

На правах рукописи



ГУДОВСКИХ Александр Сергеевич

ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА В ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ СОЛНЕЧНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)" на кафедре квантовой электроники и оптико-электронных приборов.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Афанасьев Валентин Петрович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Цэндин Константин Дамдинович, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, главный научный сотрудник

Доктор технических наук, профессор Шерченков Алексей Анатольевич, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ», профессор

Доктор физико-математических наук, профессор Рудь Василий Юрьевич, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова" (кафедра полупроводников, физический факультет)

Защита состоится «18» декабря 2014 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru

Автореферат разослан «17» сентября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.04

д.ф.-м.н., профессор



Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Среди возобновляемых источников энергии фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии в настоящее время признано самым перспективным, поскольку на ближайшие тысячелетия солнечная энергия является неисчерпаемым, самым мощным и экологически чистым источником энергии. Следует отметить, что с 2000 г. мировой рынок наземных солнечных фотоэлектрических систем растет в среднем на 30 процентов в год.

Однако дальнейшее развитие солнечной энергетики требует постоянного совершенствования характеристик фотопреобразовательных устройств (солнечных элементов или модулей), важнейшим параметром которых является эффективность преобразования солнечной энергии – КПД фотопреобразователей. Существуют различные пути повышения КПД солнечных элементов (СЭ), среди которых наиболее перспективным является использование гетероструктур. Использование материалов с различной шириной запрещенной зоны в многопереходных солнечных элементах позволяет уменьшить потери на термолизацию носителей заряда. Также за счет применения гетеропереходов возможно существенное снижение потерь, связанных с поверхностной рекомбинацией. Однако для гетероструктур особое значение имеют свойства границ раздела, которые зачастую могут играть определяющую роль в работе таких устройств. Дальнейшее совершенствование характеристик гетероструктурных солнечных элементов невозможно без детального анализа процессов, происходящих на границах раздела гетеропереходов.

В работе рассмотрены проблемы влияния свойств границ раздела на эффективность работы солнечных элементов, а также вопросы, связанные с исследованием свойств границ раздела на примере двух типов гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей, представляющих наибольший практический интерес и продемонстрировавших значительный рост КПД за последние два десятилетия: это СЭ на основе гетероперехода между аморфным водородированным кремнием (a-Si:H) и монокристаллическим кремнием (c-Si), представляющие собой альтернативу развитию наземной кремниевой солнечной энергетики КПД которых достиг значения более 24 % при неконцентрированном солнечном излучении, а также многопереходные фотопреобразователи на основе согласованных по параметру кристаллической решетки соединений АШВV, которые достигли наибольших значений КПД (до 43 %) при концентрированном солнечном излучении и представляют большой интерес для концентраторного и космического применения. Поми-

мо большой практической значимости рассматриваемых фотопреобразовательных структур, на их примере демонстрируются наиболее характерные проблемы, связанные с электронными свойствами границ раздела в фотопреобразовательных гетероструктурах.

Актуальность работы обусловлена высокой практической значимостью решаемых задач по поиску путей повышения КПД фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.

Цель работы:

Целью данной работы является проведение комплексных исследований свойств границ раздела в многослойных фотопреобразовательных гетероструктурах на основе элементов IV группы и соединений АШВV для повышения эффективности преобразования солнечной энергии.

Задачи работы

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- разработка новых подходов к конструкции и технологии формирования гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения, позволяющих повысить эффективность преобразования солнечной энергии;
- определение зонной структуры и разработка теоретической модели гетеропереходов между аморфным водородизированным кремнием и кристаллическим кремнием (a-Si:H/c-Si);
- исследование свойств границ раздела в фотоэлектрических преобразователях на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si, определение влияния различных методов обработки поверхности и условий роста слоев на параметры границ раздела гетероперехода a-Si:H/c-Si;
- исследование свойств границ раздела в фотоэлектрических преобразователях на основе согласованных по параметру решетки гетероструктур на основе соединений АШВV и Ge, определение влияния диффузионных процессов на свойства границы раздела между соединениями АШВV и Ge;
- исследование влияния параметров границ раздела (плотность электронных состояний, сечение захвата поверхностных состояний, величины разрыв зон) на свойства фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе гетеропереходов между аморфным водородизированным кремнием и кристаллическим кремнием (a-Si:H/c-Si), а также согласованных по параметру решетки гетероструктур на основе соединений АШВV и Ge;

- разработка методов исследований свойств границ раздела в фотоэлектрических преобразователях на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si и гетероструктур на основе соединений АШВV и Ge.

