

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»

Лизункова Дарья Александровна

**Исследование электрических и оптических свойств фоточувствительных
структур на наноструктурированном кремнии**

Специальность 01.04.10 Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

кандидат технических наук,
доцент Латухина Н.В.

Самара, 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Нанокристаллический кремний (nc-Si) относится к материалам, в которых реализуются квантово-размерные эффекты, что делает его перспективным для развития современных тенденций не только в электронике и оптоэлектронике, но также в биологии и медицине. В нанокристаллах кремния ширина запрещенной зоны определяется квантово-размерными эффектами и может быть заметно больше, чем для объемного монокристаллического кремния, что позволяет увеличить спектральную чувствительность фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) солнечных элементов в коротковолновой части спектра.

Экспериментально доказано, что кремниевый ФЭП, не уступающий по эффективности преобразования энергии наногетероструктурным, может быть создан на основе многослойных структур на монокристаллической подложке кремния, в которых присутствуют материалы с различной шириной запрещенной зоны E_g . Одним из используемых материалов в таких структурах является нанокристаллический кремний.

В качестве нанокристаллического материала может служить пористый кремний, т.к. стенки пор представляют собой неупорядоченную систему квантоворазмерных кристаллов (образований). Благодаря развитой системе пор площадь поглощающей поверхности увеличивается, а спектральная чувствительность расширяется в коротковолновую область за счет увеличения ширины запрещенной зоны кремния в наноразмерных кремниевых нитях, образующих стенки пор.

Для повышения стабильности пористого слоя и уменьшения его электрического сопротивления необходимо создавать пористый слой локально на поверхности с затравками порообразования, а также использовать стабилизирующее покрытие, в качестве которых могут выступать как карбид кремния, так и фториды РЗЭ. Исследование физических процессов, проходящих при поглощении света в сложных структурах, содержащих наноразмерные объекты, дает основание для определения оптимальной фоточувствительной структуры.

Степень разработанности темы.

На сегодняшний день существует большое количество работ российских и зарубежных авторов, посвященных получению пористого кремния различными способами и исследованию его свойств: Зимина С.П., Кашкарова П.К., Трегулова В.В., Старкова В.В., Тимошенко В.Ю., Гостевой Е.А., Грина М., Арутюнян В.М. и др.

Интерес к изучению пористого кремния как материала для солнечной энергетики нашел свое отражение в ряде исследований: Латухиной Н.В., Сычиковой Я. А.,

Жанабаева З.Ж., Юзовой В.А. и др. Однако в большинстве работ рассматривалось применение пористого кремния как антиотражающего покрытия. В работах Латухиной Н.В. рассмотрена возможность использовать слои пористого кремния как рабочие слои фотоэлектрического преобразователя. В связи с этим возникает вопрос о подборе оптимального антиотражающего покрытия для пористого рабочего слоя.

В работах М. Грина показана возможность повышения показателя эффективности кремниевых солнечных элементов при переходе к многослойным структурам с наноразмерными элементами, что позволит устранить основные фундаментальные потери (термализация, невозможность поглощения фотонов с энергией меньше ширины запрещенной зоны кремния). Использование пористого кремния как системы нанокристаллов ранее не рассматривалось.

Представленная работа является обобщением результатов комплексных исследований свойств пористого кремния, многослойных структур на его основе с просветляющими покрытиями DyF_3 и ZnS .

Цель диссертационной работы - исследование свойств фоточувствительных структур с пористым слоем и определение условий повышения эффективности преобразования излучения.

Основные задачи:

1. Анализ свойств существующих многослойных фоточувствительных структур для солнечных элементов на кремниевой подложке и методов их изготовления.
2. Анализ существующих механизмов и моделей поглощения излучения в многослойных структурах на кремниевых подложках.
3. Исследование спектральных характеристик оптических и фотоэлектрических параметров фоточувствительных структур с пористым кремнием и покрытиями фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур $SiC/porSi$.
4. Разработка методик получения эффективных фоточувствительных структур с пористым кремнием и покрытиями фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур $SiC/porSi$ на основе анализа свойств изготовленных образцов.
5. Оценка возможности применимости метода оптических матриц к моделированию отражения и поглощения излучения в структурах с пористым кремнием и покрытиями фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур $SiC/porSi$.

Основными объектами исследований являются: структуры на кремниевых подложках с пористым слоем и покрытиями фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктуры $SiC/porSi$.

Научная новизна:

1. Проведена оценка возможности моделирования отражения и поглощения излучения в многослойных фоточувствительных структурах, содержащих слои пористого кремния, сульфида цинка, фторида диспрозия с использованием метода оптических матриц.

2. Проведен анализ физико-химических процессов, лежащих в основе технологии изготовления фоточувствительных структур с пористым кремнием в качестве рабочего слоя и покрытиями из фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур SiC/porSi

3. Впервые исследованы спектральные характеристики фотоэлектрических и оптических параметров фоточувствительных структур с рабочим слоем из пористого кремния в видимом и ближних ИК и УФ диапазонах.

4. Впервые исследованы фотоэлектрические характеристики макетов ФЭП, изготовленных на основе разработанной технологии структур с рабочим слоем из пористого кремния, в том числе в условиях открытого космоса.

Методология и методы исследования в диссертационной работе основаны на использовании комплексного и системного анализа, методов математического моделирования оптических свойств структур и экспериментальных методов, которые достаточно полно описаны в главах 3 и 4.

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-химические основы методики, позволяющие получить фоточувствительные структуры на основе пористого кремния с расширенной спектральной чувствительностью, стабильно высокими фотоэлектрическими параметрами.

2. Влияние покрытий фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур SiC/porSi на вид спектральных характеристик оптических и фотоэлектрических параметров структур на кремниевых подложках.

3. Модель отражения и поглощения излучения в многослойных фоточувствительных структурах.

