

На правах рукописи



Кукин Алексей Валерьевич

**РАЗРАБОТКА ДВУХКАСКАДНОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СЛОЕВ $\text{SiO}_x\text{:H}$ С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ
ВКЛЮЧЕНИЯМИ КРЕМНИЯ**

Специальность 05.27.06 — Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2016

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники факультета электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель: Теруков Евгений Иванович,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Шерченков Алексей Анатольевич,
доктор технических наук, профессор кафедры Материалы функциональной электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Вишняков Николай Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры Микро- и наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Рязанский государственный радиотехнический университет"

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»

Защита состоится “16” июня 2016 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПб ГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте: <http://www.eltech.ru>

Автореферат разослан “15” апреля 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04,
д.ф.-м.н., профессор



Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В связи с активным развитием отрасли альтернативной энергетики, технологии, связанные с этим направлением, становятся особенно актуальны. Это определяется в первую очередь с экологичностью данного вида энергии [1] и возможностью электрификации удаленных труднодоступных районов, что немаловажно в условиях России (65% страны имеет децентрализованное энергоснабжение). Эти обстоятельства способствуют развитию солнечной энергетики. Растет эффективность фотопреобразователей и снижается стоимость получаемой от них энергии. По некоторым расчетам ценовой паритет стоимости энергии от ископаемых и альтернативных источников будет достигнут уже 2022 году [2].

В последнее время большей прогресс достигнут в разработке двухкаскадных тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния. Системы, базирующиеся на данных модулях, являются одними из наиболее рентабельных по стоимости энергии, что связано с низкой стоимостью их изготовления.

Недостатком данного типа фотоэлектрических преобразователей является сильная фотоиндуцированная деградация аморфного каскада, связанная с эффектом Стеблера-Вронского[3]. Применение в структуре солнечного модуля входного широкозонного окна и промежуточного отражателя на основе слоев SiO_x с наночастицами кремния (nc-Si/ SiO_x :H) позволяет уменьшить толщину собственного слоя аморфного каскада без снижения его эффективности, что позволяет уменьшить влияние эффекта Стеблера-Вронского.

Цель диссертационной работы заключается в увеличении эффективности двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля на основе аморфного и микрокристаллического кремния, за счет применения в структуре промежуточного отражателя и широкозонного входного окна на основе nc-Si/ SiO_x :H.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование особенностей роста n- и p-типа слоев нестехиометрического оксида с нанокристаллами кремния;
2. Моделирование структур тонкопленочных фотопреобразователей на основе аморфного кремния со слоями nc-Si/ SiO_x :H;

3. Изготовление структур тонкопленочных двухкаскадных фотопреобразователей на основе аморфного и микрокристаллического кремния повышенной эффективности с применением слоев nc-Si/SiO_x:H;
4. Изготовление тонкопленочных солнечных модулей с повышенной стабилизированной эффективностью на основе микроморфного кремния с применением слоев nc-Si/SiO_x:H.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации:

1. Впервые получена структура двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля на основе кремния с применением нестехиометрического оксида кремния с нанокристаллическими включениями кремния в качестве p-слоя широкозонного каскада и промежуточного отражателя по технологии pin с конфигурацией структуры для засветки со стороны подложки.
2. Разработана модель механизма роста наночастиц кремния в матрице SiO_x:H в процессе плазмохимического осаждения
3. Показано, что слои nc-Si/SiO_x:H имеют перколяционный механизм проводимости, обусловленный распределенными в высокоомной матрице SiO_x наночастиц кремния
4. Путем применения модели эффективной среды определен порог протекания электрического тока, который составил ~30-40%. Показано, что высокое значение порога протекания объясняется наличием у доли наночастиц оксидной оболочки.

Практическая значимость полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Получены новые результаты, характеризующие зависимость структурных, оптических и электронных свойств пленок нестехиометрического оксида кремния, содержащего нанокристаллы кремния, в зависимости от условий их синтеза;
2. Синтезированы легированные слои нестехиометрического оксида кремния с наночастицами кремния, с различной оптической шириной запрещенной зоны;