Объекты и методы исследования

В работе проводятся исследования следующих объектов:

- гетероинтерфейсы между аморфными и кристаллическими полупроводниками, на примере гетероперехода на основе кремния a-Si:H/c-Si (элемента VI группы).
- гетероинтерфейсы между эпитаксиальными слоями соединений АЗВ5, согласованных по параметру решетки.
- гетероинтерфейсы между соединениями АЗВ5 и элементами VI группы, на примере GaInP/Ge гетероперехода (GaP/Si).

Для решения поставленных задач использовался широкий спектр экспериментальных методов исследования полупроводниковых материалов и структур: емкостная спектроскопия (включая спектроскопию полной проводимости, метод вольт-фарадных характеристик и C-V профилирования), измерения вольтамперных и спектральных характеристик, атомно-силовая и электронная микроскопия, фотолюминесценция, а также ряд новых разработанных в работе методик. Теоретические оценки проводились с помощью компьютерного моделирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием набора экспериментальных методов исследований, выполненных на репрезентативной выборке образцов с использованием современного оборудования, а также сопоставлением экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Научная новизна

1. Впервые было продемонстрировано возникновение инверсионного слоя в монокристаллическом кремнии вблизи границы раздела с легированным слоем a-Si:H для анизотипных гетеропереходов a-Si:H/c-Si.
2. На основе разработанного комплекса электрофизических методов исследований получены представления о зонной структуре гетеропереходов между a-Si:H и c-Si, включающее определение положения уровня Ферми в легированных пленках a-Si:H и на границе раздела a-Si:H/c-Si, концентрации и площади сечения захвата поверхностных состояний на границе раздела a-Si:H/c-Si. Было показано, что при возрастании плотности поверхностных состояний выше $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ происходит смещение положения уровня Ферми на границе раздела к середине запрещенной зоны.

3. Впервые показано, что обработка в водородной плазме поверхности монокристаллического кремния р-типа проводимости ((p)c-Si) ухудшает характеристики СЭ на основе гетероперехода (n)a-Si:H/(p)c-Si за счет диффузии водорода в (p)c-Si и пассивации легирующей примеси бора.
4. Продемонстрирован эффект зависимости изменения изгиба зон на границе раздела изотипных гетеропереходов АПВV от интенсивности внешней подсветки, позволяющий разработать новый метод характеристики свойств границ раздела.
5. Показано, что для эпитаксиальных фотопреобразовательных гетероструктур, согласованных по параметру кристаллической решетки, потенциальные барьеры для основных носителей заряда, образующиеся за счет разрывов зон на границах раздела создают фундаментальное ограничение эффективности фотоэлектрического преобразования.
6. Продемонстрировано, что на границе раздела между фосфидами и арсенидами металлов III группы р-типа проводимости за счет существенных значений разрывов валентных зон формируются потенциальные барьеры, препятствующие транспорту основных носителей заряда.
7. Впервые показано формирование потенциального барьера для основных носителей заряда на границе раздела между слоями GaInP n-типа проводимости и подложкой Ge за счет одновременной диффузии атомов Ga и P, что приводит к ухудшению характеристик фотоэлектрических преобразователей, содержащих гетеропереход GaInP/Ge, и к аномальному виду темновых ВАХ при температурах менее 150 К.

Практическая ценность

1. Продемонстрировано преимущество фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе a-Si:H/c-Si, сформированных на подложках Si n-типа проводимости по сравнению со структурами на подложках Si р-типа проводимости, обусловленное более слабой зависимостью уровня рекомбинации от плотности поверхностных состояний за счет особенностей зонной структуры, и позволяющее достигать выигрыша КПД до 2 %.
2. Разработан комплекс технологических операций по созданию высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе a-Si:H/c-Si, учитывающий принципиальные отличия в подходах формирования гетероперехода a-Si:H/c-Si для подложек монокристаллического кремния n- и р- типов проводимости, которые обусловлены негативным влиянием водородной плазмы при использовании подложек кремния, легированных бором, а также заключаются в необходимости использования бу-

ферного нелегированного слоя $a\text{-Si:H}$ при осаждении слоев $a\text{-Si:H}$, легированных бором, на поверхность кристаллического кремния, в то время как при осаждении слоев, легированных фосфором такой необходимости нет.

3. Разработан научно-обоснованный подход к конструкции фотопреобразовательных структур на основе соединений АШВV, согласованных по параметру решетки, учитывающий особенности зонной структуры гетеропереходов. Продемонстрировано повышение КПД трехпереходных GaInP/GaInAs/Ge фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения $n\text{-}p$ полярности за счет оптимизации конструкции с учетом разрывов зон на границах раздела с 33.6 до 34.6 %.

4. Продемонстрирована принципиальная возможность формирования фотопреобразователей на основе GaInP $p\text{-}n$ полярности, работающих в условиях концентрированного солнечного излучения при использовании двухслойного широкозонного окна AlGaAs/AlGaInP за счет уменьшения высоты паразитного потенциального барьера.

