

На правах рукописи



Морозов Иван Александрович

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНО-
ОРИЕНТИРОВАННЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в лаборатории возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук»

Научный руководитель:

Гудовских Александр Сергеевич

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

Шерченков Алексей Анатольевич, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», г.Москва

Гончар Кирилл Александрович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита диссертации состоится «10» декабря 2020 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова /Ленина/» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «9» октября 2020 г.

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



Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Энергетика будущего в значительной степени будет состоять из возобновляемых источников энергии. Среди них фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии в настоящее время признано наиболее перспективным способом генерации электроэнергии. Тем не менее, на данный момент стоимость фотоэлектрических источников энергии слишком высока, чтобы конкурировать с традиционными источниками энергии, такими как газ и нефть. Решить эту проблему может дальнейшее совершенствование фотопреобразовательных устройств (солнечных элементов, СЭ) путем увеличения их эффективности (КПД) и оптимизации производственного процесса. Снижение веса солнечных батарей также является немаловажной задачей для перспективных применений, таких как легкие крыши, гелиостаты (дирижабли), автомобили, и другие сложные геометрические объекты. Для этого требуются новые, прорывные подходы к разработке материалов и конструкций, позволяющих использовать в том числе, гибкие носители (подложки) для солнечных батарей.

В настоящее время на рынке наземной солнечной энергетики основную часть СЭ составляют преобразователи на основе кристаллического кремния и тонкопленочные солнечные элементы (a-Si:H, CdTe, CIGS). Первая категория солнечных элементов обладает достаточно высокими значениями КПД, но их главный недостаток – высокая цена, обусловленная стоимостью используемой подложки кремния. СЭ на основе a-Si:H дешевле, но сильно уступают в КПД. СЭ на основе CdTe и CIGS близки по КПД к первой категории, однако использование при их производстве редкоземельных и к тому же токсичных элементов значительно ограничивает масштаб их распространения.

В данной работе предлагается реализовать новый подход к конструкции и технологии формирования фотоэлектрических преобразователей – изготовление вертикально-ориентированных многопереходных кремневых наногетероструктур. Предлагаемый подход заключается в том, что на подложке кремния с помощью плазмохимического травления или метода металл-стимулированного жидкостного травления формируется столбчатая (волоконная) структура. Для формирования двухпереходного СЭ на полученную развитую поверхность осаждается слой широкозонного эмиттера, формирующий фотоактивный гетеропереход, который является нижним переходом на основе кристаллического кремния. Затем формируется туннельный переход, поверх которого на столбчатой поверхности осаждается p-i-n структура на основе a-Si:H, являющаяся верхним переходом. Таким образом, создается не классический планарный переход, а вертикальный переход, часть которого расположена перпендикулярно поверхности подложки. В полученных вертикальных областях поглощение солнечного излучения значительно выше, чем в планарном варианте, что предполагает увеличение оптической толщины i-области p-i-n структуры без увеличения её физической («электрической») толщины, и, следовательно, без уменьшения тянущего электрического поля, разделяющего носители заряда и препятствующего рекомбинации. Повышение эффективной оптической толщины верхнего перехода с сохранением электрического поля позволяет повысить КПД верхнего перехода и достичь больших значений тока короткого замыкания, и следовательно, получить согласование по току с нижним переходом. Однако для достижения результатов, имеющих практический интерес для дальнейшего успешного развития солнечной энергетики, необходимо решить целый ряд фундаментальных проблем, связанных как с технологией формирования наноструктур, так и с дальнейшим исследованием их электрофизических свойств.

В рамках данной работы рассмотрены различные фундаментальные аспекты развития фотоэлектрических преобразователей на основе вертикально-ориентированных кремневых

наноструктур: разработка технологий, исследование свойств материалов и границ раздела, изготовление устройств и их характеристика, разработка физических моделей.

Цель работы.

Разработка технологии микроструктурирования кремния для солнечных элементов на основе кремниевых вертикально-ориентированных структур.

Для достижения обозначенной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработка технологии формирования вертикально-ориентированных кремниевых структур методами металл стимулированного жидкостного травления и сухого плазмохимического травления.

2. Формирование и исследование фотоэлектрических свойств солнечных элементов на основе вертикально-ориентированных кремниевых структур.

3. Оценка влияния геометрии и технологических параметров на фотоэлектрические и электрофизические свойства вертикально-ориентированных кремниевых структур.

Научная новизна:

1. Впервые разработана технология формирования кремниевых вертикально-ориентированных структур с высоким аспектным соотношением (15/1 для пары высота-диаметр), включающая литографию с помощью латексных сфер, использование промежуточного слоя оксида кремния и криогенное сухое травление.

2. Впервые разработана технология литографии с помощью латексных сфер диаметром от 1 до 2 мкм, наносимых на поверхность кремния и оксида кремния, обеспечивающей полное покрытие 100 мм кремниевых подложек без шага предварительной гидрофилизации поверхности кремния.

3. Впервые сформированы двухпереходные солнечные элементы на основе вертикально-ориентированных кремниевых структур и аморфного гидрогенизированного кремния и продемонстрирована возможность существенного увеличения тока короткого замыкания верхнего перехода без изменения его толщины.

4. Впервые показано усиленное негативное влияние поверхностных состояний на боковых гранях кремниевых волокон, приводящее к резкому снижению квантовой эффективности, в случае, когда ширина области пространственного заряда соизмерима с радиусом волокон.

5. С помощью проведённого сравнительного анализа влияния различных режимов сухого плазмохимического травления впервые было показано, что режим криогенного травления с использованием газовой смеси SF_6 и O_2 позволяет максимально сохранить эффективное время жизни неосновных носителей заряда в кремниевой подложке на уровне 0.5 мс, что позволяет достичь КПД солнечных элементов на основе кремния более 20 %.

Практическая значимость.

1. Разработан технологический процесс литографии с помощью латексных сфер диаметром от 1 до 2 мкм, наносимых на поверхность кремния и оксида кремния, обеспечивающий полное покрытие в один монослой на всей поверхности кремниевых подложек диаметром 100 мм с возможностью контролируемого изменения их размера.

2. Разработаны физико-технологические основы процесса формирования двухпереходных солнечных элементов на основе вертикально-ориентированных кремниевых структур, состоящих из волокон кристаллического кремния, образующих нижний переход, и осажденного сверху верхнего p-i-n перехода на основе аморфного гидрогенизированного кремния.

3. Разработаны технологические основы формирования вертикально-ориентированных кремниевых структур с соотношением высоты волокон к диаметру 15:1, используя литографию с помощью латексных сфер, жесткую промежуточную маску на основе оксида кремния и технологию сухого плазмохимического травления, включая глубокое криогенное травление кремния.

4. Выявлено влияние технологических параметров процесса микроструктурирования поверхности кремния на оптические и электрофизические свойства полученных вертикально-ориентированных кремниевых структур.

5. Результаты работы по разработке технологии формирования микроструктурированной поверхности кремния были использованы при разработке технологии создания солнечных элементов на основе гетеропереходов между аморфным гидрогенизированным и кристаллическим кремнием в ООО «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. При формировании методом жидкостного металл-стимулированного травления фотопреобразовательных структур на основе кремниевых волокон, радиус которых (0.05...0.1 мкм) меньше ширины области пространственного заряда, увеличение длины кремниевых волокон (более 1 мкм) приводит к существенному снижению квантовой эффективности в коротковолновой области fotocувствительности из-за усиления влияния поверхностной рекомбинации в следствии слабого изгиба зон у поверхности волокон.

2. Использование вертикально-ориентированных структур для двухпереходных солнечных элементов на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния позволяет увеличить внешнюю квантовую эффективность и ток короткого замыкания верхнего p-i-n a-Si:H перехода за счёт увеличения поглощения без изменения его толщины.