Достоверность полученных результатов обеспечивается взаимодополняющими экспериментальными методами исследования, воспроизводимостью экспериментальных результатов, использованием общепринятого математического аппарата физики полупроводников и корреляцией между собой данных, полученных в различных экспериментах.

Практическая значимость

1. Разработанные методики могут быть использованы в технологии изготовления солнечных элементов для летательных аппаратов с высокими эксплуатационными параметрами, способных работать в экстремальных условиях.

2. Разработанная модель может быть использована для оптимизации параметров фоточувствительных многослойных структур. Полученные спектральные характеристики также могут быть использованы в разработке эффективных и экономичных фоточувствительных структур.

Апробация:

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XII, XIII, XIV и XV Всероссийском молодежном Самарском конкурсе-конференции научных работ по оптике и лазерной физике (г. Самара, 2014, 2015, 2016, 2017), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении» (г. Москва, 2015), XX международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 2016), XI конференции и X школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2016» (г. Новосибирск, 2016), 15-й международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (г. Саранск, 2016), Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ – 2016) (г. Минск, 2016), VI Молодежной научно-технической конференции «Инновационный арсенал молодежи» (г. Санкт-Петербург, 2015), III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017)» (Самара, 2017), XIV Международной конференции «Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2017)» (г. Санкт-Петербург, 2017), V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием Актуальные проблемы ракетно-космической техники «V Козловские чтения» (Самара, 2017), Международной молодежной научной конференции «XIV Королевские чтения», посвященной 110-летию со дня рождения С. П. Королева, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли (Самара, 2017).

Публикации

Основные результаты опубликованы в 20 научных работах, из них 4 статьи (по специальности) в журналах из списка ВАК, 16 тезисов докладов в российских и международных конференциях.

Внедрение результатов

Полученные научные результаты использовались при разработке учебного пособия для подготовки бакалавров по направлению 03.03.02 «Физика».

Личный вклад

Все изложенные в диссертации результаты исследований получены автором лично, либо при его участии. Вклад в получение экспериментальных результатов заключается в проведении работ по электрохимическому травлению, изготовлении покрытий и металлизации, измерении оптических и фотоэлектрических характеристик и других технологических операций. Проведена обработка результатов исследований и обсуждение полученных результатов, подготовлены и представлены материалы для научных публикаций и докладов на международных конференциях, сделаны научные и практические выводы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных результатов, выводов, списка литературы из 104 наименований. Диссертация изложена на 150 страницах, содержит 75 рисунков, 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные цели и задачи исследований и научные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, посвященной свойствам существующих многослойных фоточувствительных структур для солнечных элементов на кремниевой подложке и методам их изготовления. Проанализированные современные подходы конструирования эффективных кремниевых солнечных элементов третьего поколения с использованием достижений нанотехнологий. Рассмотрены принципы определения оптимальных параметров просветляющих покрытий, их свойства и влияния на фотоэлектрические параметры. Особое внимание уделено публикациям, посвященным покрытиям на основе соединений редкоземельных элементов. Проанализированы публикации посвященные использованию пористого кремния как нанокристаллического

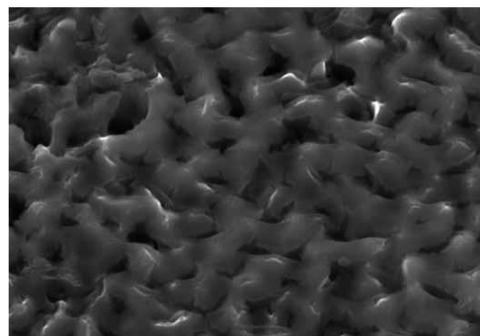


Рисунок 1 - РЭМ-изображения поверхности карбида кремния полученного преобразованием пористого кремния

материала для ФЭП солнечных элементов. Рассмотрены основные способы получения пористого кремния

Во второй главе проанализированы физико-химические модели порообразования. На основе проведенного анализа, разработаны принципы формирования пористого кремния для различных типов подложек. Разработаны технологии получения многослойных структур на основе пористого кремния с использованием проводящих и диэлектрических покрытий. В качестве проводящих покрытий рассмотрены пленки сульфида цинка и сплав ИТО. Из диэлектрических покрытий выбран фторид диспрозия, как наиболее подходящий по своим оптическим свойствам – показателю преломления, коэффициенту прозрачности и пассивированию рекомбинационных центров на рабочей поверхности ФЭП. Описана технология создания гетероструктур SiC/porSi, заключающаяся в частичной карбидизации пористого кремния в процессе самоорганизующейся эндотаксии.

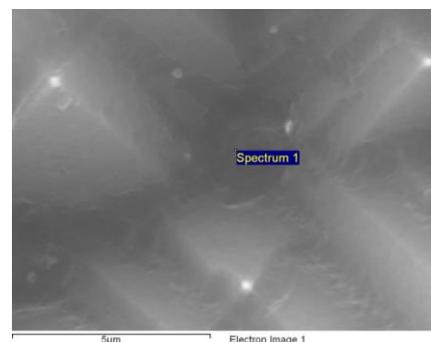


Рисунок 2 - РЭМ изображение текстурированной поверхности T2

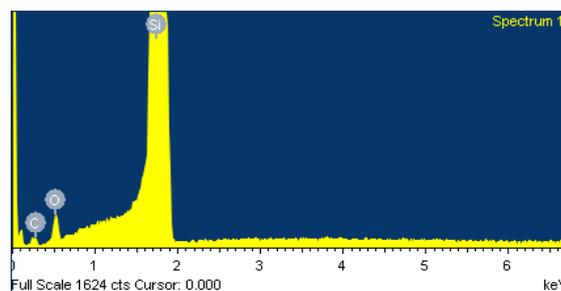


Рисунок 3 - Рентгеновский флуоресцентный спектр образца T2

Использование подложек кристаллического кремния (c-Si) с пористым слоем на поверхности для создания гетероструктур SiC/por-Si позволяет сочетать высокие эксплуатационные характеристики слоев SiC с хорошо развитой кремниевой технологией. Возникновение нанокристаллов в структуре SiC позволяет изменить многие его свойства.