5. Предложен новый способ повышения эффективности преобразования солнечного излучения GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов за счет использования широкозонного эмиттера в среднем и нижнем переходах.

Реализация и внедрение результатов

Результаты исследований использованы при выполнении НИОКР «Создание интегрированной энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии – солнца и ветра» и НИР «Создание технологий и оборудования для изготовления фотоэлектрических преобразователей на основе многослойных структур» «Разработка гетероструктурных солнечных элементов и фотоэлектрических установок», «Разработка и выпуск опытной партии солнечных фотоэнергоустановок на основе многослойных наногетероструктур» в лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. Иоффе РАН, а также при выполнении НИР в лаборатории возобновляемых источников энергии СПб АУ НОЦНТ РАН: РФФИ 08-08-00916-а «Теоретико-экспериментальные исследования базовых принципов создания солнечных элементов нового поколения», РФФИ 11-08-01049-а «Анизотипные гетеропереходы с широкозонным эмиттером для АЗВ5 многопереходных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии», в рамках программ РАН «Явления на интерфейсах многопереходных фотопреобразовательных наногетероструктур на основе соединений АЗВ5», «Разработка эпитаксиальных технологий полупроводниковых наногетероструктур для преобразования энергии», «Солнечные элементы на основе квантово-размерных гетерост-

руктур», «Комплекс исследований концентраторных каскадных солнечных элементов на основе наногетероструктур», «Исследование по созданию высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей на основе кремниевых наногетероструктур», гранты Президента РФ «Исследование свойств границ раздела в многослойных фотопреобразовательных гетероструктурах» «Новый подход к разработке высокоэффективных солнечных элементов на основе A^3B^5 гетероструктур». Результаты работы нашли применение в учебном процессе СПбГЭТУ(ЛЭТИ) по магистерской программе «Солнечная гетероструктурная фотоэнергетика».

Разработанные технологические подходы формирования фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии на основе гетероструктур a-Si:H/c-Si и методики характеристики качества границ раздела a-Si:H/c-Si внедрены в ООО "НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе".

Научные положения, выносимые на защиту

1. В фотопреобразовательных структурах на основе гетероперехода между аморфными и монокристаллическими полупроводниками основным фактором ограничивающим КПД является рекомбинация на границе раздела, в то время как для гетероструктур на основе соединений A³B⁵, согласованных по параметру решетки, доминирующую роль в ограничении эффективности преобразования оказывают паразитные потенциальные барьеры, возникающие за счет разрывов зон на границах раздела гетеропереходов.
2. Фундаментальные различия в зависимости уровня рекомбинации от плотности поверхностных состояний для гетеропереходов (p)a-Si:H/(n)c-Si и (n)a-Si:H/(p)c-Si, обусловленные тем, что значение разрыва валентной зоны существенно превосходит значение разрыва зоны проводимости, что приводит к значительно меньшей концентрации неосновных носителей заряда на границе (p)a-Si:H/(n)c-Si и, следовательно, к снижению уровня рекомбинации по сравнению с гетеропереходом (n)a-Si:H/(p)c-Si.
3. Определена зонная структура гетероперехода между легированными слоями a-Si:H и монокристаллическим кремнием, где значения разрывов зон проводимости существенно превосходит разрыв валентных зон и при оптической щели a-Si:H 1.72 эВ составляют $\Delta E_C = 0.15$ эВ и $\Delta E_V = 0.45$ эВ, соответственно. Обнаружено и экспериментально подтверждено возникновение слоя с инверсией типа проводимости на границе раздела анизотипных гетеропереходов a-Si:H/c-Si.

4. Введение тонкого промежуточного нелегированного слоя $a\text{-Si:H}$ между легированными бором слоями $a\text{-Si:H}$ и подложкой Si необходимо для снижения уровня рекомбинации на этой границе раздела в то время как при легировании $a\text{-Si:H}$ фосфором наличие тонкого промежуточного нелегированного слоя $a\text{-Si:H}$ не оказывает заметного влияния на свойства фотоэлектрических преобразователей.

5. На границе раздела изотипных гетеропереходов p -типа проводимости между фосфидами и арсенидами металлов III-группы разрыв валентной зоны превышает разрыв зоны проводимости, что приводит к возникновению паразитных потенциальных барьеров для основных носителей, и является фундаментальным ограничением эффективности преобразования солнечной энергии.