3. Использование литографии с помощью латексных сфер, твёрдой маски на оксиде кремния и сухого травления с индуктивно связанной плазмой при криогенных температурах (-100...-140 °C) позволяет получать на всей площади 100 мм кремниевых подложек равномерный упорядоченный массив кремниевых волокон с вертикальными стенками и с отношением высоты к диаметру 15 к 1.

4. Метод плазмохимического травления кремния с индуктивно связанной плазмой мощностью 800-1500 Вт при криогенных температурах (-100...-140 °C) в газовой среде с отношением массовых долей SF₆ и O₂ как 5/1 позволяет достичь минимального повреждения кремниевой подложки, сохраняя значения эффективного времени жизни неосновных носителей заряда на уровне более 0.5 мс, что является необходимым условием для достижения кремниевыми солнечными элементами эффективности более 20 %.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на национальных и международных конференциях и семинарах: European Materials Research Society (E-MRS) Spring Meeting 2013 (Strasbourg, France, 27-31 May 2013), 2016 (Lille, France, 2-6 May 2016), 2017 (Strasbourg, France, 22-26 May 2017), 2018 (Strasbourg, France, 18-22 June 2018), 2019 (Nice, France, 27- 31May, 2019); 27th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS) Seoul, Korea 21-25 August 2017; Международная школа-конференция "Saint-Petersburg OPEN" по оптоэлектронике, фотонике, нано- и нанобиотехнологиям 2016, 2017, 2018 Санкт-Петербург, Российская Федерация; Российская молодёжная конференция по физике и астрономии Физика.СПб Санкт-Петербург, 23-24 октября 2013; Российская конференция "Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики", Санкт-Петербург, 11-14 ноября 2013 года, 16-18 ноября 2015 г, IX Международная конференция "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". Санкт-Петербург, 7-10 июля 2014 года.

Личный вклад.

В процессе работы над материалами диссертации личный вклад автора заключался в постановке задач и участии во всех этапах формирования структур для создания образцов с параметрами, необходимыми для фотоэлектрических и оптических измерений, проведённых непосредственно им самим. Далее, им были проанализированы экспериментальные результаты с учётом выполненного им компьютерного моделирования и литературных данных и сделаны выводы на их основе.

Публикации.

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 17 работах, в том числе 8 в журналах перечня ВАК, 8 в журналах, рецензируемых Scopus.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 161 страницы с 131 рисунками и 20 таблицами. Список литературы содержит 66 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована ее главная цель и решаемые в ней задачи, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** представлен литературный обзор достигнутых на сегодняшний день результатов в различных областях, связанных с созданием кремниевых солнечных элементов. Сначала дана краткая история развития солнечных элементов до сегодняшнего дня, рассмотрены основные процессы, происходящие при плазмохимическом травлении. Показано, что в настоящее время кремний преимущественно используется в производстве солнечных элементов из-за его доступности и относительно невысокой стоимости. Рекордный КПД кремниевых солнечных элементов составляет 26,7% [1], что уже довольно близко к теоретическому пределу КПД Шокли-Кайссера в 30% [2]. Дальнейшее развитие солнечной энергетики требует увеличения эффективности фотоэлектрического преобразования, снижения их стоимости и принципиального изменения их качественных характеристик, в частности, создания гибких солнечных элементов. Таким образом, показано, что необходимо изучить новые концепции и подходы создания кремниевых СЭ. В главе рассматриваются различные солнечные элементы на основе вертикально-ориентированных структур, такие как черный кремний, полученный сухим травлением [3], и металл-стимулированное жидкостное химическое травление (MACE) [4], где было показано, что коэффициент отражения экспоненциально уменьшается с увеличением толщины слоя структурированного кремния. Рассмотрен вопрос влияния сухого травления на образование дефектов в кремнии. Рассмотрены различные солнечные элементы на основе структурированного кремния.

В **главе 2** приведено краткое изложение методов травления, осаждения, постростовой обработки и экспериментальных методик, используемых для создания и анализа СЭ.

В главе описывается установка реактивно-ионного травления Oxford Plasmalab 100 ICP380. Установка плазмохимического травления Oxford Instruments PlasmaLab 100 ICP380 предназначена для травления широкого спектра различных материалов, применяемых в полупроводниковой технике. В работе представлены основные узлы и технологические параметры, позволяющие осуществлять плазмохимическое травления требуемого качества. Также в главе описана установка плазмохимического осаждения Oxford Instruments PlasmaLab 100 PECVD, предназначенная для нанесения диэлектрических и полупроводниковых слоёв (SiO_2 , Si_3N_4 , a-Si:H, a-SiC:H) на пластины диаметром до 200 мм. Для вакуумного магнетронного напыления металлов и диэлектрических покрытий различного функционального назначения: просветляющие покрытия, контактные площадки, маски для фотолитографии, прозрачные проводящие покрытия использовалась установка VOC EDWARDS AUTO 500 RF.

Далее, описывается процедура измерения спектральных зависимостей квантовой эффективности на основе разработанной установки, а также методика измерения квазистационарной фотопроводимости для определения эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в кремниевых подложках.

В **главе 3** рассматривались фотопреобразовательные структуры на основе нановолокон кремния, полученных с использованием металл-стимулированного химического травления кремния (MACE). В главе описано получение волокон, исследование их электрофизических

свойств, а также результаты моделирования зависимости квантовой эффективности от геометрии волокон. Для эксперимента были выбраны 100 мм кремниевые подложки р-типа, легированные бором (0,7-20 Ом·см), с ориентацией (100) и (111). Кремниевые пластины были очищены от органических загрязнений после промывания в ацетоне в течении 2 мин и промывания в этаноле в течении 2 минут. Удаление SiO₂ осуществляли коротким погружением в 40% раствор плавиковой кислоты (HF) с последующим промыванием в 2% HF в течении 1 мин. Далее, образцы были промыты в деионизированной воде и высушены азотом. Эта процедура очистки приводит к образованию терминированной водородом поверхности кремния, которая сохраняет свои свойства в течении нескольких минут [5,6], что позволяет осадить серебро на поверхность кремниевых пластин до образования естественного окисла. Метод химического травления для получения кремниевых нановолокон (SiNW) основан на двухэтапном процессе. На первом этапе наночастицы Ag наносились на поверхности кремниевых пластин путём погружения пластин в 0,01 М водный раствор нитрата серебра (AgNO₃) и 5М водный раствор HF в объёмном соотношении 1:1 на 15 секунд. Далее подложки с нанесённым слоем серебра помещались в раствор H₂O₂ / HF (30% H₂O₂ / 5М HF в объёмном соотношении 1:10) [7,8] на 3, 5, 7 и 10 мин. Наконец, поверхности, полученные после травления, несколько раз промывали в деионизированной воде и высушивали при комнатной температуре. Далее, подложки промывали в концентрированной (65%) азотной кислоте (HNO₃) в течении 5 минут для удаления остаточных наночастиц Ag с поверхности SiNW.

Легированные слои (n)-a-Si:H толщиной 35 нм были осаждены на SiNW методом плазмохимического осаждения (PECVD) при 250°C с использованием установки Oxford Instruments PlasmaLab100. Для достижения более высокого уровня легирования использовали метод циклического легирования. Разработанный в ходе работы метод позволяет получать слои аморфного кремния с низкой энергией активации и высокой проводимостью с сохранением аморфности. Метод циклического легирования позволяет получить слои аморфного кремния n-типа с энергией активации меньше 0,2 эВ и проводимость $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Верхний прозрачный проводящий контакт был сформирован с помощью магнетронного напыления оксида индия, легированного оловом (ITO). Контакты к ITO были сформированы с использованием серебряной пасты. Нановолокна кремния на подложке (100) имеют вертикальную направленность, в то время как на (111) пластинах наклонены на 45° к поверхности (зигзагообразная структура), как показано на рисунке 1.