3. Разработаны структуры фотопреобразователей на основе кремния с применением слоев nc-Si/SiO_x:H в качестве промежуточного отражателя и входного широкозонного окна;
4. Показано повышение стабилизированной эффективности двухкаскадного тонкопленочного фотопреобразователя на основе кремния за счет применения промежуточного отражателя на основе слоя nc-Si/SiO_x:H на 0.5%;
5. Показано повышение квантовой эффективности аморфного каскада двухкаскадного тонкопленочного солнечного фотопреобразователя на 5% при применении в структуре входного широкозонного окна на основе nc-Si/SiO_x:H;
6. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «НТЦ ТПТ» и использованы в ходе проведения НИОКР на тему «Применение легированного nc-Si/SiO_x:H в микроморфном модуле».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Введение CO₂ в состав газовой смеси, содержащей силан и водород, в процессе плазмохимического осаждения слоев кремния из газовой фазы приводит к формированию нестехиометрического оксида кремния и изменению механизма формирования наночастиц;
2. В слоях nc-Si/SiO_x:H реализуется перколяционный механизм протекания тока, подтверждаемый резким возрастанием проводимости при объемной доле кристаллической фазы порядка 30%, а высокий уровень порога протекания связан с наличием оксидной оболочки у части нанокристаллов;
3. Применение промежуточного отражателя на основе nc-Si/SiO_x:H в структуре двухкаскадного тонкопленочного фотопреобразователя на основе аморфного и микрокристаллического кремния снижает его деградацию и повышает стабилизированную эффективность, за счет уменьшения толщины собственного слоя аморфного каскада с 300 нм до 200 нм;
4. Применение слоя nc-Si/SiO_x:H в качестве входного широкозонного р-окна верхнего каскада позволяет повысить квантовую эффективность аморфного каскада двухкаскадного тонкопленочного фотопреобразователя на основе аморфного и микрокристаллического кремния, за счет снижения потерь от поглощения.

Апробация результатов работы. Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и школах:

12-ая научная молодежная школа по твердотельной электронике “Физика и технология микро- и наносистем.” (Санкт-Петербург, 2009 г.); Наноматериалы 2010 (Рязань, 2010 г.); международная конференция Аморфные и микрокристаллические полупроводники (Санкт-Петербург, 2010 г. и 2014 г.); 13-я научная молодежная школа по твердотельной электронике “Физика и технология микро- и наносистем.” (Санкт-Петербург, 2010 г.); Физика.СПб Конференция по физике и астрономии (Санкт-Петербург, 2011 г., 2013г. и 2014 г.); Симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника.” (Нижний Новгород, 2011 г.); Rusnanotech (Москва, 2011 г. и 2013 г.); International Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems ICPTTFN-XIV. (Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2013 г.); I Всероссийская конференция «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3-го поколения» (Чебоксары, 2013 г.); VI Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань 2013 г. Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики. Девятая Российская конференция (Санкт-Петербург, 2013 г.); XV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой оптики и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2013 г.); XLII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2013 г.); 1st International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2014" on Optoelectronics, Photonics, Engineering, Nanostructures. (Saint-Petersburg, 2014 г.); XIII международная конференция «Физика диэлектриков» (Санкт-Петербург, 2014 г.); 10-ая Международная Конференция «Физико-химических проблем возобновляемой энергетики» (Черноголовка, 2014 г.); Международная конференция REENFOR-2014 «Возобновляемая энергетика. Прикладные аспекты разработки и практического использования». (Черноголовка, 2014 г.); "Международная молодежная научно-практическая школа по солнечной энергетике". (Санкт-Петербург, 2014 г.); III Международная научно-практическая конференция "Теория и практика современных электрохимических производств" (Санкт-Петербург, 2014 г.); II Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Гибкая электроника» (Санкт-Петербург 2014 г.).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 34 научных работах, среди которых 7 статьи, 5 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 27

работ в трудах, сборниках, а также в других изданиях международных, всероссийских и региональных конференций.

Личный вклад автора заключается в поиске оптимальных режимов формирования образцов тонких пленок нестехиометрического оксида кремния наночастицами кремния, исследовании их свойств с использованием современных диагностических методов эллипсометрии, оптической спектроскопии, измерении температурных зависимостей проводимости и др.), а также формировании на их основе ФЭП разного размера. Автор активно участвовал в обсуждении и анализе полученных результатов, а также в написании статей и тезисов докладов. Роль диссертанта в экспериментальных исследованиях и теоретическом анализе полученных результатов является определяющей.

Объект исследований. Тонкие пленки слоев нестехиометрического оксида кремния, содержащие наночастицы кремния и структуры двухкаскадных тонкопленочных фотопреобразователей.

Методы изготовления и исследования. Образцы слоев nc-Si/SiO_x:H и структуры тонкопленочных фотопреобразователей изготавливались на установке плазмохимического осаждения из газовой фазы КАП-1200, расположенной в ООО «НТЦ ТПТ». Исследования слоев проводились с применением спектрального эллипсометра, установки измерения спектров пропускания и отражения с применением интегрирующей сферы, установки измерения спектров комбинационного рассеяния и установки измерения температурных зависимостей проводимости. Для исследования особенностей наночастиц кремния, входящих в состав пленок, у образцов измерялись спектральные зависимости фотолуминесценции. Часть слоев была исследована методом просвечивающей электронной микроскопии.