6. В гетероструктурах между эпитаксиальными слоями GaInP n -типа проводимости и подложкой Ge возникает паразитный потенциальный барьер, обусловленный повышенной концентрацией галлия в приповерхностной области германия за счет разности пределов растворимости фосфора и галлия.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Electrochemical Society Conference (April 27 – May 2 2003, Paris, France); European Materials Research Society (E-MRS) 2003 Spring meeting (June 10-13 2003, Strasbourg), 20-th International Conference on Amorphous and Microcrystalline Semiconductors ICAMS 20 (August, 2003 Campos do Jordao, Brasil); 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference (7-11 June 2004, Paris, France); IV международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (июль 2004, Санкт-Петербург); Seminaire ADEM-CNRS-CEA, Sofia Antipolis, (Novembre 2004); 11th Euroregional Workshop on Thin Silicon Devices (2-4 February 2005, Delft); European Materials Research Society 2005 Spring meeting (May 31 – June 3 2005, Strasbourg); 21th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors ICANS 21 (4-9 September 2005, Lisbon); Seminaire ADEM-CNRS-CEA, Sofia Antipolis, (14-16 Novembre 2005); European Materials Research Society 2006 Spring meeting (May 31 – June 3 2006, Nice); European Materials Research Society 2007 Spring meeting (May 28 – June 1 2007, Strasbourg); Российско-немецком Симпозиуме «Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии – путь в будущее» (14-15 апреля 2008, Санкт-Петербург); VI международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (07-09 июля, 2008, Санкт-Петербург); 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference (01-05 Sep-

tember 2008, Valencia, Spain); European Materials Research Society 2009 Spring meeting (June 8 –12 2009, Strasbourg), 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference (6-10 September 2010, Valence, Spain); European Materials Research Society 2010 Fall Meeting (13-17 September 2010, Warsaw, Poland); European Materials Research Society 2011 Spring meeting (May 9 –13 2011, Nice); International conference Next Generation Solar Energy, From Fundamentals to Applications (December 2011 Erlangen, Germany); VIII международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (02-05 июля 2012, Санкт-Петербург); European Materials Research Society 2013 Spring Meeting (27-31 May 2013, Strasbourg, France); девятой Российской конференции "Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики" (11-14 ноября 2013 года, Санкт-Петербург).

Личный вклад автора. В представленных работах, опубликованных вместе с соавторами, личный вклад автора состоял в постановке задачи, разработке концептуальных подходов, выполнении расчетов и непосредственном проведении экспериментальных исследований.

Публикации. Материалы исследований, в настоящей диссертации опубликованы в 55 работах, в том числе 37 в реферируемых источниках, рекомендованных ВАК, 1 монография, 2 главы в монографиях, 4 патента и 11 прочих источников. Список основных статей приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 272 страницы, включая 146 рисунков, 14 таблиц и список цитированной литературы из 142 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, определены ее цели и задачи исследования, обоснована актуальность и научная новизна, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 рассмотрены основные теоретические аспекты, связанные с зонной структурой гетеропереходов и транспортом носителей заряда. Показано существенное влияние свойств границ раздела, определяемых такими параметрами как плотность поверхностных состояний (D_{it}), площадь сечения захвата носителей заряда ($\sigma_{n,p}$) и разрывы зон ($\Delta E_{C,V}$) на зонную структуру гетеропереходов и транспорт носителей заряда. Отмечается особая роль поверхностных состояний наличие которых может привести к существенному изменению изгибов зон на границе раздела, а также к значительным рекомбинационным потерям. Продемонстрировано, что существующие модели ге-

теропереходов использующие аналитическое решение не позволяют в полной мере описать свойства многослойных фотопреобразовательных гетероструктур.

Для исследования влияния свойств границ раздела на эффективности работы СЭ и для анализа экспериментальных данных разработана теоретическая модель изотипных и анизотипных гетеропереходов, основанная на численном решении уравнений непрерывности и Пуассона. Применимость использования предложенной модели гетеропереходов для описания фотоэлектрических и электрофизических свойств фотопреобразовательных $a\text{-Si:H/c-Si}$ гетероструктур обусловлена тем фактом, что основной вклад в процесс фотоэлектрического преобразования происходит за счет генерации в кристаллическом полупроводнике. Для описания плотности состояний в щели подвижности слоев аморфных полупроводников использовался классический подход: два экспоненциальных распределения описывающие состояния в хвостах зоны проводимости и валентной и два дефекта в середине щели подвижности с распределением Гаусса: донорного и акцепторного типов, описывающие состояния в середине щели, обусловленные оборванными связями. Результаты структурных исследований границ раздела между слоем $a\text{-Si:H}$ и подложкой $c\text{-Si}$, проведенные с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, показали наличие переходной области порядка 2–3 нм на границе раздела $a\text{-Si:H/c-Si}$. Данная область в теоретической модели описывалась слоем толщиной 1 нм с высокой концентрацией дефектов, расположенного между двумя полупроводниковыми слоями.