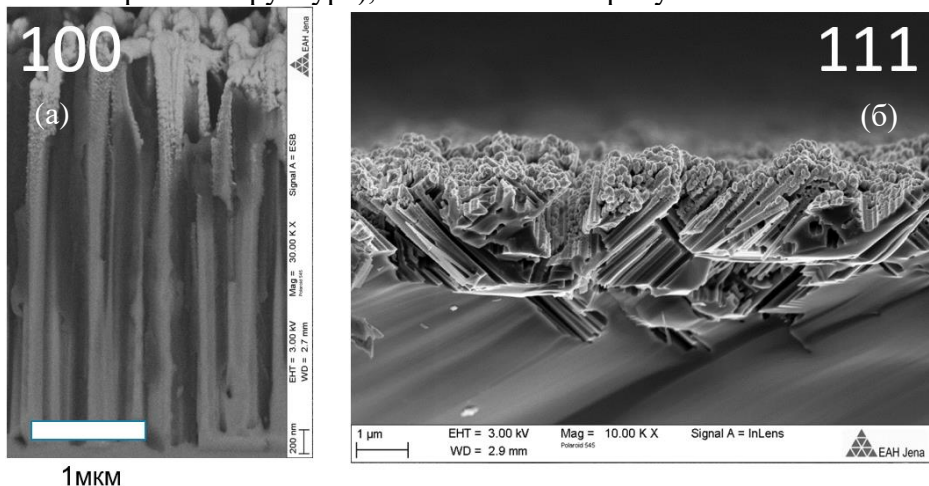


Рисунок 1 – РЭМ изображение поперечного сечения кремниевых нановолокон на подложках (100) (а) и (111) (б) после осаждения a-Si:H и ITO.

Спектры квантовой эффективности для гетеропереходных солнечных элементов на основе SiNW с различной длиной нановолокон, полученных на (100) и (111) кремниевых пластинах, представлены на рисунке 2.

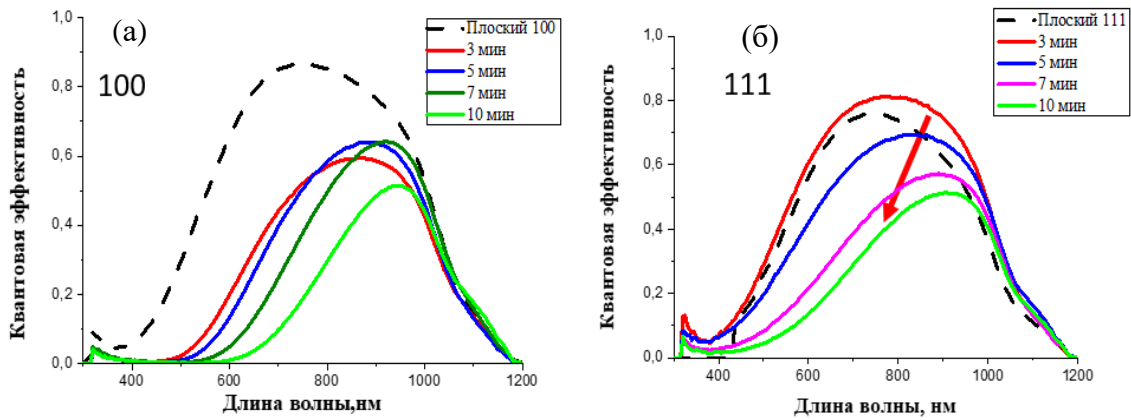


Рисунок 2 – Квантовая эффективность солнечных элементов на основе массива SiNWs на подложках (100) (а) и (111) (б) для различных временем MACE травления и плоских эталонных элементов.

Для структур, изготовленных на подложке (100), увеличение длины нановолокон приводит к резкому снижению внешней квантовой эффективности (КЭ) в коротковолновой области, что указывает на значительные рекомбинационные потери на поверхности SiNW. Для SiNW, полученных травлением подложки (111) в течении 3 минут, КЭ оказывается выше во всем спектральном диапазоне, чем у контрольного плоского образца. Дальнейшее увеличение времени травления приводит к уменьшению коротковолновой КЭ с одновременным увеличением длинноволновой КЭ. В солнечных элементах на основе SiNW, изготовленных на подложках (111), происходят два конкурирующих процесса. Первый – повышенное светопоглощение структурированной поверхности по сравнению с плоским контрольным образцом, что приводит к возрастанию длинноволновой составляющей спектра КЭ. Второй — это поверхностная рекомбинация, которая увеличивается с увеличением длины SiNW и приводит к спаду КЭ в коротковолновой области спектра.

Рекомбинационные потери в гетероструктурных солнечных элементах на основе SiNW были исследованы методом фотолюминесценции (ФЛ). Согласно [9] измерения фотолюминесценции могут быть использованы для оценки уровня рекомбинации на границе раздела a-Si:H/c-Si. Типичный спектр ФЛ для гетероперехода на основе a-Si:H/ SiNW имеет два характерных пика при 865 нм и 1150 нм.

Пик при 1150 нм связан с межзонной излучательной рекомбинацией в кремнии. Интенсивность этого пика зависит от концентрации избыточных носителей заряда в Si, которая уменьшается при интенсивной рекомбинации. Падение сигнала ФЛ со временем травления подтверждает рост рекомбинационных потерь с увеличением длины волокон, наблюдаемый в спектрах КЭ. Второй пик при 865 нм наблюдается только для образца с кремниевыми нановолокнами. Фотолюминесценция (ФЛ) на этой длине волны вероятно связана с излучательной рекомбинацией в нанопорах, образовавшихся на поверхности кремниевых волокон. Шероховатость поверхности боковой стенки SiNW обуславливает их недостаточную пассивацию с помощью a-Si:H.

Для оценки влияния поверхностных состояний на фотоэлектрические свойства была разработана одномерная модель в программе AFORS-HEТ. В модели исследовалось влияние поверхностных состояний на фотоэлектрические свойства. Было показано, что поверхностные состояния существенно влияют на напряжение холостого хода (V_{oc}) и

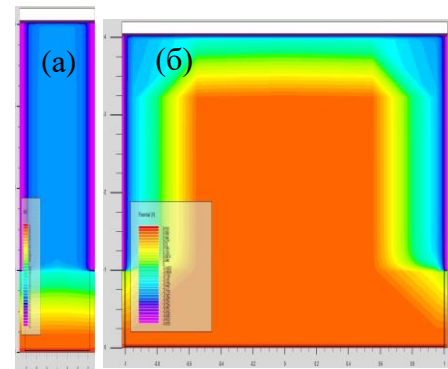


Рисунок 3 – Моделирование потенциального профиля для различных толщин кремниевое волокна. (а) - 0,25мкм, (б) – 1,0 мкм

коэффициент заполнения, но в то же время поверхностные состояния слабо влияют на спектры квантовой эффективности и ток короткого замыкания.

Для объяснения сильного влияния состояний на поверхности кремниевых волокон на КЭ была построена трёхмерная модель в цилиндрической системе координат в программе Silvaco-Atlas (рисунок 3.). Было показано (рисунок 4), что уменьшение толщины волокна приводит к тому, что область пространственного заряда простирается на все сечение волокна и спрямляет зоны (то есть происходит переход к режиму плоских зон).

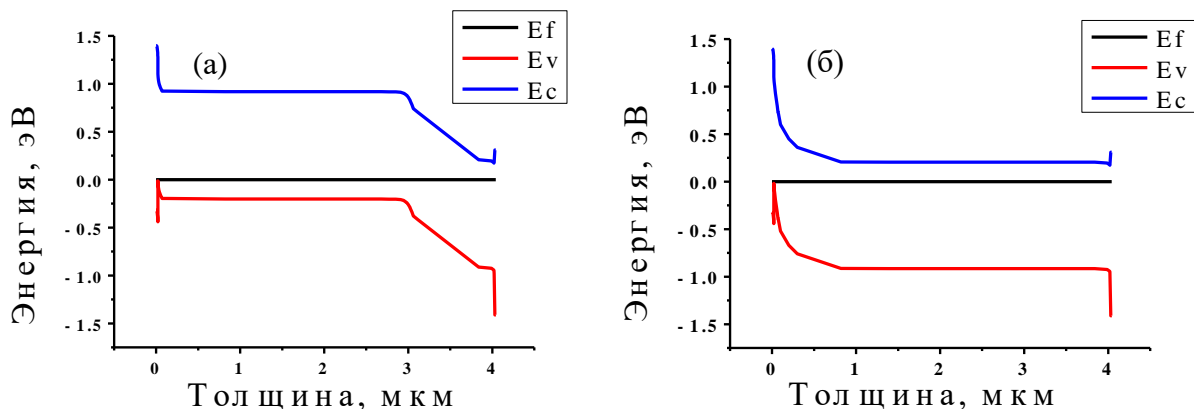


Рисунок 4 – Энергетическая диаграмма продольного сечения кремниевое волокна диаметром 0,25 мкм (а) и 2 мкм (б).