На структурах ФЭП проводилось исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральных зависимостей квантовой эффективности. Для анализа стабильности ФЭП образцы подвергались испытаниям на деградацию при освещении AM1.5 в течение 1000 часов при температуре 60 °С.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением набора взаимодополняющих экспериментальных методов, детальным анализом физических явлений и процессов, определяющих свойства исследуемых структур, а также использованием современных литературных источников

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 131 наименование. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, включая 108 рисунков и 15 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, поставлены задачи исследований, дан анализ научной новизны полученных результатов и их практической ценности, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен литературный обзор. Изложены основные подходы к получению пленок нестехиометрического оксида кремния с нанокристаллическими включениями кремния. Обоснована актуальность темы исследования. Показано наличие зависимости основных физических параметров пленок nc-Si/SiO_x:H от параметров процесса плазмохимического осаждения, таких как соотношение силана и углекислого газа, содержание легирующего газа, разбавление силана водородом. В выводах к главе, на основании проведенного литературного обзора, сформулированы основные задачи диссертации.

Во второй главе рассмотрены методы изготовления и исследования пленок nc-Si/SiO_x:H и структур тонкопленочных фотопреобразователей.

Наиболее важными характеристиками пленок нестехиометрического оксида кремния, содержащего нанокристаллы являются:

- Доля кристаллической фазы в составе пленки (X_c);
- Проводимость (σ);
- Коэффициент преломления на длине волны 600 нм (n_{600})
- Энергия фотона, при которой поглощение достигает 10^4 см^{-1} (E_{04})

Данные параметры определялись с помощью таких методик, как спектроскопия комбинационного рассеяния, измерение температурных зависимостей электропроводности, спектроскопической эллипсометрии, измерения спектральных зависимостей пропускания и отражения.

Для изучения структурных особенностей пленок nc-Si/SiO_x:H в работе применялся метод просвечивающей электронной микроскопии. В главе приведено

описание процедуры подготовки образцов, для исследования распределения наночастиц по толщине пленки.

На изготовленных структурах измерялись вольт-амперные характеристики и квантовая эффективность. В качестве характеризующих параметров были использованы:

- Напряжение холостого хода (U_{oc})
- Ток короткого замыкания (I_{sc})
- Эффективность (E_{eff})
- Фактор заполнения (FF)
- Последовательное и параллельное сопротивления (R_s и R_p)
- Квантовая эффективность преобразования ($QE(\lambda)$)

Фотоэлектрические параметры ячеек измерялись с применением имитатора солнечного излучения и установки измерения квантовой эффективности.

В главе приведены методы изготовления и подготовки образцов отдельных слоев nc-Si/SiO_x:H. Разобрана процедура подготовки образцов, для наблюдения структуры пленок методом просвечивающей электронной микроскопии, для исследования особенностей распределения наночастиц по толщине. Подробно описывается технологический процесс изготовления опытных образцов фотопреобразователей. Приведено описание использованного в ходе написания диссертации оборудования.

В третьей главе приведены результаты исследования свойств слоев nc-Si/SiO_x:H n- и p-типа полученных при различных параметрах процесса плазмохимического осаждения. Для изготовления пленок и структур использовался метод стимулированного плазмой осаждения из газовой фазы. В работе использовались установки плазмохимического осаждения KAI 1200 производства компании Oerlikon.

В ходе работы содержания кристаллической фазы в составе полученных пленок определялось методами спектроскопии комбинационного рассеяния. В результате данного исследования были получены зависимости содержания кристаллической фазы в составе пленок nc-Si/SiO_x:H и nc-Si/a-Si:H, представленные на рисунке 1. Как видно из рисунка 1, зависимости доли кристаллической фазы в составе пленки от мощности разряда плазмы для данных слоев противоположны.

В главе показано, что данный факт связан с изменением механизма образования наночастиц кремния в процессе плазмохимического роста пленок. В частности, согласно [4], энергия связи Si-Si составляет 53 ккал/моль, а энергия связи Si-O 108 ккал/моль. В связи с тем, что энергия связи Si-O в 2 раза превышает энергию связи Si-Si, можно утверждать, что скорость травления SiO матрицы будет значительно ниже.