Третья глава посвящена исследованию структуры и элементного состава с использованием современной растровой электронной и просвечивающей микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и комбинационного рассеяния.

На РЭМ-изображении поверхности текстурированного слоя в области стыка пирамид отчетливо видно, что пористый слой образовался преимущественно в углублении рельефа (более темные области). Количественный анализ состава поверхности структуры r-porSi/pSi показывает, что помимо атомной доли кремния (75.04%) в структуре содержится углерод (15.74%) и кислород (9.22%).

Исследование пленки пористого кремния методом комбинационного рассеяния показало, что наибольшую интенсивность имеет линия КРС первого порядка por-Si , находящаяся вблизи частоты 520 см^{-1} . Она обусловлена рассеянием света на LO-фононах и определяется химической связью между атомами кремния.

В спектре КРС образца с карбидом кремния присутствует только линия на 796 см^{-1} . Отсутствие линий, характерных для кремния, указывает на то, что поверхность образца в этой области плотно покрыта SiC.

В четвертой главе представлены результаты исследований электрических и оптических свойств изготовленных структур. Исследовались спектральные характеристики коэффициента отражения, токовой фоточувствительности, квантовой эффективности, ВАХ. Проводился анализ фотоэлектрических характеристик, полученных, в том числе, в условиях открытого космоса из данных телеметрии.

Спектральные зависимости коэффициентов отражения исследовались на спектрофотометре SHIMADZU UV-2450PC в диапазоне длин волн от 0.3 до 1 мкм на разных типах рабочей поверхности образцов. В измерительную группу попали образцы с пористой поверхностью (прошедшие электрохимическое травление) и с просветляющими покрытиями. Фоточувствительные структуры с p-n-переходом и пористым слоем создавались двумя способами. В первом пористый слой изготавливался электрохимическим травлением кремниевых подложек с текстурированной поверхностью и заранее созданным p-n-переходом. Порообразование на такой поверхности происходит в основном в местах соприкосновения оснований пирамид, где напряженность электрического поля максимальна, поэтому в результате травления структур с мелкозалегающим p-n-переходом исходный n-тип проводимости на гранях тетраэдрических вершин сохраняется, так что образующаяся структура представляет собой ряд вертикальных диодов, объединенных общей подложкой p-типа проводимости. Поглощение света в такой структуре происходит не только на гранях пирамид, но и на

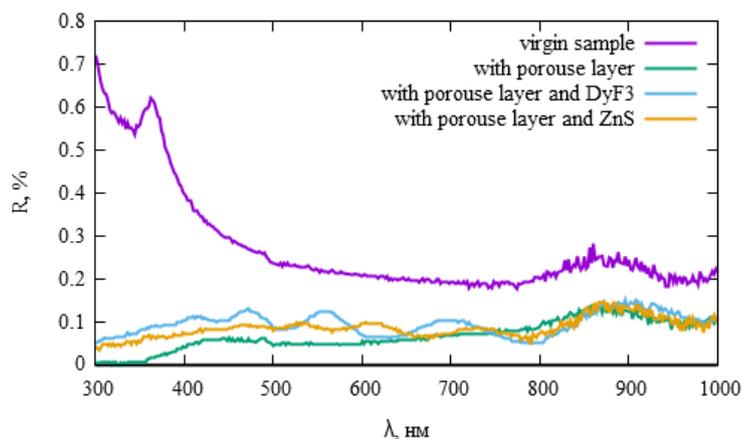


Рисунок 4 - Спектральная зависимость коэффициента отражения образцов кремния с текстурированной поверхностью

стенках пор, в области обедненного слоя, где генерированные светом электронно-дырочные пары эффективно разделяются полем р-n-перехода.

Во втором способе для образования слоя n-типа проводимости диффузия донорной примеси проводилась в уже сформированный пористый слой на подложке р-типа проводимости с текстурированной поверхностью. В этом случае вся развитая поверхность пористого слоя приобретает проводимость n-типа, образуя р-n-переход большой площади. Однако при проведении операции диффузии примеси в пористый слой при температурах 800-1000°C существует риск повредить его нанокристаллическую структуру. В качестве тестовых образцов использовались пластины кремния марки КДБ-3 с текстурированной, шлифованной или полированной поверхностями без пор.

Исследование спектральных зависимостей коэффициента зеркального отражения показало, что создание пористого слоя или нанесение покрытия приводит к значительному снижению коэффициента отражения различных типов поверхности (шлифованная, полированная, текстурированная), особенно заметному в коротковолновой части спектра. Также сильное влияние на отражательную способность оказывает диффузия. Коэффициент отражения для любой поверхности ниже у тех образцов, где порообразование проходило на пластинах с готовым р-n-переходом, т.е. после диффузии.