В главе 2 рассмотрены границы раздела в солнечных элементах на основе гетеропереходов между аморфным гидрогенизированным и кристаллическим кремнием ($a\text{-Si:H/c-Si}$). СЭ на основе $a\text{-Si:H/c-Si}$ обладают высокими значениями КПД достигающими величины 24.7 % [1] и лучшей температурной стабильностью характеристик по сравнению с традиционными СЭ на основе монокристаллического кремния с диффузионным $p\text{-}n$ переходом. Низкие температуры (150–250 °С) процесса изготовления таких структур позволяют использовать более тонкие пластины $c\text{-Si}$, что приводит к снижению расхода материала и повышению энергоэффективности производства.

Схематическое изображение структуры СЭ на основе гетероперехода $a\text{-Si:H/c-Si}$ представлено на рис. 1. Основная особенность таких гетероструктур заключается в том, что для формирования выпрямляющего перехода на пластину $c\text{-Si}$ p - или n -типа проводимости методом плазмо-химического осаждения (ПХО) наносится сильно легированный слой $a\text{-Si:H}$ n - или p -типа, соответственно. Осаждение слоев $a\text{-Si:H}$ происходит при температуре 120–250 °С за

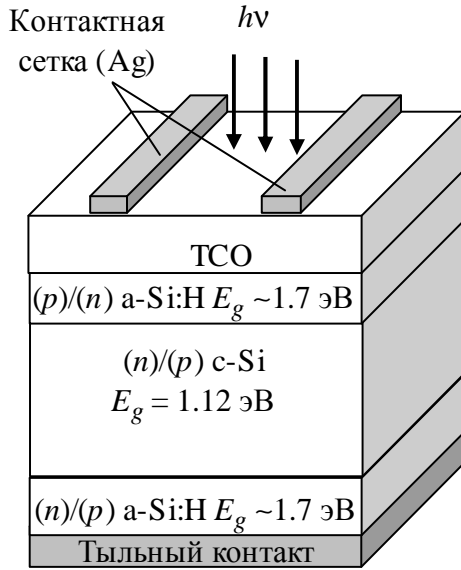


Рис.1 Конструкция СЭ на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si

гетеропереход наносится слой прозрачного проводящего оксида (TCO), который играет роль просветляющего покрытия и проводящего слоя, поскольку латеральная проводимость пленок a-Si:H достаточно низка. В качестве TCO используются слои оксида индия-олово (ITO) или легированного Al ZnO, наносимые методом магнетронного распыления. Для формирования встроенного поля на тыльном невыпрямляющем контакте (тыльного потенциального барьера) на пластину c-Si наносится легированный слой a-Si:H того же типа проводимости, что и c-Si. Изготовление СЭ завершается нанесением металлических электродов на обе стороны гетероструктур (сверху в виде сетки).

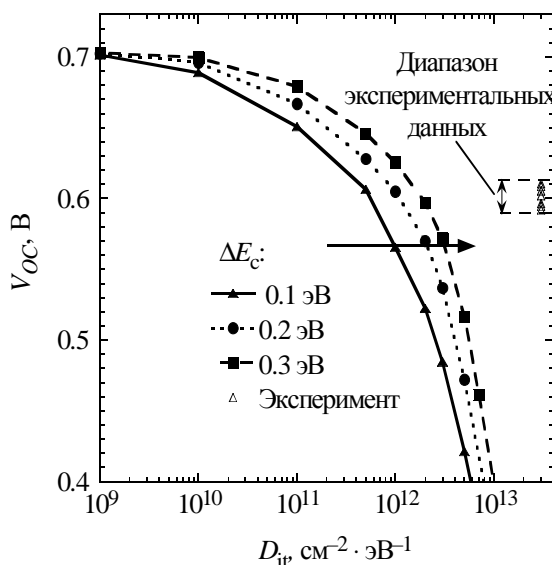


Рис.2 Расчетная зависимость V_{OC} от D_{it} для (n)a-Si:H/(p)c-Si/(p+)c-Si СЭ

счет разложения SH_4 (или смеси с H_2) в плазме ВЧ разряда. Для получения a-Si:H n-типа проводимости слои легируются атомами фосфора за счет введения в PH_3 в газовую смесь. Слои a-Si:H p-типа проводимости легируются атомами бора из B_2H_6 или $\text{B}(\text{CH}_3)_3$.

Слой a-Si:H играет роль эмиттера, а также обеспечивает пассивацию поверхности c-Si. Толщина слоя a-Si:H должна быть минимальной, чтобы уменьшить поглощение в этом слое (и, следовательно, потери на рекомбинацию), но в то же время достаточной для формирования гетероперехода. Сверху на сформированный

Эффективность преобразования солнечной энергии СЭ на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si в первую очередь определяется поверхностными состояниями на границе раздела между a-Si:H и c-Si. Полученная в результате численного расчета зависимость напряжения холостого хода (V_{OC}) от D_{it} на гетерогранице (n)a-Si:H/(p)c-Si, показанная на рис. 2, демонстрирует значительное снижение V_{OC} с ростом D_{it} . Только при значениях $D_{it} \leq 10^{10} \text{ см}^2$

$2 \cdot \text{эВ}^{-1}$ ($\sigma_n = \sigma_p = 10^{-14} \text{ см}^2$) влияние поверхностных состояний становится незначительным.