Зависимости доли кристаллической фазы пленок nc-Si/a-Si:H и nc-Si/SiO_x:H от давления (рисунок 2.) имеют значительные отличия. Особенности образования кристаллической фазы в составе слоев nc-Si/a-Si:H объясняются в статье [5]. В случае nc-Si/SiO_x:H, максимума в исследованном диапазоне не наблюдается, а с повышением давления проявляется рост доли кристаллической фазы при давлениях больше 2.5 мбар.

При исследовании спектров фотолюминесценции было выявлено уменьшение размера наночастиц при уменьшении доли кристаллической фазы, при этом размер наночастиц составил ~2 нм. На основании данных фактов показано, что формирование наночастиц, находящихся в составе пленки, происходит преимущественно в объеме плазмы.

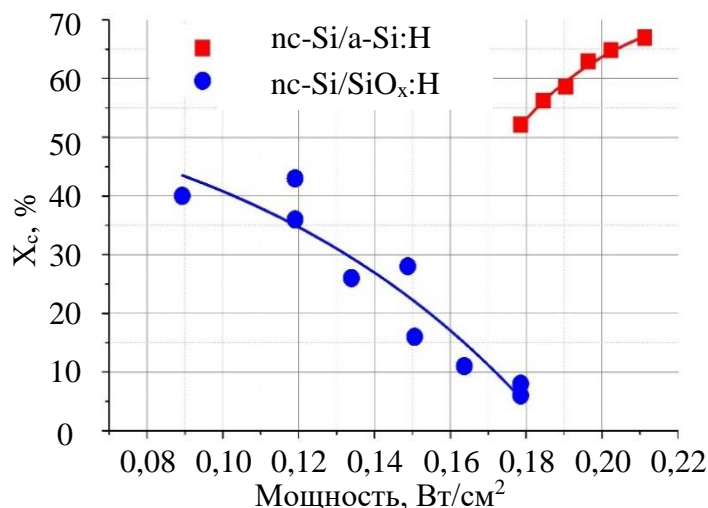


Рисунок 1 - Зависимости объемной доли кристаллической фазы в пленках для слоев аморфного гидрогенизированного кремния, содержащего нанокристаллы кремния (nc-Si/a-Si:H), и слоев гидрогенизированного нестехиометрического оксида кремния, содержащего нанокристаллы кремния (nc-SiO_x:H), при различных мощностях разряда

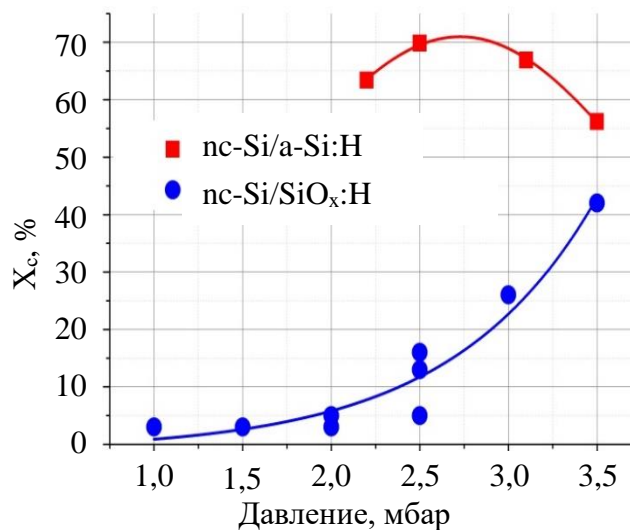


Рисунок 2 - Зависимости содержания кристаллической фазы в объеме пленки для слоев аморфного гидрогенизированного кремния, содержащего нанокристаллы кремния (nc-Si/a-Si:H), и слоев гидрогенизированного нестехиометрического оксида кремния, содержащего нанокристаллы кремния (nc-Si/SiO_x:H), при различных давлениях в процессной камере установки плазмохимического осаждения.

Для проверки данной теории была сделана микрофотография методом просвечивающей электронной микроскопии, приведённая на рисунке 3. На фотографии можно наблюдать равномерное распределение нанокристаллов кремния во всем объеме пленки. Спектры комбинационного рассеяния, измеренные в процессе исследования объемной доли кристаллической фазы, подтверждают, что данные включения являются нанокристаллами. Эти факты коррелируют с предложенной теорией формирования слое nc-Si/SiO_x в процессе плазмохимического осаждения, при введении углекислого газа в состав рабочей газовой смеси на основе силана и водорода.