Исследование спектральных характеристик фототока показало, что нанесение покрытий из фторида диспрозия заметно увеличивает фототок практически во всем исследуемом

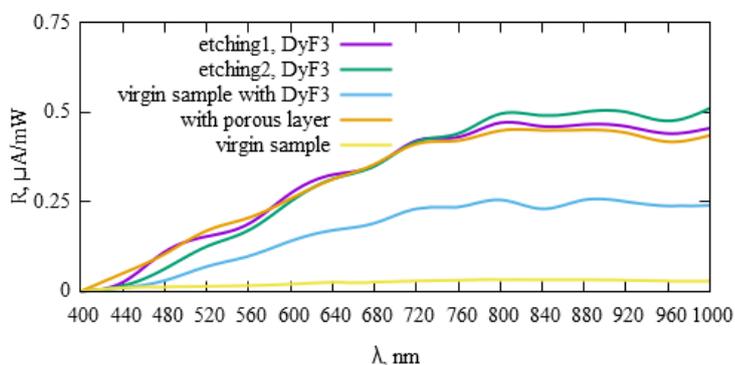


Рисунок 5 - Спектральные характеристики фоточувствительности образцов с пористым слоем и покрытиями DyF₃

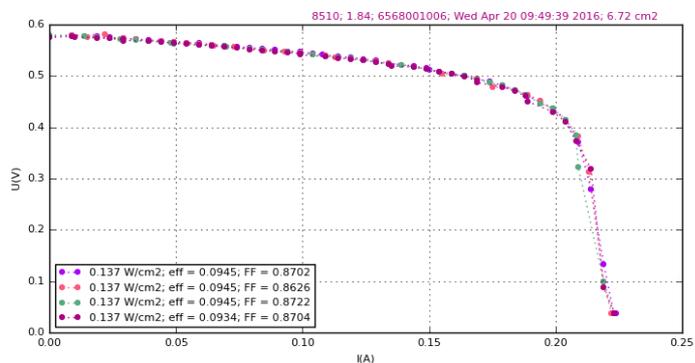


Рисунок 6 - ВАХ образца ФЭП с полированной поверхностью и двойным покрытием ZnS и DyF₃, с пористым слоем

спектральном диапазоне по сравнению с образцами без покрытия. Наличие пористого слоя в структуре также приводит к увеличению ее спектральной чувствительности, особенно заметному в коротковолновой части спектра, что объясняется наличием нанокристаллов кремния в порах. В то же время фоточувствительность структур сильно зависит от технологических параметров процесса их изготовления.

Проведенные исследования ВАХ подтверждают пассивирующие свойства фторида диспрозия на всех типах рабочей поверхности. Наибольший фактор заполнения, равный 0.87, наблюдается на пористых структурах с двойным покрытием. В этом случае проявляется дополнительное легирующее свойство покрытия ZnS и пассивирующее свойство покрытия DyF₃.

Деградация солнечных элементов под воздействием высокопроникающей радиации - основная проблема при использовании их в космосе. Основным проявлением радиационного повреждения является увеличение концентраций дефектов в полупроводнике, которое обуславливает уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда и как следствие – снижение КПД солнечного элемента. Радиационные дефекты проявляют себя в полупроводниках как центры рекомбинации, изменяя время жизни неосновных носителей заряда, как центры захвата, снижая концентрацию основных носителей, и как центры рассеяния, уменьшая подвижность. Таким образом, введением определенных строго дозируемых концентраций термостабильных радиационных дефектов в полупроводники и полупроводниковые приборные структуры можно регулировать их свойства и характеристики порой с точностью, недостижимой при использовании диффузии химических примесей.

Структуры, использующие наноразмерные элементы, являются более перспективными для космических приложений, т.к. проявляют более высокую радиационную стойкость. Это связано, во-первых, с увеличением рабочей поверхности, облегчается рекомбинация возникающих радиационных дефектов на поверхности. Во-вторых, наноразмерным структурам термодинамически не выгодно иметь дефекты.

Было исследовано влияние рентгеновского излучения на свойства структур с пористым слоем. Образцы облучались на рентгеновском аппарате УРС-55-а. Анодом являлась медь, использовалось CuK –излучение с длиной волны 0,1542 нм (энергия кванта излучения: $W = hc/\lambda = 8 \text{ кэВ}$), при напряжении U_a 20кВ, анодный ток составлял 10А, время облучения образцов изменялось от 5 до 30 мин. Для образца с пористым слоем (образец 16) ток короткого замыкания заметно увеличивается, а для структур без пористого слоя уменьшается. Облучение с такой энергией кванта – 8 кэВ - вызывает в кремнии несколько конкурирующих процессов. С одной стороны, это увеличение

концентрации свободных носителей заряда за счет образования и ионизации точечных дефектов (радиационное легирование), с другой стороны – это уменьшение концентрации свободных носителей заряда за счет образования поверхностных рекомбинационных центров. Влияние последнего фактора с течением времени ослабевает, так как концентрация поверхностных центров уменьшается, возвращаясь к равновесной.

На всех образцах заметно явное увеличение тока короткого замыкания после облучения, что связано с увеличением концентрации свободных носителей заряда. Форма кривых спектральных зависимостей образцов до и после облучения практически идентичны для большинства образцов, то есть геометрия образцов под действием облучения не изменяется.

Дальнейшие исследования предполагали эксперимент в условиях открытого космоса. Сейчас на борту МКА «Аист-2Д» находится солнечная панель, которая состоит из 14 образцов фотоэлектрических преобразователей размером 2х3 см каждый, из них 13 различного типа с пористым слоем и один контрольный образец без пористого слоя. Образцы отличаются друг от друга по составу образующей их многослойной структуры. Различна и геометрия каждого чувствительного слоя.

Основные типы ФЭП представлены в таблице:

Таблица 1. Основные типы ФЭП

№ п/п	Структура
1	Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS
2	Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие DyF ₃
3	Полированный кремний, просветляющее покрытие ZnS, типовая технология
4	Полированный кремний, просветляющее покрытие DyF ₃
5	Текстурированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS
6	Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS
7	Текстурированный кремний, просветляющее покрытие ZnS
8	Текстурированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS
9	Шлифованный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS
10	Полированный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS+DyF ₃
11	Шлифованный кремний, просветляющее покрытие ZnS
12	Шлифованный кремний с пористым слоем, просветляющее покрытие ZnS
13	Карбидизированный пористый кремний, просветляющее покрытие ZnS
14	Карбидизированный пористый кремний, просветляющее покрытие DyF ₃