Экспериментальная оценка плотности поверхностных состояний на границе раздела $(n)\text{a-Si:H}/(p)\text{c-Si}$ проводилась с помощью разработанной методики на основе измерения спектров полной проводимости ($C-T-\omega$, $G-T-\omega$). Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов теоретического расчета позволяет провести оценку электронных свойств границы раздела $\text{a-Si:H}/\text{c-Si}$ (D_{it} , $\sigma_{n,p}$) для образцов с $D_{\text{it}} > 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, а также выделить три условные группы образцов (рис. 3). КПД образцов из группы № 1 находился в диапазоне 5 – 10 %, группы № 2 и 3 в пределах 12– 15 %.

Для образцов из группы № 1 характерно проявление особенности на зависимостях $C-T-\omega$ и $G-T-\omega$ в виде значительной ступени емкости и пика проводимости при высоких температурах, которая обусловлена откликом поверхностных состояний за счет обмена (захвата и эмиссии) дырок между поверхностными состояниями на уровне Ферми и валентной зоной $(p)\text{c-Si}$. Оценка D_{it} дает значение, находящееся в диапазоне $(1-5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ($\sigma_p \sim 10^{-13} \text{ см}^2$). При этом экспериментальные значения энергии активации этого процесса $\sim 0.5 \text{ эВ}$, соответствующие разнице между уровнем Ферми и потолком валентной зоны на границе раздела $(E_F - E_V \text{ c-Si})_{\text{it}}$, свидетельствуют о смещении положения уровня Ферми к середине запрещенной зоны на границе $\text{a-Si:H}/\text{c-Si}$ (рис. 4), т.е. проявляется пиннинг уровня Ферми поверхностными состояниями.

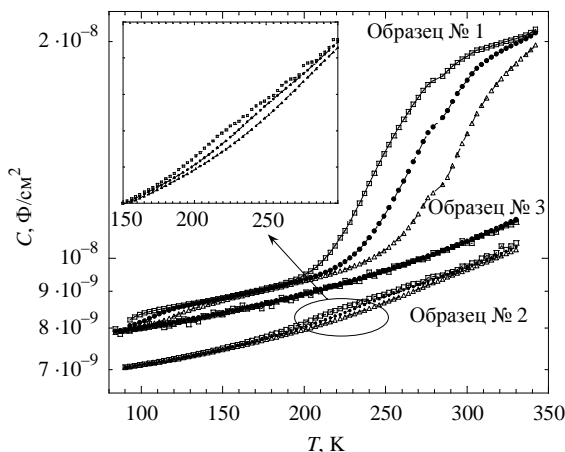


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $C-T-\omega$ для трех характерных образцов, измеренных при нулевом смещении и частотах 100 Гц (\square), 1 кГц (\bullet) и 10 кГц (Δ)

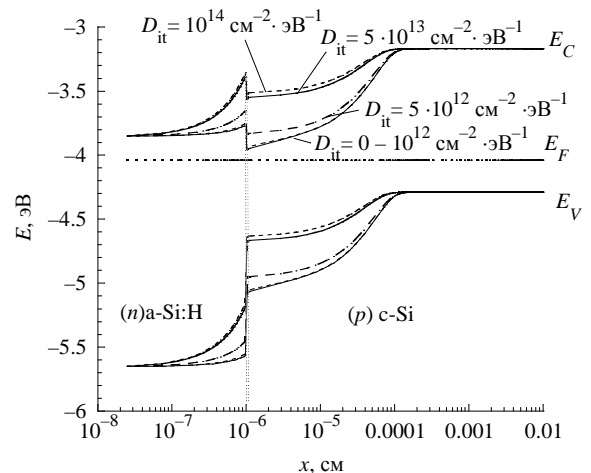


Рис. 4. Расчетная зонная диаграмма для различных значений D_{it} в условиях равновесия

Для группы образцов № 2 характерно проявление незначительной ступени емкости, обусловленной обменом электронов между поверхностными

состояниями и зоной проводимости (*n*)a-Si:H. В этом случае D_{it} находится в диапазоне $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ ($\sigma_n \sim 10^{-15} \text{ см}^2$). Экспериментальные значения энергии активации $\sim 0.4 \text{ эВ}$, соответствующие разнице $(E_C \text{ a-Si:H} - E_F)_{it}$, свидетельствуют о том, что для данного диапазона значений D_{it} положение уровня Ферми на границе a-Si:H/c-Si слабо зависит от поверхностных состояний.