Важной особенностью обладает зависимость удельной проводимости при комнатной температуре от доли кристаллической фазы в составе пленок (рисунок 4.). Зависимости проводимости для n- и p-типов слоев были смоделированы по модели эффективной среды. Результаты расчетов подтвердили высокий уровень значения порога протекания (~30%). Высокий уровень порога протекания был подтвержден результатами исследования фотолюминесценции. В работе показано, что высокое значение порога протекания связано с наличием

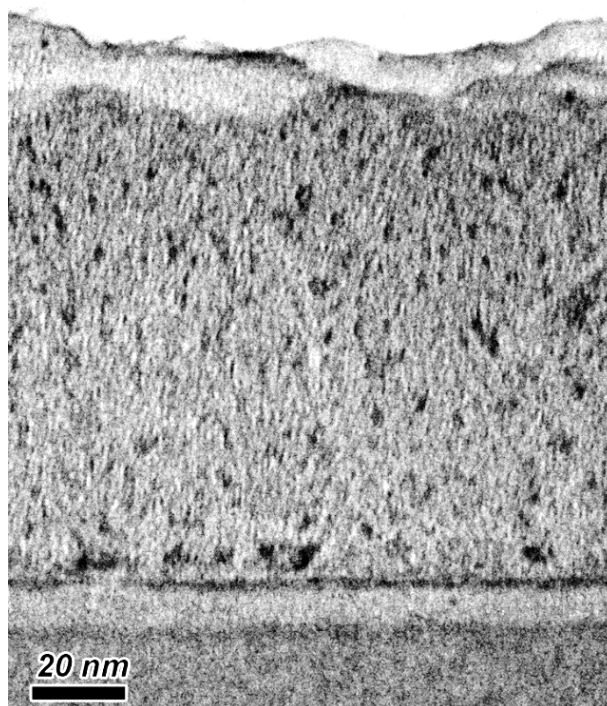


Рисунок 3 - Микрофотография пленки nc-Si/SiO_x:H полученная методом просвечивающей электронной микроскопии.

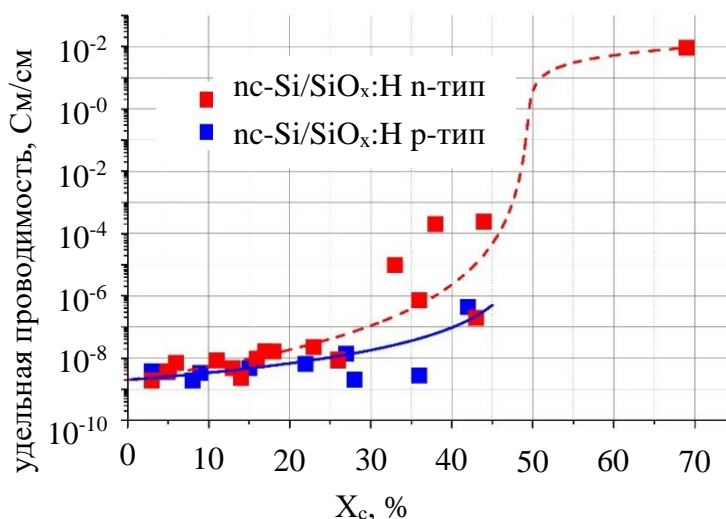


Рисунок 4 - Зависимости удельной проводимости для слоев nc-Si/SiO_x:H p-типа (круглые точки) и n-типа (квадратные точки)

смоделированы по модели эффективной среды. Результаты расчетов подтвердили высокий уровень значения порога протекания (~30%). Высокий уровень порога протекания был подтвержден результатами исследования фотолюминесценции. В работе показано, что высокое значение порога протекания связано с наличием

у доли нанокристаллов оксидной оболочки, образующейся в процессе плазмохимического осаждения слоев.

Так же в главе были определены параметры роста слоев SiO_x с нанокристаллическими включениями кремния оптимальные для применения в структуре двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля в качестве входного широкозонного окна и промежуточного отражателя.

Для слоев n-типа были определены следующие параметры процесса: соотношение силана и углекислого газа 1 к 2; соотношение силана к водороду 1 к 190; давление в процессной камере 2.5 мбар; мощность накачки разряда плазмы 0.12 Вт/см²; Соотношение фосфина к силану 0.022. При этом были получены следующие параметры слоев: $n_{600} \sim 2.0$; $X_c \sim 30\%$; Проводимость $>10^{-7}$ См/см; $E_{04} \sim 2.5$ эВ.

Для слоев p-типа параметры процесса составили: соотношение силана и углекислого газа 1 к 1; соотношение силана к водороду 1 к 300; давление в процессной камере 3.5 мбар; мощность накачки разряда плазмы 0.15 Вт/см²; Соотношение ТМБ к силану 0.006. При этом были получены следующие параметры слоев: $n_{600} \sim 2.1$; $X_c \sim 30\%$; Проводимость $>10^{-7}$ См/см; $E_{04} > 2.1$ эВ.