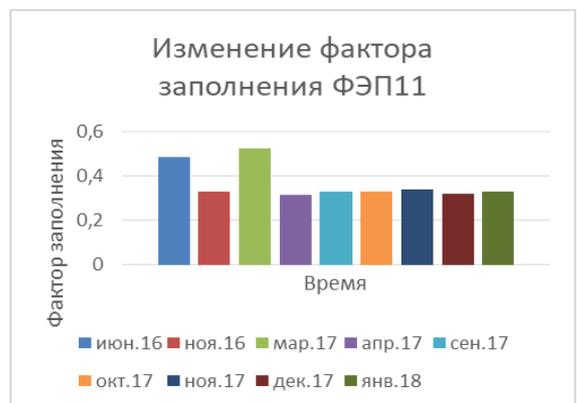
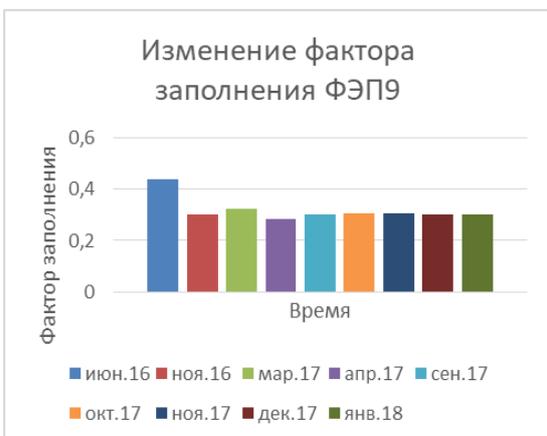
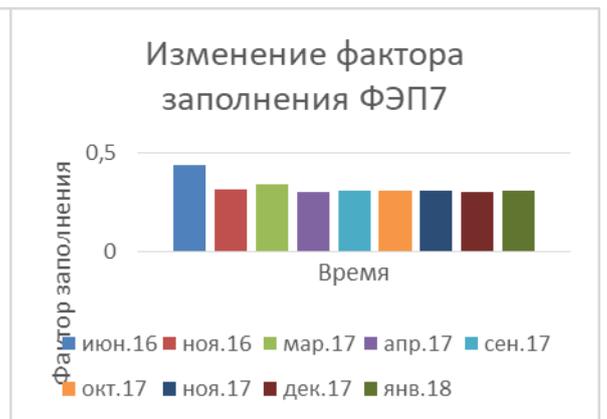
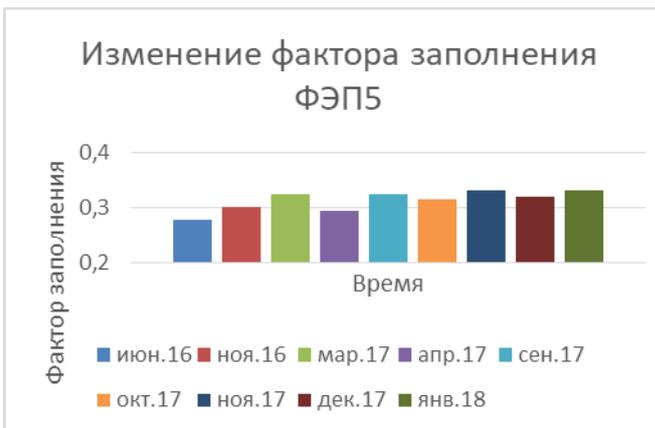


Рисунок 7 - Изменение фактора заполнения образцов ФЭП1-ФЭП14

Образцы с пористым слоем имеют более высокий фактор заполнения, чем образцы без пористого слоя (1 и 3, 2 и 4, 5 и 7, 9 и 11). Это подтверждает результаты наземных испытаний.

Кроме того, анализ влияния пленок в условиях космоса показал, что образцы с покрытием ZnS и пористым слоем показывают лучшее значение фактора заполнения. По данным января 2018 года, этот показатель составил 0,69. Это можно объяснить «долегированием» обедненного слоя электронами. В то же время, образцы с полированной поверхностью, покрытием DyF₃ и пористым слоем за счет свойства пленки - уменьшения рекомбинационных центров – имели фактор заполнения в январе 0,66. Полированный образец с пористым слоем и двойным покрытием ZnS+ DyF₃ имел наибольший фактор заполнения в марте 2017 – 0,79. Это лучший показатель среди всех испытываемых образцов. В январе он стал 0,66. Это можно объяснить не совсем корректными измерениями (не соблюдение одинаковых условий измерения: поворота относительно Солнца).

Интересные результаты продемонстрировали образцы с пористым карбидом кремния и покрытиями ZnS и DyF₃. Комбинация карбидизированный пористый кремний + ZnS изменил показания фактора заполнения с 0,4 до 0,26. Для карбидизированного пористого кремния + DyF₃ это значение изменилось с 0,43 до 0,34, что объясняется свойством пленки DyF₃ – пассивацией поверхности.

Для всех испытываемых образцов наблюдался рост фактора заполнения, что вполне объясняется радиационным легированием. Однако со временем, они приходят к среднему значению.

Пятая глава посвящена моделированию отражения и поглощения излучения в многослойных фоточувствительных структурах, содержащих слои пористого кремния, пористого карбида кремния, сульфида цинка, фторида диспрозия с использованием метода оптических матриц в программе Wolfram Mathematica 9.