Отсутствие какой-либо особенности на кривых $C-T-\omega$ для образцов из группы № 3 обозначает, что D_{it} меньше, чем $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, являющейся пределом чувствительности методики.

Для повышения чувствительности к плотности поверхностных состояний был предложен новый способ оценки качества границы раздела a-Si:H/c-Si, основанный на измерениях диффузионной емкости при освещении и прямом напряжении смещения, близком к напряжению холостого хода (V_{OC}). Было продемонстрировано, что абсолютное значение диффузионной емкости C_{LF} сильно зависит от рекомбинации на границах раздела (рис. 5), что позволяет проводить оценки качества как фронтальной, так и тыльной границы раздела. В свою очередь уровень рекомбинации на границе (n)a-Si/(p)c-Si может быть выражен как:

$$U \approx c_p p \int_{E_1}^{E_2} D_{it}(E) dE,$$

где $E_2 = E_{Fn}$; $E_1 = E_i - (E_{Fn} - E_i) - kT \ln(c_n/c_p)$; E_i – уровень Ферми в собственном c-Si; E_{Fn} – квазиуровень Ферми для электронов. Это выражение показывает, что уровень рекомбинации зависит от D_{it} , площади сечения захвата дырок (σ_p) и от ΔE_C (зависимость скрыта в концентрации дырок и пределах интегрирования, $E_2 - E_1$). Следовательно, для количественной оценки D_{it} необходимо знать значение разрывов зон между a-Si:H и c-Si.

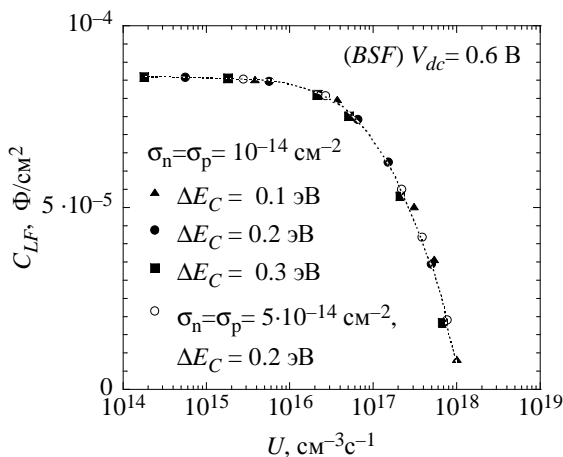


Рис. 5. Расчетная зависимость C_{LF} от уровня рекомбинации на границе раздела (n)a-Si:H/(p)c-Si для различных значений ΔE_C , D_{it} и σ_p

показывает, что уровень рекомбинации зависит от D_{it} , площади сечения захвата дырок (σ_p) и от ΔE_C (зависимость скрыта в концентрации дырок и пределах интегрирования, $E_2 - E_1$). Следовательно, для количественной оценки D_{it} необходимо знать значение разрывов зон между a-Si:H и c-Si.

Анализ литературы свидетельствует о сильном разбросе данных по экспериментально измеренным значениям ΔE_C , ΔE_V для границы

a-Si:H/c-Si [2], что обуславливает необходимость проведения детального анализа применяемых методов исследований.

Одним из наиболее распространенных методов определения разрывов зон анизотипных гетеропереходов является метод на основе измерения вольт-фарадных характеристик. В основе методики лежит предположение, что величину суммарного диффузионного потенциала V_d можно найти, построив зависимость $1/C^2$ от напряжения обратного смещения V . Применительно к гетеропереходу (n)a-Si:H/(p)c-Si выражение для суммарного диффузионного потенциала V_d может быть представлено следующим образом:

$$qV_d = qV_{d \text{ a-Si:H}} + qV_{d \text{ c-Si}} = E_{g \text{ c-Si}} + \Delta E_C - \delta_{\text{a-Si:H}} - \delta_{\text{c-Si}}.$$

где $\delta_{\text{c-Si}}$ –разность между E_F и E_V в квазинейтральной области (p)c-Si и $\delta_{\text{a-Si:H}}$ –разность между E_C и уровнем Ферми E_F в квазинейтральной области (n)a-Si:H. Поскольку величины $E_{g \text{ c-Si}}$, $\delta_{\text{c-Si}}$, и $\delta_{\text{a-Si:H}}$ известны или могут быть определены из других измерений, если определить V_d , то может быть проведена оценка величины ΔE_C . Предполагается, что напряжение пересечения линейной экстраполяции с осью напряжений V_{int} ($1/C^2 \rightarrow 0$) равно величине диффузионного потенциала.