В этом случае резко возрастает чувствительность к поверхностным состояниям. Согласно расчетам КЭ для полностью обедненного волокна с плотностью поверхностных состояний $10^{13} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ (рисунок 5) увеличение его длины приводит к возрастанию уровня рекомбинации и, следовательно, уменьшению квантовой эффективности, что полностью согласуется с экспериментальными данными, представленными выше. Избежать этого негативного эффекта можно при использовании кремниевых волокон радиус которых превышает ширину области пространственного заряда (рисунок 3б). Согласно результатам расчета в этом случае КЭ не уменьшается с ростом длины волокна вплоть до значений плотности поверхностных состояний $10^{13} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$. Таким образом, учитывая, что для создания солнечных элементов применяется кремний с уровнем легирования $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$, диаметр кремниевых волокон должен быть не менее 1 мкм, что невозможно создать с помощью метода металл-стимулированного химического травления кремния.

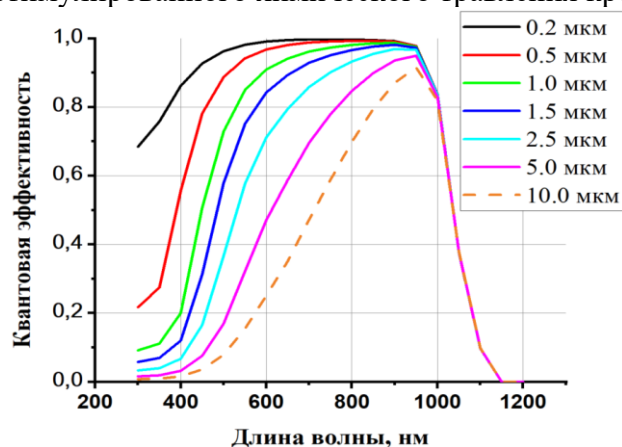


Рисунок 5 – Расчетные спектры КЭ, полученные компьютерным моделированием, для различных длин волокон с диаметром 0,25 мкм и плотностью поверхностных состояний $10^{13} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$.

В главе 4 рассматривались вертикально-ориентированные структуры на кремнии, полученные сухим плазмохимическим травлением при температурах, близких к комнатным. В качестве альтернативы классической литографии в работе рассматривался одностадийный метод нано-микросферной литографии, в котором полистирольные микросферы играют роль маски при травлении кремния. Для нанесения латексных (полистирольных) сфер с диаметром

0,95 и 2 мкм были испробованы несколько методов нанесения латексных сфер: метод опускания капли водного раствора, метод опускания капли спиртового раствора, метод Ленгмюра-Блоджетт и метод центрифугирования. Лучшие результаты показал метод центрифугирования водно-спиртового раствора сфер (рисунок 5).

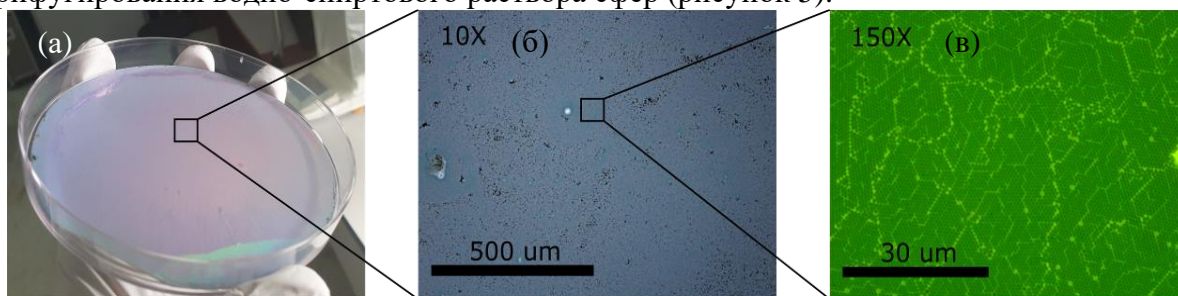


Рисунок 5 – Результат наносферной литографии с увеличением 1x (а), с увеличением 10x (б), с увеличением 150x (в).

Сухое травление кремния производилось в установке реактивно-ионного травления Oxford Plasmalab 100 ICP380. Травление было выполнено в двух разных режимах: в режиме индуктивно связанной плазмы (ИСП) и емкостно связанной плазмы (ЕСП) с использованием хлорсодержащих (Cl_2/BCl_3) и фторсодержащих (SF_6/O_2) газовых смесей. Температура травления составляла -8°C , а давление варьировалось в диапазоне 2–7 мТорр. Мощность ЕСП и ИСП варьировалась в диапазоне 20–150 Вт и 0–2000 Вт, соответственно. Хлорное травление было выполнено в режиме ИСП, так как для кремния в ЕСП режиме травления скорость травления была в 10 раз ниже. Хлорное травление при комнатной температуре с использованием металлической маски показывает практически вертикальные гладкие стенки, но при травлении под маской из латексных сфер происходит травление самой маски, при таком травлении высота кремниевых волокон равна диаметру используемых сфер (рисунок 6а).

С фторной химией режим ИСП является более изотропным по сравнению с режимом ЕСП. В этом режиме при температурах, близких к комнатным было невозможно получить вертикальные стенки, без использования пассивирующих газов. Скорость травления для режима ЕСП в четыре раза ниже по сравнению с режимом ИСП, но при этом могут быть получены вертикальные стенки. Пример РЭМ-изображений кремниевых наноструктур, полученных с использованием химии на основе фтора, представлен на рисунке 6б.

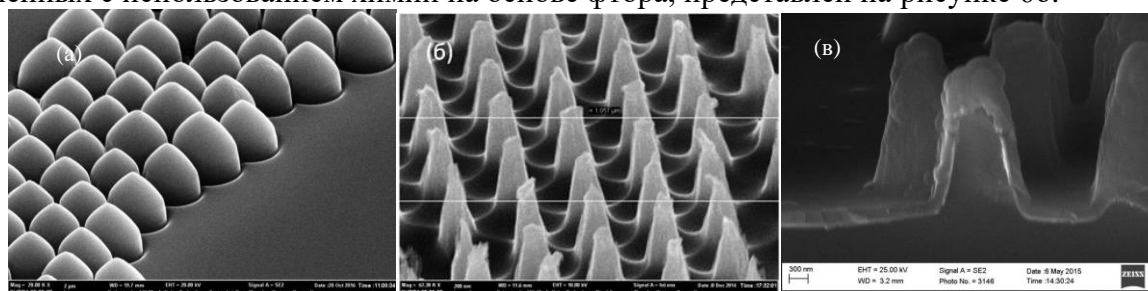


Рисунок 6 – РЭМ изображение травления кремния в режиме ИСП Cl_2/BCl_3 (а) и ЕСП SF_6/O_2 (б) и фотопреобразовательная структура на их основе (в).