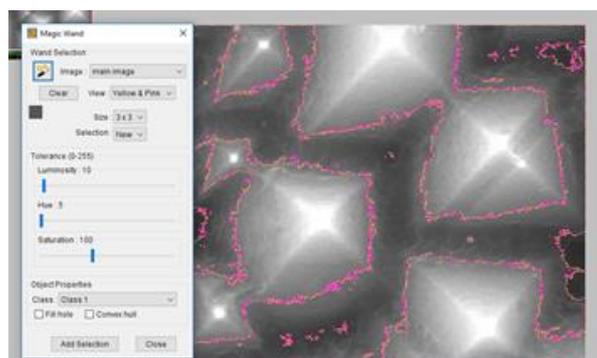


Рисунок 8 - Выделение областей с различной отражательной способностью на исследуемой поверхности

Расчеты коэффициента отражения проводились для поверхности, 56,97 % площади которой занимала текстурированная поверхность и 43,03 % площади - поверхность пористого слоя.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что коэффициент отражения, определенный экспериментально, при заданной степени заполнения намного ниже теоретического. Это можно объяснить тем, что реально грани пирамид не являются атомарно гладкими. В результате электрохимического травления на

них появляется слабо выраженный рельеф, который заметно снижает их коэффициент отражения, что наблюдается и в работах других авторов.

Для расчета коэффициента отражения и пропускания структур, содержащих слои пористого кремния, просветляющие покрытия, использовался метод оптических матриц. Структура рассматривалась как многослойная диэлектрическая система, состоящая из m прозрачных однородных и изотропных слоев, каждый из которых характеризуется показателем преломления n_j и оптической толщиной $n_j d_j$.

Строгое решение задач определения амплитуды (энергии) отраженной и прошедшей электромагнитных волн для непоглощающих покрытий может быть осуществлено на основе метода суммирования многократных отражений, использовании принципа суперпозиций, соотношений Стокса и уравнений Максвелла с определенными граничными условиями. Последний метод в настоящее время становится наиболее строгим и обеспечивает полный и последовательный учет интерференционных и поляризационных эффектов в любых пленочных многослойных системах.

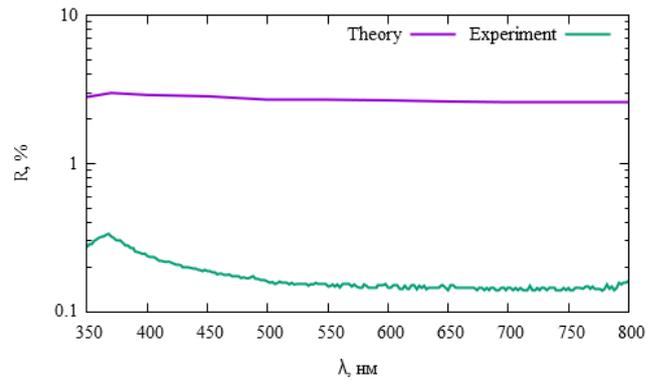


Рисунок 9 - Спектральная зависимость коэффициента отражения образцов с заполняемостью 43% поверхности пористым слоем и экспериментальная кривая

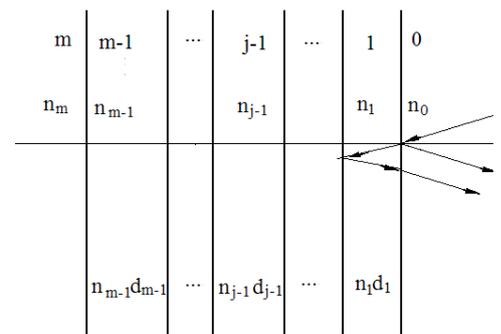


Рисунок 10 - Схема распространения излучения в многослойной системе

Метод оптических матриц можно использовать для расчета коэффициента отражения в довольно сложных покрытиях. Такой подход позволяет применить оптический матричный метод для оценки отражательной способности покрытия ПК. Модель предполагает образование в слоях ПК нанокристаллов и пор различных размеров. Предполагается, что меньшие нанокристаллы располагаются вблизи поверхности и их концентрация уменьшается с глубиной. Это вызывает градиент пористости, что в свою очередь, приводит к градиентам макроскопической диэлектрической функции и показателя преломления. Поэтому ПК можно рассматривать как полупроводник с изменяющейся запрещенной зоной (градиентные полупроводниковые щели) или, в соответствии с нашим случаем, как стопка слоев с разными показателями преломления, увеличивающийся к внутренней поверхности раздела с кремниевой подложкой.

Каждый слой задается матрицей, в состав которой входят два параметра (оптическая толщина и коэффициент преломления).

$$\begin{bmatrix} E_{j-1} \\ H_{j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j & \frac{i}{n_j} \sin \varphi_j \\ in_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_j \\ H_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

Многослойная система также может быть представлена произведением матриц. В этом случае компоненты E, H вектора в среде, из которой падает свет, связаны с компонентами E, H вектора в среде, в которую свет распространяется, следующим соотношением:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_3 \dots M_{m-1} \begin{bmatrix} E_m \\ H_m \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_m \\ H_m \end{bmatrix}, M = \prod_{j=1}^{m-1} M_j \quad (2)$$

Граничные условия:

$$E_0 = E_0^{(t)} + E_0^{(r)}$$

$$H_0 = n_0 E_0^{(t)} - n_0 E_0^{(r)}$$

$$E_{(m)+}^{(t)} = 1$$

$$H_m = n_m E_{(m)+}^{(t)} = n_m$$

С учетом граничных условий:

$$\begin{bmatrix} E_0^{(t)} + E_0^{(r)} \\ n_0 E_0^{(t)} - n_0 E_0^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ n_m \end{bmatrix}$$

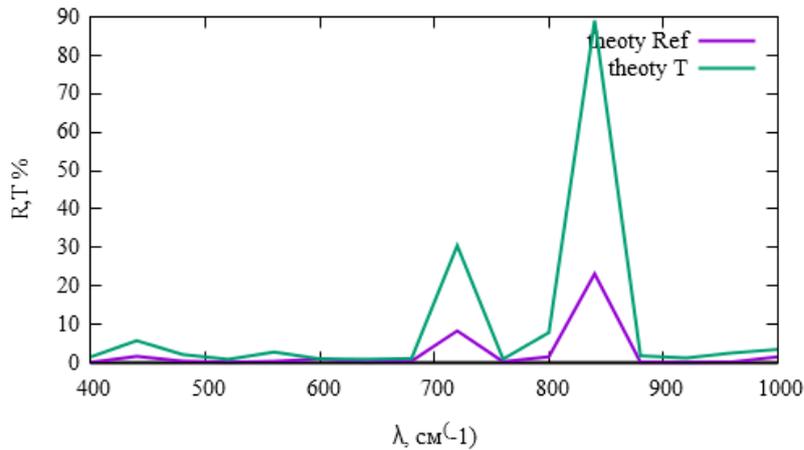


Рисунок 11 - Спектральная зависимость многослойной структуры отражения (фиол.) и пропускания (зел.)