В четвертой главе приведены результаты моделирования и исследования структур двухкаскадные тонкопленочных ФЭП на основе кремния с применением слоев nc-Si/SiO_x:H.

Моделирование проводилось с применением программного пакета «Afors NET». Данная программа позволяет производит моделирование с учетом изменения оптического дизайна структуры за счет отражения света с обратной стороны структуры и увеличения ширины запрещенной зоны входного окна. На основании моделирования показано, что применение промежуточного отражателя и входного широкозонного окна на основе nc-Si/SiO_x:H позволяет снизить толщину собственного слоя аморфного каскада. Согласно результатам проведенного расчета, допустимо снизить толщину собственного слоя аморфного каскада, при применении промежуточного отражателя с 300 нм до 200 нм. Аналогичный результат был получен для входного широкозонного окна. Согласно результатам моделирования, совокупный эффект, от внедрения слоев SiO_x с наночастицами кремния в качестве промежуточного отражателя и входного широкозонного окна, может позволить уменьшить толщину собственного слоя аморфного каскада до 150 нм.

В главе рассмотрены результаты применения слоев SiO_x с нанокристаллами кремния в структуре двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля. Показано повышение эффективности двухкаскадного тонкопленочного фотопреобразователя на основе аморфного и микрокристаллического кремния при применении в структуре слоев $\text{nc-Si/SiO}_x:\text{H}$.

На рисунке 5 приведены спектры квантовой эффективности ячеек ФЭП с применением промежуточного отражателя на основе $\text{nc-Si/SiO}_x:\text{H}$ p-типа. Видно, что введение промежуточного отражателя повышает квантовую эффективность аморфного (широкозонного) каскада в красной области. Толщина собственного слоя каскада была уменьшена до 200 нм, при этом плотность тока верхнего каскада сохранилась (по сравнению с использованным до этого 300 нм без промежуточного отражателя). Сохранение плотности тока необходимо, для согласования токов каскадов, при уменьшении толщины собственного слоя аморфного pn -перехода.

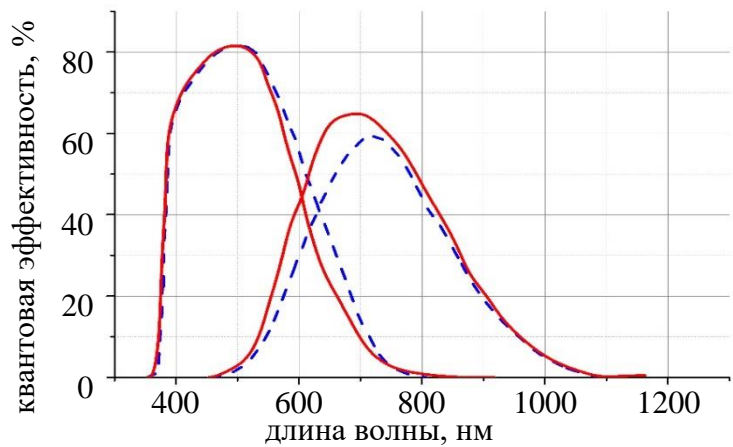


Рисунок 5 - Квантовая эффективность ячеек двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля. Сплошная кривая — без промежуточного отражателя, пунктирная кривая — с промежуточным отражателем.

Показано, что в результате уменьшения толщины аморфного каскада была уменьшена деградация эффективности (рисунок 6) относительно исходного значения с ~20% (с 10,2% до 8,2% эффективности за 1000 часов засветки при интенсивности 1000 Вт/м^2 и температуре 60°C) до ~15 % (с 11% до 9,2%). Такое улучшение позволяет повысить стабилизированную эффективность

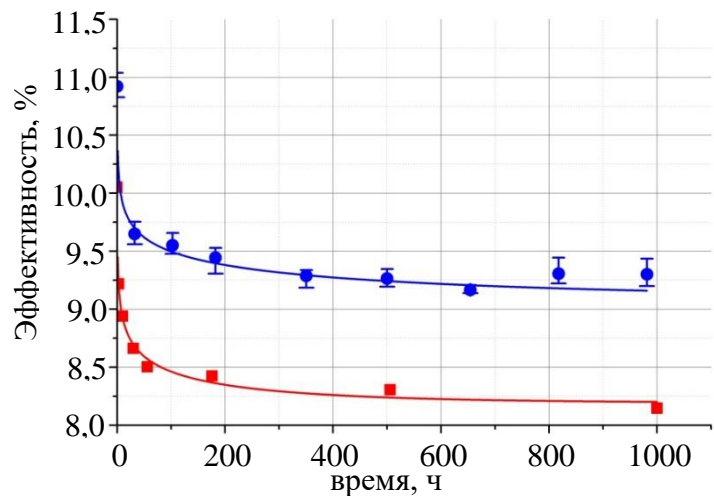


Рисунок 6 - Деградация эффективности двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля. Квадратные точки — без широкозонного окна; круглые точки — с широкозонным $\text{nc-Si/SiO}_x:\text{H}$