Для формирования нижнего перехода $\alpha\text{-Si:H}/\text{SiNWs}$ был нанесен слой эмиттера $\alpha\text{-Si:H}$ р-типа в коммерческой установке PECVD Oxford Plasmalab System 100 методом ПХО, что позволило покрыть всю поверхность кремниевых волокон, как показано на рисунке 6(в). Сначала с поверхности кремния был удален естественный оксид в растворе HF (10%) с последующим осаждением сверхтонкого (3 нм) нелегированного (i) слоя $\alpha\text{-Si:H}$. Затем был осажден 30 нм слой, легированный бором (p) $\alpha\text{-Si:H}$, при 250°C , мощности ВЧ плазмы 5 Вт и давлении 350 мТорр. На обратной стороне пластины был осажден слой (n) $\alpha\text{-Si:H}$, легированный фосфором. Верхняя поверхность была покрыта слоем оксида индия-олова (ITO) толщиной 100 нм с использованием магнетронного распыления при комнатной температуре, тыльный контакт был нанесён вакуумным распылением серебра. На спектрах

КЭ нижнего перехода a-Si:H/SiNWs не наблюдалось падения в коротковолновой области по сравнению с контрольными плоскими образцами (рисунок 7а).

На вертикально-ориентированные структуры отдельно был нанесен верхний р-і-п переход на основе a-Si:H. Для этого на массив кремниевых волокон сначала был нанесен первый слой ИТО, формирующий нижний контакт. Затем нанесена структура a-Si:H (р) 30 нм/ (і) 180нм/ (n) 30нм. Сверху был сформирован второй слой ИТО толщиной 100 нм, на который наносились контакты из серебряной пасты. Спектр квантовой эффективности верхнего перехода представлен на рисунке 7б.

Квантовая эффективность a-Si:H р-і-п перехода, нанесенного на вертикально-ориентированные структуры, выше, чем у контрольного планарного р-і-п перехода, выращенного при тех же условиях. Основное увеличение наблюдается в коротковолновой области спектра и в его максимуме. Усиление КЭ в коротковолновой области связано с меньшей толщиной слоя (і) a-Si:H, нанесенного на вертикальные стенки кремниевых волокон.

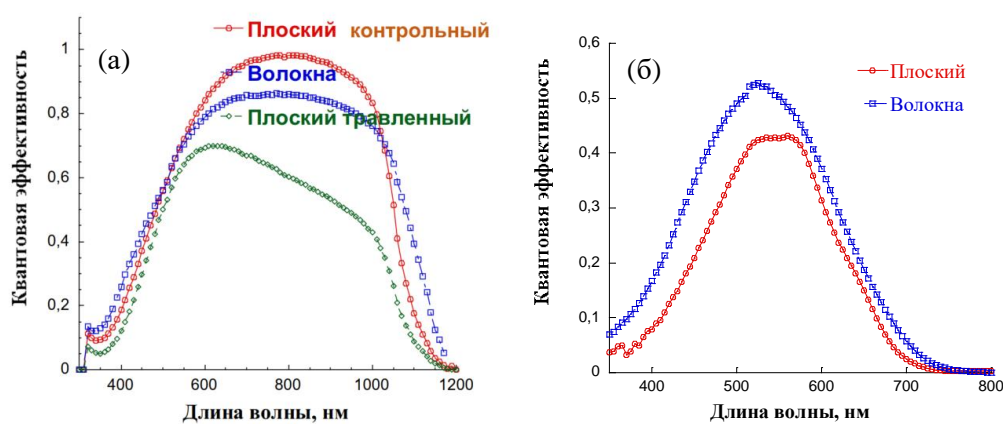


Рисунок 7 – Спектры квантовой эффективности нижнего (а) и верхнего (б) перехода на основе массива вертикально-упорядоченных нановолокон.

Меньшая толщина і-слоя a-Si:H приводит к большему встроенному электрическому полю и, следовательно, к меньшим рекомбинационным потерям, в то время как более эффективное улавливание света приводит к более высокому поглощению и, наконец, к большему току короткого замыкания. Таким образом, экспериментально была продемонстрирована возможность увеличения фототока р-і-п структуры на основе a-Si:H с использованием вертикально-ориентированной архитектуры.

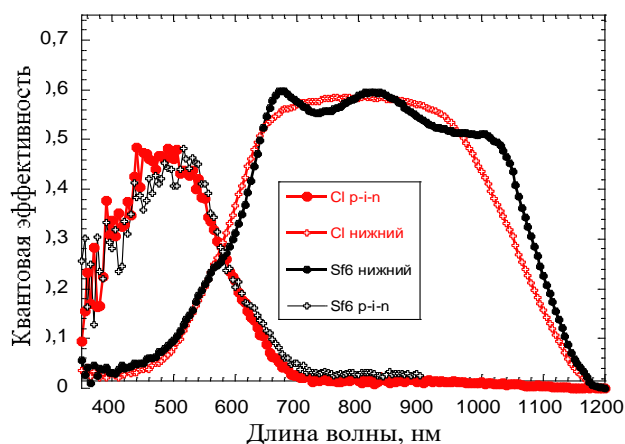


Рисунок 8 – Спектр квантовой эффективности двухпереходной фотопреобразовательной структуры на основе р-і-п a-Si:H - a-Si:H/c-Si.

Также были созданы образцы двухпереходных фотопреобразовательных структур. Данные структуры были получены как комбинация вышеописанных верхнего и нижнего переходов. Из спектров КЭ на рисунке 8 следует, что ток верхнего субэлемента оказывается недостаточным для согласования токов, а для его увеличения требуются более длинные волокна.

В главе 5 рассматривались вертикально-ориентированные структуры на кремнии, полученные сухим плазмохимическим травлением при криогенных температурах. Латексные сферы были нанесены на кремниевую подложку методом центрифугирования, описанным в главе 4. Далее подложки с нанесённой маской помещались в камеру травления и охлаждались до -140 °С. Далее подложки выдерживались 20 минут для гомогенизации температуры. При данных температурах в процессе травления на поверхности кремниевой подложки начинает конденсироваться соединение SiF_xO_y , что обеспечивает пассивацию боковых поверхностей травления. Была проведена оптимизация технологических параметров процесса травления с использованием металлической маски. Оптимальные условия, обеспечивающие вертикальные гладкие стенки кремния (рисунок 9) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры криогенного травления.

ЕСП мощность, Вт	ИСП мощность, Вт	Давление мТорр	Поток O_2 , ссм ³	Поток SF_6 ссм ³	Напряжение смещения, В
30	1000	5	11	50	-100

Под плотноупакованной маской из латексных сфер начинает проявляться эффект зависимости скорости травления от аспектного соотношения (называемый в иностранной литературе ARDE эффект). Эффект связан с уменьшением концентрации реактивных частиц, достигающих дна канавки, или с затруднением удаления продуктов травления. Для преодоления этого эффекта требуется увеличить зазор между сферами. Диаметр сфер был уменьшен с 900 нм до 450 нм после их травления в кислородной плазме (рисунок 10а). Уменьшение диаметра сфер происходит неравномерно, что связано с ионной бомбардировкой в плазме в режиме ЕСП. После уменьшения диаметра сфер травление поверхности было выполнено в соответствии с параметрами, представленными в таблице 1. На рисунке 10б представлено РЭМ - изображение поперечного сечения, которое демонстрирует, что травление с такой маской позволяет получать вертикально-ориентированные структуры из кремниевых волокон.