Амплитудные и энергетические коэффициенты отражения и пропускания многослойной интерференционной системы:

$$r_0^- = \frac{E_0^{(r)}}{E_0^{(i)}} = \frac{n_0(m_{11} + in_m m_{12}) - (m_{21} + in_m m_{22})}{n_0(m_{11} + in_m m_{12}) + (n_m m_{22} + im_{21})}, \quad t_0^- = \frac{1}{E_0^{(i)}} = \frac{2n_0}{n_0(m_{11} + in_m m_{12}) + (n_m m_{22} + im_{21})}$$

$$R = |r_0^-|^2, T = \frac{n_s}{n_0} |t_0^-|^2$$

Более низкий коэффициент поглощения, полученный в рамках данной модели связан с поглощением света в нанокристаллах кремния. Анализ полученных данных показал, что теоретическая кривая отражения лежит ниже полученных экспериментальных данных для полированных пластин. Это можно объяснить сложным технологическим процессом создания покрытий в реальных условиях. В действительности, пористый слой не является равномерным слоем, т.к. на полированной пластине он образуется локально, в местах скопления дефектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализированы современные подходы конструирования эффективных кремниевых солнечных элементов третьего поколения и свойства, используемых в них материалов.

Проведен анализ физико-химических процессов, лежащих в основе технологии изготовления фоточувствительных структур с пористым кремнием и покрытиями фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур SiC/porSi.

Исследованы спектральные характеристик оптических и фотоэлектрических параметров фоточувствительных структур с пористым кремнием и покрытиями фторида диспрозия, сульфида цинка и гетероструктур SiC/porSi. Приведены результаты вольтамперных характеристик структур, спектральные характеристики коэффициента отражения и поглощения, квантовой эффективности, токовой фоточувствительности.

Проведена оценка возможности моделирования отражения и поглощения излучения в многослойных фоточувствительных структурах, содержащих слои пористого кремния, сульфида цинка, фторида диспрозия с использованием метода оптических матриц и пакета Wolfram Mathematica 9.

Проведенные исследования показали:

1. Исследование спектральных зависимостей коэффициента зеркального отражения показало, что создание пористого слоя приводит к значительному снижению коэффициента отражения всех исследованных типов поверхности (для шлифованной от 0.4 до 0.2%, для полированной от 45 до 25%, для текстурированной от 0.2 до 0.1%), особенно заметному в коротковолновой части спектра
2. Режимы травления структур оказывают сильное влияние на ход кривой отражения. Для всех типов исследованных поверхностей определены оптимальные режимы травления. Так для текстурированных подложек при времени травления 5 минут коэффициент отражения снижается до 0.05%; для шлифованных пластин при времени травления 15 минут - 0.12%; для полированных пластин при времени травления 10 минут отражение 15-20%.
3. Исследование спектральных характеристик фототока показало, что нанесение покрытий из фторида диспрозия увеличивает фототок практически во всем исследуемом спектральном диапазоне по сравнению с образцами без покрытия (с 0.35 до 0.50 $\mu\text{A}/\text{mW}$). Это объясняется пассивирующими свойствами пленок соединений редкоземельных элементов на поверхности пористого кремния.
4. Порядок операций при формировании р-п- перехода в пористом кремнии оказывает значительное влияние на фотоэлектрические свойства получаемых структур. Образцы, в которых порообразование проводилось после диффузии, обладали более высокой чувствительностью (до 2.1 $\mu\text{A}/\text{mW}$), чем образцы, в которых диффузия проводилась в пористый слой, что объясняется нарушением пористой структуры при проведении высокотемпературной диффузии.
5. Нанесение пленки ИТО увеличивает сбор фото-носителей заряда, генерированных в том числе за счет поглощения света в нанокристаллах, расположенных на стенках

- пор (с 60% до 80% для полированных пластин, с 63% до 86% для текстурированных пластин).
6. Наибольший фактор заполнения, равный 0.87, наблюдается на пористых структурах с двойным покрытием. В этом случае проявляется дополнительное легирующее свойство покрытия ZnS и пассивирующее свойство покрытия DyF_3 .
 7. Сравнительный анализ вольтамперных характеристик макетов ФЭП показал, что структуры с пористым слоем имеют вдвое больший коэффициент преобразования излучения, чем структуры без пористого слоя.
 8. Рассмотрение покрытия ПК в виде однородного слоя не обеспечивает хорошего согласования между рассчитанными значениями R и измеренными значениями в УФ части спектра.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. Natalya Latukhina, Anton Rogozin, Galina Puzyrnaya, Darya Lizunkova, Aleksandr Gurtov, Sergey Ivkov Efficient Silicon Solar Cells for Space and Ground-Based Aircraft//Procedia Engineering 12/2015; V.104, 31. P. 157-161.
2. Кирсанов Н.Ю., Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А., Степихова М.В. Многослойные структуры на основе пористого кремния и соединений редкоземельных элементов: исследование спектральных характеристик//Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 3. С. 367-371
3. Natalya Latukhina, Daria Lizunkova, Victor Chepurnov and Vyacheslav Pararin. Nanocrystalline Silicon and Silicon Carbide Optical Properties//CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the International conference Information Technology and Nanotechnology. Session Computer Optics and Nanophotonics Samara, Russia, 24-27 April, 2017., Vol-1900, p. 84-89
4. Дрондин А. В., Латухина Н. В., Лизункова Д. А., Паранин В.Д. Фотоэлектрические свойства структур на базе пористого кремния с одно- и двухслойными покрытиями//Физика волновых процессов и радиотехнические системы, Т. 20, №4, 2017 год, с. 50-54