солнечного модуля на 0.5 %. На рисунке 7 приведены кривые квантовой эффективности, полученные при применении широкозонного входного окна. Видно, что модификация р-слоя позволяет повысить квантовую эффективность аморфного каскада в синей области. Для согласования работ выхода из оксида цинка и $\text{pc-Si/SiO}_x\text{:H}$ р-слоя были применены подслои из аморфного кремния и карбида кремния. Совокупная прибавка квантовой эффективности для случая с карбидным подслоем составила ~5%.

На основании представленных данных был сделан вывод о возможности применения слоев нестехиометрического оксида кремния в качестве входного широкозонного окна и промежуточного отражателя двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля.

По результатам исследований, приведенных в диссертационной работе, была изготовлена партия двухкаскадных тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния с применением промежуточного отражателя (рисунок 8). Сравнение деградации изготовленных солнечных модулей, с солнечными модулями, без промежуточного отражателя, приведены в таблице 1. Исходные мощности всех модулей изученной выборки находятся на одном уровне. Деградация модулей без промежуточного отражателя составляет приблизительно 20%

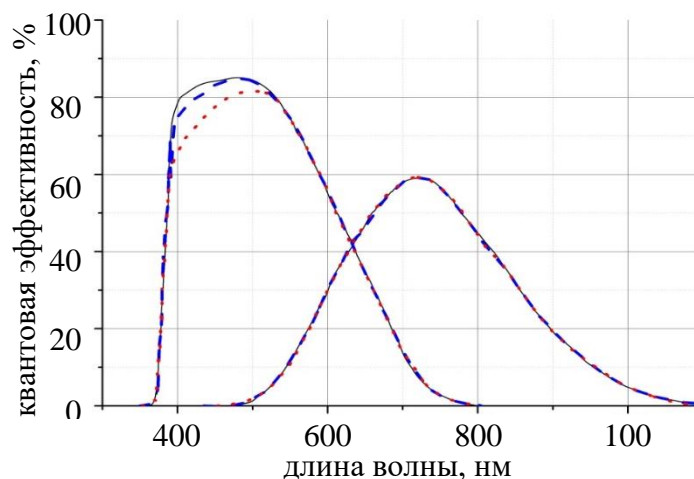


Рисунок 7 - Квантовая эффективность ячеек двухкаскадного тонкопленочного солнечного модуля. Точечная кривая — без широкозонного окна; пунктирная кривая — с широкозонным $\text{pc-Si/SiO}_x\text{:H}$ окном и подслоем из аморфного кремния; сплошная кривая — с широкозонным $\text{pc-Si/SiO}_x\text{:H}$ окном и подслоем из карбида кремния



Рисунок 8 - Общий вид изготовленного солнечного модуля размером 1100 мм x 1300 мм с применением промежуточного отражателя

от исходной мощности. Деградация солнечных модулей с модифицированной структурой составляет приблизительно 15%. Приведенные результаты подтверждают повышение стабильности двухкаскадных тонкопленочных солнечных модулей, при применении промежуточного отражателя и уменьшении толщины собственного слоя до 200 нм.

Таблица 1 - Сравнение деградации двухкаскадных тонкопленочных солнечных модулей на основе аморфного и микрокристаллического кремния: Тип 1 — без применения в структуре фотопреобразователя промежуточного отражателя на основе $\text{nc-Si/SiO}_x\text{:H}$ и толщиной собственного слоя аморфного каскада 300 нм; тип 2 — с применением в структуре фотопреобразователя промежуточного отражателя на основе $\text{nc-Si/SiO}_x\text{:H}$ и толщиной собственного слоя аморфного каскада 200 нм.