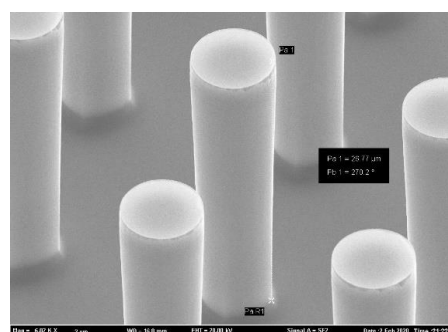


Рисунок 9 – РЭМ-изображение массива вертикально-ориентированных структур, полученных методом криогенного травления кремния под жёсткой маской

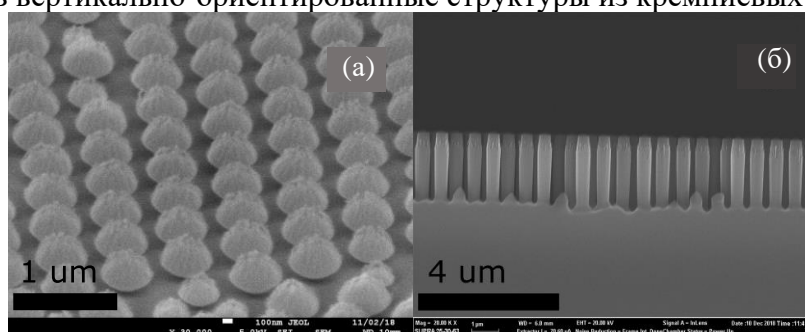


Рисунок 10 – РЭМ-изображение поверхности кремниевой пластины, покрытой маской из латексных сфер, потравленных в кислородной плазме (а) и после криогенного травления под такой маской (б)

Однако, полученные структуры имеют ограничение по максимально достижимой высоте волокон из-за травления сфер во время криогенного травления кремния из-за присутствия

кислорода в смеси газов. При этой технологии максимальное соотношение высоты волокон к диаметру составляет 5:1. Таким образом, для диаметра волокна 400 нм максимальная длина ограничена 2-3 мкм. Чтобы преодолеть это ограничение было предложено криогенное травление под жёсткой маской. Для этого на поверхность кремния осаждался дополнительный слой оксида кремния SiO_2 . Далее, на этом слое была произведена наносферная литография с последующим уменьшением диаметра сфер в кислородной плазме. Затем производится травление оксида кремния с последующим криогенным травлением вертикально-ориентированных кремниевых структур по жёсткой маске из оксида кремния. Переход на SiO_2 потребовал дополнительной отработки наносферной литографии. Объёмное соотношение вода/изопропил варьировалось от 1/3 до 3/1. После осаждения образцы исследовались с помощью оптической микроскопии. Наилучший результат был достигнут при соотношении 7/13, что позволило нанести один монослой в плотной упаковке на четырёхдюймовой подложке Si.

Сухое травление латексных сфер проводили при температуре -20°C в установке Oxford PlasmaLab 100 ICP 380, снабжённой газовыми линиями O_2 и CHF_3 . Были использованы режимы ИСП и ЕСП. Мощность ИСП и ЕСП варьировалась от 0 до 1000 Вт и от 10 до 50 Вт, соответственно. Было обнаружено, что сферы под действием электростатических сил мигрировали по поверхности SiO_2 и образовали “леопардовый” рисунок на поверхности кремния. Однако диаметр сфер уменьшился и при этом сферическая форма сохранилась.

Для предотвращения миграции сфер по поверхности было предложено использовать предварительный прогрев подложки при температуре 120°C после нанесения сфер. Оптимизация времени прогрева позволила определить, что 12 секунд является минимальным значением для сохранения сферами своих положений.

Далее, рассматривалось травление SiO_2 под маской из латексных сфер. В работе проведено травление в CF_4/O_2 и CHF_3 . Травление смесью CF_4/O_2 в непрерывном режиме приводит к спеканию сфер на поверхности SiO_2 , что связано с плавлением сфер при нагреве плазмы. Исходя из этого, следующим шагом было снижение теплового воздействия плазмы. Для этого был разработан циклический процесс травления, где цикл травления чередуется с циклом охлаждения. Использование этого метода позволило предотвратить спекание сфер, однако наблюдается сильная деградация маски из-за содержания кислорода в газовой смеси, что вызывает неоднородное травление SiO_2 . Модифицированный процесс циклического травления без добавления кислорода значительно улучшает сопротивление латексных сфер, что приводит к более равномерному травлению маски SiO_2 . Чтобы уменьшить шероховатость поверхности SiO_2 после сухого травления, образцы обрабатывали в растворе буферизированной плавиковой кислоты (BOE). Однако, травления в BOE обладает существенными недостатками в виде сильной зависимости скорости травления от внешних условий и сложной воспроизводимости, поэтому требовалось отработать процесс селективного травления SiO_2 в потоке газа CHF_3 .

Для отработки процессов травления SiO_2 в CHF_3 была проведена серия экспериментов. Для определения оптимальных параметров травления варьировались следующие величины: температура процесса, ЕСП и ИСП мощность, давление, а также использовался циклический и режим постоянного горения плазмы. Применение процессов травления, отработанных на образцах с нанесённым оксидом кремния на кремниевую подложку, позволяет получать структуры с требуемой геометрией. Увеличение мощности, подаваемой на столик с подложкой (тянущего напряжения) приводит к увеличению скорости травления и положительно сказывается на увеличении наклона стенок травления. С другой стороны, при увеличении мощности происходит слабое ухудшение селективности травления. Однако, для сфер это эффект может быть минимизирован при циклическом методе травления, в котором шаг травления выбирается минимальным с учётом переходных процессов на поджиге плазмы, а время охлаждения выбирается большим, чем шаг травления.

Таким образом, на первом этапе происходит осаждения сфер и травления жёсткой маски из SiO_2 . На втором этапе загруженная подложка охлаждается до температуры -140°C в

течении часа. Далее происходит процесс травления по рецепту, указанному в таблице 1. РЭМ изображения кремниевых волокон, полученных криотравлением при использовании SiO_2 маски, представлены на рисунках 11 и 12.

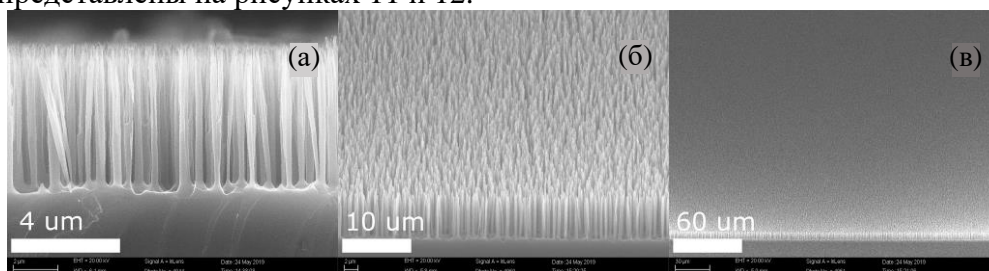


Рисунок 11 – РЭМ изображения кремниевых волокон, полученных криотравлением под SiO_2 маской, травленной в CF_4 : скол (а), изометрический вид с различным разрешением (б,в).

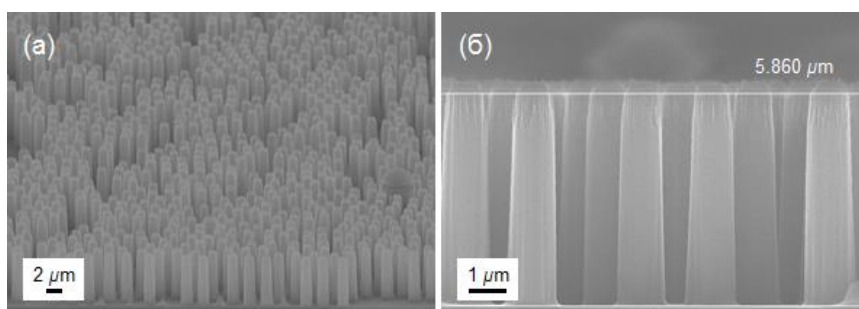


Рисунок 12 – РЭМ-изображения вертикально-ориентированных структур под маской, травленной в CHF_3 .

При условии, что маска SiO_2 была полностью удалена после травления, для этого процесса было оценено максимальное отношение размеров волокон, высоты к диаметру, равное 15/1. Полностью однородный массив кремниевых волокон может быть получен по всей площади подложки (рис. 11). Кремниевые волокна под SiO_2 маской, травленной в CF_4 , имеют неоднородность боковой стенки, обусловленную неоднородностью травления SiO_2 . Из рисунка 9 видно, что однородность боковой стенки травления и самих нановолокон значительно выше с использованием газа CHF_3 , который позволяет получить гомогенное травление SiO_2 .

