, она варьировалась от 0.9 эВ до 1.0 эВ, нами был получен солнечный элемент типа металл-изолятор –полупроводник/ инверсный слой (MIS / IL) и вся зона пространственного заряда, где происходит поглощение света, генерируются и разделяются носители заряда, находится в Si, эффективность преобразования солнечной энергии составила 7.41%;

4) расширен диапазон нагрева подложек, T_S = 40 ÷ 800°C с целью более гибкого управления процессом получения плёнок с различным размером зерна, проведена модернизация установки УкрРосприбор ВН-2000, проведены исследования, морфологии поверхности плёнок Si₃N₄ и установлено, что увеличение температуры подложки, T_S, с 40 до 800°C позволяет увеличить относительную поверхность плёнки Si₃N₄ более чем на порядок.

5) проведены исследования фазового состава, морфологии поверхности плёнок Si₃N₄, и поперечного сечения гетероструктуры Cu(Ag)/Si₃N₄/p-Si(100)/Cu(Ag) методами атомносиловой, электронной микроскопии и рамановской спектроскопии. Установлено, что плёнка Si₃N₄ представляет собой смесь аморфного и микрокристаллического состояния ($\alpha + \mu c$), расчёты межплоскостных расстояний, сделанные на основе электронной дифракции, показывают, что Si₃N₄ нанокристаллы принадлежат к кубической пространственной группе Fd-3m, а положение максимума на спектре комбинационного рассеяния соответствует соединению Si₃N₄, а форма спектра характерна для нано кристаллического состояния;

По работе можно сделать следующие замечания.

1. В первой главе целесообразнее было бы привести дополнительно более детальное описание различных типов СЭ и провести более детальный сравнительный анализ их характеристик. В то время как автор уделил основное внимание описанию технологии получения, структуре и свойствам Si_3N_4 и SiC .

2. На мой взгляд, было бы логичнее, вынести из главы 2 описание созданного автором устройства и метода оптического нагрева подложки в установке вч-магнетронного напыления ВН-2000 и описание устройств используемых для исследования образцов в отдельную главу.

3. Изредка встречаются опечатки в тексте и отсутствие обозначений в формулах.

4.Замечание (пожелание), носящее скорее рекомендательный характер. Для дальнейшего продвижения в рамках работы в области данной, несомненно, перспективной и актуальной тематики, вероятно, было бы интересно более подробно заняться исследованием функционирования и оптимизацией полученных гетероструктур с применением подходов термофотовольтаики и расширения спектрального диапазона за счёт введения фотонных слоёв.

Данные замечания не влияют на общую, безусловно, положительную оценку диссертационной работы Родригеса Веласкеза Гуни. Диссертантом поставлены и успешно решены основные задачи по технологии получения и исследованию вольтамперных, спектральных и фотовольтаических характеристик, полученных на основе нано слоёв карбида и нитрида кремния гетероструктур СЭ. Материалы диссертации были представлены и обсуждены на всероссийских и международных научных конференциях. Об очевидной ценности полученных результатов, а также о высоком уровне представления этих результатов, красноречиво свидетельствуют публикации как в русской, так и в иностранной печати согласно базам данных Scopus и e-library и WoS. Дополнительным аргументом в пользу новизны полученных результатов являются патенты на изобретение созданные в процессе работы над диссертацией.

Диссертация Родригеса Веласкеза Гуни оставляет исключительно позитивное впечатление достаточным объемом, спецификой подачи, важностью полученных результатов, а также разнообразием методов и подходов. Достоверность результатов обеспечена большим статистическим объемом материалов и фундаментальностью применяемых методов, а также сопоставлением с экспериментальными данными других работ. Все научные положения и выводы, полученные соискателем, хорошо обоснованы и согласуются с представленным в современной научной печати пониманием излагаемых в диссертации положений.

Диссертация Родригеса Веласкеза Гуни написана в стиле, соответствующем стандартам современной научной публикации, является законченным квалификационным научным

исследованием и вносит существенный вклад в развитие материалов и устройств альтернативной энергетики. Основное содержание диссертации полно опубликовано в центральных научных изданиях и отражено в автореферате.

В целом, диссертационная работа «Однопереходные фотовольтаические гетероструктуры на основе нитрида и карбида кремния» отвечает всем требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Родригес Веласкез Гуни заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,
высококвалифицированный главный научный сотрудник.

Отделение физики твёрдого тела.

Физический Институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук,

г. Москва.



Б.А. Аронзон

Адрес: Москва, Малая Калитниковская ул. д. 5, кв. 15

тел. 8-916-831-1901

E – mail aronzon@mail.ru

Подпись Аронзона Б.А. удостоверяю

Ученый секретарь ФИАН



Колобов А. В.