Тип солнечного модуля	Мощность до деградации	Время деградации	Мощность после деградации	Деградация
Тип 1	134,6	290	108,8	0,192
Тип 1	133,6	202	107,9	0,193
Тип 1	135,0	204	108,7	0,195
Тип 1	136,7	254	109,9	0,196
Тип 1	135,1	290	108,5	0,197
Тип 1	135,0	261	108,1	0,199
Тип 1	131,8	231	105,5	0,199
Тип 1	135,6	285	108,3	0,201
Тип 1	138,1	227	110,2	0,202
Тип 1	134,6	290	107,4	0,202
Тип 2	139,3	253	118,7	0,148
Тип 2	137,9	253	117,4	0,148
Тип 2	137,1	254	116,6	0,149
Тип 2	137,2	288	116,7	0,150
Тип 2	140,4	235	119,3	0,150
Тип 2	139,7	288	118,7	0,151
Тип 2	134,7	266	114,3	0,151
Тип 2	137,8	236	116,9	0,152
Тип 2	138,9	251	117,8	0,152
Тип 2	131,5	281	111,5	0,152

В главе приведен экономический расчет выгоды, показывающий, что экономический эффект от внедрения данной технологии на завод с производительностью 1 000 000 модулей в год, согласно приведенным в диссертации расчётам, может составить до 672 000 000 рублей в год. Расчет проводился исходя из средней стоимости одного вата мощности солнечного модуля ~1\$ и курса доллара 60 рублей (текущий курс ноября 2015 года).

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана технология получения пленок nc-Si/SiO_x:H методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, для применения в структуре двухкаскадного тонкопленочного фотопреобразователя на основе аморфного и микрокристаллического кремния.
2. Исследованы свойства слоев nc-Si/SiO_x:H, полученных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы. Показано, что при введении углекислого газа в газовую смесь происходит изменение процесса формирования нанокристаллов.
3. Выявлено, что в процессе плазмохимического осаждения слоев nc-Si/SiO_x:H образование наночастиц происходит в объеме плазмы.
4. В результате моделирования структур тонкопленочных фотопреобразователей на основе аморфного кремния со слоями nc-Si/SiO_x:H показана возможность уменьшения толщины аморфного каскада тонкопленочного фотопреобразователя на основе кремния с 300 до 200 нм при применении промежуточного отражателя.
5. Показано повышение стабилизированной эффективности структур двухкаскадных тонкопленочных ФЭП на 0.5% при применении промежуточного отражателя на основе nc-Si/SiO_x:H.
6. Показано повышение квантовой эффективности аморфного каскада двухкаскадного ФЭП при применении входного широкозонного окна на основе nc-Si/SiO_x:H.
7. Показана возможность управления долей кристаллической фазы в составе пленок nc-Si/SiO_x:H за счет изменения давления в процессной камере и мощности разряда плазмы.

8. Внедрение технологии модулей с повышенной на 0.5% стабилизированной эффективностью на завод ООО «Хевел» дает экономический эффект в 672 000 000 рублей в год.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кукин А.В. и др. Особенности слоев аморфного кремния, полученных методом стимулированного плазмой осаждения из газовой фазы, содержащей четырехфтористый кремний // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, № 3. С. 312–315.
2. Кукин А.В. и др. Влияние фемтосекундного лазерного облучения пленок аморфного гидрогенизированного кремния на их структурные, оптические и фотоэлектрические свойства // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, № 6. С. 769–774.
3. Кукин А.В. и др. Изучение электронных свойств пленок гидрогенизированного аморфного кремния методами фемтосекундной спектроскопии // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, № 10. С. 1367–1370.
4. Кукин А.В. и др. Спектральные особенности фотоответа структур с наночастицами кремния // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, № 11. С. 1555–1561.
5. Кукин А.В. и др. Особенности роста слоев нестехиометрического оксида кремния с нанокристаллами, получаемых методом плазмохимического осаждения // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ.» 2015. Т. 9'2015. С. 3–5.
6. Kukin A.V. et al. Influence of oxygen on light emission from amorphous silicon nanoclusters // Phys. status solidi. 2012. Vol. 9, № 6. P. 1471–1473.
7. Kukin A.V. et al. Semitransparent solar modules based on amorphous and microcrystalline silicon // J. Phys. Conf. Ser. 2014. Vol. 572. P. 1–5.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scheer H. The Solar Economy. Renewable Energy for a Sustainable Global Future. 2005. 366 p.
2. Salkalachen S. Sun Power // Curr. Sci. 2011. № 1839. P. 1247–1252.
3. Staebler D.L., Wronski C.R. Optically induced conductivity changes in discharge-produced hydrogenated amorphous silicon // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, № 6. P. 3262.

4. Некрасов Б.В. Основы общей химии. Том 1. 3rd ed. Издательство “Химия,” 1973. 656 p.
5. Seshan K. Handbook of thin-film deposition processes and techniques. 2nd ed. Santa Clara: William Andrew Publishing, 2002. 650 p.