В главе 6 проведена оценка влияния условий сухого травления на формирование радиационных дефектов, приводящих к снижению эффективного времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ). Измерения времени жизни ННЗ проводились с использованием метода измерения квазистационарной фотопроводимости (QSSPC) на приборе Sinton WCT-120 для образцов с одинаковой глубиной травления 2 мкм. Для определения влияния маски из полистирольных сфер на свойства объемного кремния во время травления в тех же условиях были потравлены подложки, не покрытые сферами, различными методами травления. На первом этапе подложки покрывались с тыльной стороны a-Si:H для пассивации и уменьшения влияния поверхностной рекомбинации тыла. Далее, производилось сухое травление образцов и дальнейшая пассивация лицевой поверхности с помощью нанесения a-Si:H . Наблюдалось сильное изменение времени жизни неосновных носителей заряда от условий травления. Продемонстрировано преимущество газовой смеси SF_6/O_2 по сравнению с химией Cl_2/BCl_3 , поскольку требуемая геометрия может быть обеспечена с минимальным образованием радиационных дефектов. Кроме того, показано, что травление под маской из сфер приводит к более высоким значениям времен жизни, чем в планарных образцах (таблица 2).

Таблица 2 – Время жизни неосновных носителей заряда при их концентрации 10^{15} см^{-3}

Условия травления	Время жизни, мкс
ЕСП SF_6 со сферами	116,09
ЕСП SF_6 без сфер	36,04
ИСП SF_6 без сфер	9,91
ИСП Cl_2 со сферами	16,33
ИСП Cl_2 без сфер	9,06
Криогенное ИСП травление SF_6 без сфер	550,0

Подложки после криогенного травления обладают значительно большими временами жизни ННЗ, чем в подложках после плазмохимического травления при температурах, близких к комнатным. Применением криогенного травления удалось добиться времён жизни 0,5 мс, в то время как травление при комнатных температурах показывает значения 0,12 мс.

Для оценки влияния травления на КЭ фотопреобразовательных структур были изготовлены две планарные структуры на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si: первая на подложке Si после криогенного травления, вторая – контрольная на подложке, не подвергавшейся криогенному травлению. Было показано, что криотравление не оказывает влияния на квантовую эффективность и ВАХ получившихся солнечных элементов (рис. 13). Таким образом, разработанный процесс криогенного травления вызывает минимальные радиационные повреждения кремниевых пластин, что позволяет сохранить высокие времена жизни ННЗ (0,5 мс), необходимые для создания солнечных элементов с КПД выше 20%.

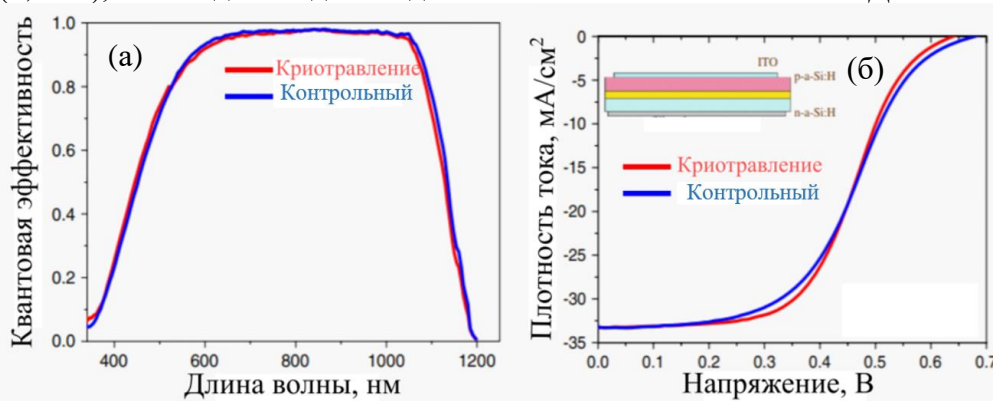


Рисунок 13 – Спектр КЭ (а) и ВАХ (б) фотопреобразовательной структуры на основе плоской подложки с и без криогенного травления.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

- Разработано экспериментально-теоретическое обоснование ограничения геометрических параметров вертикально-ориентированных кремниевых структур. Показано, что уменьшение диаметра волокна приводит к тому, что обеднённая область пространственного заряда распространяется на все сечение волокна и спрямляет зоны, в следствие чего возрастает чувствительность к поверхностным состояниям на боковых гранях и наблюдается резкое усиление уровня рекомбинации. При увеличении длины волокна с радиусом меньше толщины ОПЗ растут потери, связанные с поверхностной рекомбинацией, и наблюдается спад квантовой эффективности в коротковолновой области спектра. Для уменьшения рекомбинационных потерь необходимо использовать кремниевые волокна с радиусом, превосходящим ОПЗ в кремнии.
- Была показана концептуальная возможность получения двухпереходного солнечного элемента полностью на основе кремния. Продемонстрировано, что осаждение верхнего p-i-n перехода на вертикально-ориентированные кремниевые структуры приводит к увеличению внешней квантовой эффективности и тока короткого замыкания, что создает предпосылки для согласования по току в двухпереходных солнечных элементов на основе волокон кристаллического кремния и p-i-n структур на основе a-Si:H.

- Разработаны технологические основы литографии на основе латексных сфер. Показано, что метод центрифугирования позволяет получать упорядоченный массив латексных сфер на поверхности кремния и оксида кремния путем самоупорядочения сфер под действием электростатических сил. Выявлено, что травление латексных сфер в кислородной плазме, используя изотропный ИСП режим, приводит к их миграции по подложке под действием электростатических сил и образованию кластеров из сфер. Данный эффект может быть минимизирован при предварительном прогреве подложки с маской из сфер при 120 °С в течении 15 секунд.

- Разработаны технологические основы формирования жесткой маски оксида кремния для последующего глубокого травления кремния с помощью литографии из латексных сфер. Показано, что при травлении SiO₂ с использованием CF₄ требуется дополнительная обработка в буферизированной плавиковой кислоте (BOE), что приводит к плохой воспроизводимости результата. Травление маски SiO₂ под латексными сферами в CHF₃ позволяет получать структуры с требуемой геометрией и высокой воспроизводимостью.

- Использование комбинации литографии с помощью латексных сфер, жесткой маски оксида кремния и криогенного плазмохимического травления позволяет получать вертикально–ориентированные кремниевые структуры с соотношением высоты волокон к диаметру 15 к 1, что больше значений, достигнутых с помощью классической наносферной литографии. Предлагаемый метод позволяет получить высокоупорядоченный массив вертикально-ориентированных кремниевых структур на всей поверхности кремниевой подложки диаметром 100 мм.

- Исследована зависимость изменения времени жизни неосновных носителей заряда от условий сухого плазмохимического травления. Продемонстрировано преимущество газовой смеси SF₆/O₂ по сравнению со смесью Cl₂/BCl₃, поскольку требуемая геометрия может быть обеспечена с минимальным образованием радиационных дефектов. Показано, что травление под маской из сфер показывает большие значения времён жизни неосновных носителей заряда, чем в планарных образцах. Продемонстрировано, что травление при криогенных температурах позволяет сохранить значительно большие времена жизни неосновных носителей заряда по сравнению с плазмохимическим травлением при температурах, близких к комнатным.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

- [1] Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. / Yoshikawa K., Kawasaki H., Yoshida W., Irie T., Konishi K., Nakano K., Uto T., Adachi D., Kanematsu M., Uzu H., Yamamoto K. // *Nat. Energy*. – 2017. – Vol. 2, no. 5.
- [2] Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. / Shockley W., Queisser H.J. // *J. Appl. Phys.* – American Institute of Physics, 1961. – Vol. 32, no. 3. – P. 510–519.
- [3] Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency. / Savin H., Repo P., Von Gastrow G., Ortega P., Calle E., Garín M., Alcubilla R. // *Nat. Nanotechnol.* – 2015. – Vol. 10, no. 7. – P. 624–628.
- [4] Efficient black silicon solar cell with a density-graded nanoporous surface: Optical properties, performance limitations, and design rules. / Yuan H.C., Yost V.E., Page M.R., Stradins P., Meier D.L., Branz H.M. // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 95, no. 12.
- [5] The formation of hydrogen passivated silicon single-crystal surfaces using ultraviolet cleaning and HF etching. / Takahagi T., Nagai I., Ishitani A., Kuroda H., Nagasawa Y. // *J. Appl. Phys.* – 1988. – Vol. 64, no. 7. – P. 3516–3521.
- [6] Comment on Mechanism of HF etching of silicon surfaces: A theoretical understanding of hydrogen passivation. / Sacher E., Yelon A. // *Phys. Rev. Lett.* – 1991. –

Vol. 66, no. 12. – P. 1647.