Прочие публикации

1. Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Жильцов И. М., Кирсанов Н.Ю., Фролов А.В. Многослойные наноструктуры на базе пористого кремния для оптоэлектроники //XV Всероссийского молодежного Самарского конкурса-

- конференции научных работ по оптике и лазерной физике, 14 по 18 ноября 2017 года (Самара, ФИАН), ФИАН, с.150-156
2. Гуртов А.С., Ивков С. В., Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Шишкин И.А. Эксплуатационные характеристики фотоэлектрических фотопреобразователей на базе пористого кремния, участвующих в летном эксперименте на МКА «Аист-2Д»// Сборник трудов международной молодежной научной конференции «XIV Королевские чтения», посвященной 110-летию со дня рождения С. П. Королева, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ-Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли, 3-5 октября 2017 год. – Самара: Издательство Самарского университета, 2017. Том 1. с.503-504.
 3. Гуртов А.С., Ивков С. В., Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Шишкин И.А. Параметры фотоэлектрических преобразователей на базе пористого кремния, участвующих в летном эксперименте на МКА «Аист-2Д» // Сборник материалов конференции. V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием Актуальные проблемы ракетно-космической техники «V Козловские чтения» 11-15 сентября 2017 года, под общей редакцией А.Н. Кириллина/ СамНЦ РАН, Самара , 2017. Том 2, с.323-326
 4. Латухина Н. В., Лизункова Д. А. Электрофизические свойства структур с диэлектрическими пленками фторидов РЗЭ и слоем пористого кремния//Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2017): Материалы XIV Международной конференции, Санкт-Петербург, 29 мая-2 июня 2017 г. Т.1. – СПб.: изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2017 с.224-226
 5. Латухина Н.В., Лизункова Д. А., Чепурнов В. И., Паранин В. Д. Оптические свойства нанокристаллического кремния и карбида кремния//Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ–2017) 25-27 апреля 2017 года. Самара: Новая техника 2017. с.256-258
 6. Ивков С.В., Гуртов А.С., Миненко С.И., Латухина Н.В., Лизункова Д.А. Подготовка летного эксперимента по определению эксплуатационных характеристик кремниевых наноструктурированных фотоэлектрических фотопреобразователей// В сборнике Инновационный арсенал молодежи: труды 4 научно-технической конференции ФГУП КБ Арсенал. Балтийский Гос. Техн. Ун-т, С.-Птб. Изд. Инфо-Да, 2016г. С. 95-98.
 7. Чепурнов В.И., Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А. Многослойные структуры на базе пористого кремния для практических приложений: энергетика,

- электроника, медицина//Сборник докладов международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ – 2016) 22 -25 нояб. 2016, г. Минск, т. 3. с. 80 – 82
8. Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А., Няпшаев И.А., Емцев К.В. Спектральные характеристики фоточувствительных структур на базе пористого кремния с различными типами рабочей поверхности//Сборник конкурсных докладов XIV Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике, 8 -12 ноября 2016, г. (Самара, ФИАН), Москва, 2016 С.95 – 100
 9. Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А. Многослойные структуры на базе пористого кремния для солнечных элементов//Материалы 15-й международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение». 11 - 14 окт.2016. Саранск, Изд. Мордовского университета, 2016 г. С. 32
 10. Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А., Няпшаев И.А., Емцев К.В. Спектральные характеристики многослойных фоточувствительных структур на базе пористого кремния//Тезисы докладов XI конференции и X школы молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний-2016», Новосибирск 12-15 сентября 2016г. С. 207
 11. Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А., Кирсанов Н.Ю., Степихова М.В. Многослойные фоточувствительные структуры на основе пористого кремния и соединений редкоземельных элементов// Материалы XX международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород 14-18 марта 2016 г., т. 2 Нижний Новгород, изд. НГУ. – С. 646 – 647
 12. Латухина Н.В., Лизункова Д. А., Анисимов В. В. Влияние жесткого рентгеновского излучения на оптические и электрические свойства полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей на основе пористого кремния//Сб. конкурсных докл. XIII Всерос. молодежного Самарского конкурса-конф. научных работ по оптике и лазерной физике 11– 14.11. 2015, г. Москва, С.221-228.
 13. Латухина Н.В., Лизункова Д. А., Анисимов В. В.Материалы для солнечных батарей космического и наземного применения// Сб. матер. II Всерос. н.-т. конф. с междунар. уч. «Инновации в материаловедении». Ин-т. металлургии и материаловед. им. А.А. Байкова РАН, Москва, 1-4.06. 2015. с. 24 – 26

14. Латухина Н.В., Лизункова Д. А. Диэлектрические покрытия для фоточувствительных структур на основе пористого кремния// Сб. конкурсн. докл. XII Всерос. молодежного Самарского конкурса-конф. научных работ по оптике и лазерной физике 12 – 15.12. 2014, г. Самара, С.77-83
15. Латухина Н.В., Лизункова Д. А., Писаренко Г.А., Рогожин А.С., Гаршин А.А. Фотоэлектрические свойства структур на базе пористого кремния// Тезисы докладов X конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Иркутск, 7-12 июля 2014 г., с. 172-173
16. Латухина Н.В., Лизункова Д. А., Писаренко Г.А., Рогожин А.С., Гаршин А.А. Пористый кремний как материал в электронике, энергетике, медицине// Сб. матер. V -ой Всерос. конф. по наноматер. "НАНО 2013" г.Звенигород, 23-27 сент. 2013г, с.422-423.