[7] Silicon nanowire-based solar cells on glass: Synthesis, optical properties, and cell parameters. / Sivakov V., Andrä G., Gawlik A., Berger A., Plentz J., Falk F., Christiansen S.H. // *Nano Lett.* – 2009. – Vol. 9, no. 4. – P. 1549–1554.

[8] Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы. / Лучинин В.В., Таиров Ю.М. – Физматлит, 2006.

[9] Comparison of photoluminescence and capacitance spectroscopies as efficient tools for interface characterisation of heterojunction solar cells. / Chouffot R., Ibrahim S., Brüggemann R., Gudovskikh A.S., Kleider J.P., Scherff M., Fahrner W.R., Cabarrocas P.R. i., Eon D., Ribeyron P.J. // *J. Non. Cryst. Solids.* – 2008. – Vol. 354, no. 19–25. – P. 2416–2420.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, среди которых 8 научных статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, они же опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в базе WoS, 1 патент на изобретение, 9 работ опубликованы в других изданиях и материалах конференций.

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

[A1] **Morozov, I.A.**, Gudovskikh, A.S., Kudryashov, D.A., Nikitina, E.V., Talkenberg, F., Schleusener, A., Bochmann, A., Sivakov, V. a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell based on top-down silicon nanostructures (2015) **Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics**, 9 (6), pp. 723-727.

[A2] Gudovskikh, A.S., **Morozov, I.A.**, Kudryashov, D.A., Nikitina, E.V., Sivakov, V. Multijunction a-Si:H/c-Si solar cells with vertically-aligned architecture based on silicon nanowires (2017) **Materials Today: Proceedings**, 4 (7), pp. 6797-6803

[A3] **Morozov, I.**, Gudovskikh, A., Uvarov, A., Baranov, A., Sivakov, V., Kudryashov, D. The Study of Latex Sphere Lithography for High Aspect Ratio Dry Silicon Etching (2020) **Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science**, 217 (4)

[A4] Kudryashov, D.A., Gudovskikh, A.S., Baranov, A.I., **Morozov, I.A.**, Monastyrenko, A.O. Effect of Cryogenic Dry Etching on Minority Charge Carrier Lifetime in Silicon (2020) **Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science**, 217 (4)

[A5] **Morozov, I.A.**, Gudovskikh, A.S., Kudryashov, D.A. Nanosphere lithography on silicon oxide for high aspect ratio cryo etching of vertically-align silicon structures (2019) **Journal of Physics: Conference Series**, 1410 (1)

[A6] Kudryashov, D., **Morozov, I.**, Gudovskikh, A., Uvarov, A., Kotlyar, K., Lihachev, A., Nashchekin, A., Pavlov, S. Influence of cryogenic dry etching on minority carrier's lifetime in vertically aligned silicon nanostructures (2019) **AIP Conference Proceedings**, 2064

[A7] **Morozov, I.A.**, Gudovskikh, A.S., Kudryashov, D.A., Kotlyar, K.P. Influence of dry etching condition to geometry of vertically aligned silicon nanostructures (2017) **Journal of Physics: Conference Series**, 917 (5)

[A8] Zuev, D.A., Makarov, S.V., Mukhin, I.S., Milichko, V.A., Starikov, S.V., **Morozov, I.A.**, Shishkin, I.I., Krasnok, A.E., Belov, P.A. Fabrication of Hybrid Nanostructures via Nanoscale Laser-Induced Reshaping for Advanced Light Manipulation (2016) **Advanced Materials**, 28 (16)

Из них статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, включённых в системы цитирования **Scopus** и **Web Of Science**: 8

Статьи и доклады, опубликованные в других изданиях и материалах конференций:

И.А. Морозов, А.С. Гудовских. Характеризация p-i-n тонкоплёночных солнечных элементов на основе аморфного кремния a-Si:H с помощью измерения квантового выхода в зависимости от прямого напряжения смещения // Девятая Российская конференция “Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики”, Санкт-Петербург, 11-14 ноября 2013 года

I.A. Morozov, A.S. Gudovskikh, T.N. Berezovskaya, D.A. Kudryashov. New type of high efficiency silicon multijunction solar cells // International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2015” St. Petersburg, Russia, April 6 – 8, 2015. P.338-339

И.А.Морозов, А.С. Гудовских, Д.А.Кудряшов, Д.В.Мохов. Использование наносферной литографии для повышения КПД солнечных элементов // X Всероссийская конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», 16 – 18 ноября 2015 г, Санкт-петербург. С15.

Морозов И.А., Гудовских А.С., Кудряшов Д.А., Никитина Е.В. Плазмохимическая технология для формирования многопереходных кремниевых солнечных элементов на основе нановолокон // Сб. трудов IV Всероссийской научной конференции “Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики”, 29-30 сентября 2016 года, Чебоксары, Россия. Стр. 18-22

I.A. Morozov, A. S. Gudovskikh, D. A. Kudryashov, E. V. Nikitina, K. P. Kotlyar and V. Sivakov. Full Silicon Multijunction Solar Cell Concept // 27th International Conference on Amorphous and Nano-crystalline Semiconductors (ICANS) 21-25 August 2017, Seoul, Korea

Ivan Morozov, A Gudovskikh, D Kudryashov, K Kotlyar. Influence of dry etching condition to geometry of vertically aligned silicon nanostructures // 4th International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2017” St. Petersburg, Russia, April 3–6, 2017. P.318

I.A. Morozov, A.S. Gudovskikh, K.V. Emtsev, V. Sivakov. Effect of dry plasma etching on minority charge carrier lifetime during silicon nanowires formation // E-MRS Spring Meeting 2017, Strasburg, France, 22-26 May 2017, E.PI.35

Ivan Morozov, Aleksandr Gudovskikh. Aleksandr Uvarov, Artem Baranov, Vladimir Sivakov, Dmitri Kudryashov. Study of latex sphere lithography for high aspect ratio dry silicon etching// E-MRS 2019 Spring Meeting, 27- 31May, 2019, Nice, France

И.А. Морозов, А.В. Уваров, А.А Максимова, Д.А. Кудряшов, А.И. Баранов, Л.Н. Дворецкая, А.С. Гудовских. Оптические свойства вертикально-ориентированных кремниевых наноструктур // Сб. трудов XV российской конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» 18-20 ноября 2019 г. Санкт-Петербург. Стр. 149

I.A. Morozov, A.S. Gudovskikh, A.V. Uvarov, A.I. Baranov, K.A. Vyacheslavova, D.A. Kudryashov. Optical properties of dry etched vertically aligned silicon structures with different geometry // Books of Abstracts of 7th International School and Conference “Saint-Petersburg OPEN 2020” on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, April 27 - 30, 2020, St. Petersburg, Russian Federation. P.241

Патенты на изобретение: RU 2 724 319 С2 Конструкция многопереходного фотоэлектрического преобразователя с вертикально-ориентированной столбчатой структурой на основе интеграции полупроводниковых соединений и кристаллического кремния и способ его изготовления. Авторы: Гудовских Александр Сергеевич (RU) Кудряшов Дмитрий Александрович (RU) **Морозов Иван Александрович** (RU)