Однако проведенный анализ экспериментальных и расчетных зависимостей $1/C^2(V)$ показал, что величина V_{int} возрастает только при малых значениях ΔE_C , а затем выше некоторого критического значения $\Delta E_{C \text{ sat}}$ этот параметр уходит в насыщение $V_{\text{int sat}}$, и далее не зависит от ΔE_C . Величина $V_{\text{int sat}}$ зависит от уровня легирования c-Si (0.65 и 0.76 эВ для $N_a = 10^{15}$ и 10^{16} см^{-3} соответственно). Было показано, что обнаруженное насыщение V_{int} обусловлено существованием слоя с сильно выраженной инверсией проводимости в c-Si на границе раздела a-Si:H/c-Si. Концентрация электронов n вблизи гетерограницы становится выше концентрации легирующей примеси N_a в c-Si. На рис. 6 представлена расчетная зонная диаграмма в условиях равновесия, полученная для двух значений ΔE_C . Видно, что для $\Delta E_C = 0.05$ эВ, когда $V_d \approx V_{d \text{ c-Si}} \approx V_{\text{int}}$, инверсионный слой отсутствует. Напротив, для $\Delta E_C = 0.3$ эВ, когда $V_{\text{int}} = V_{\text{int sat}} \neq V_d$ на границе присутствует слой сильной инверсии проводимости. Таким образом, в случае формирования области с инверсией проводимости на границе раздела анизотипных гетеропереходов использование традиционного метода определения разрывов зон, основанного на вольт-фарадных измерениях, может привести к недостоверным результатам.

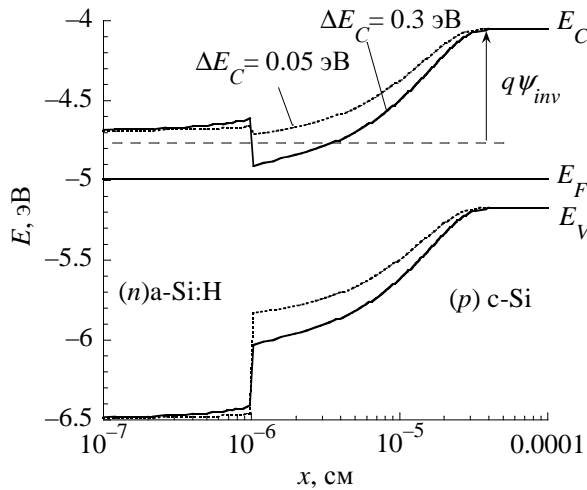


Рис. 6. Расчетные зонные диаграммы для двух значений величины ΔE_C при $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $\delta_{\text{a-Si:H}} = 0.3 \text{ эВ}$

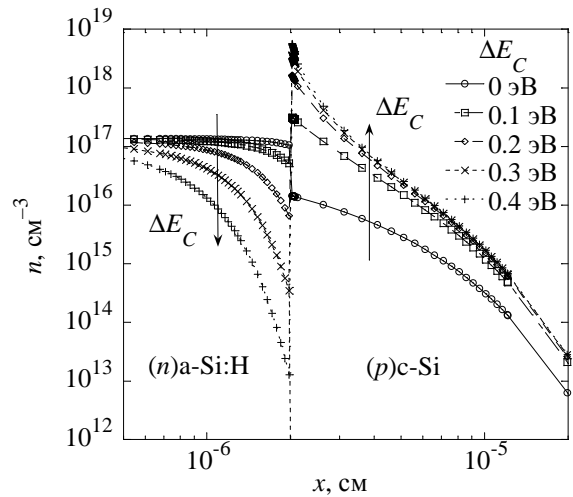


Рис. 7. Расчетный профиль распределения концентрации электронов в области границы (n)a-Si:H/(p)c-Si для различных значений ΔE_C и $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Наличие инверсионного слоя было экспериментально подтверждено измерениями поверхностной проводимости, проведенных на образцах с планарным расположением электродов на верхней поверхности гетероструктур (рис. 8). Поверхностная проводимость (n)a-Si:H/(p)c-Si-структур на несколько порядков превосходит проводимость слоев (n)a-Si:H, а также имеет существенно меньшее значение энергии активации температурной зависимости проводимости (0.018 эВ) по сравнению со значениями, характерными для a-Si:H n-типа проводимости (0.2 эВ). Высокая поверхностная проводимость обусловлена повышенной концентрацией электронов в инверсионном слое и не связана с учетчиками через подложку c-Si о чем свидетельствуют эксперименты по травлению слоя a-Si:H, находящегося в интервале между планарными электродами.

Исходя из зонной диаграммы для (n)a-Si:H/(p)c-Si-гетероперехода поверхностная плотность электронов N_s определяется как

$$N_s = \int_0^{d_{c-Si}} n(x) dx, \quad (2.2)$$

где d_{c-Si} – толщина c-Si подложки, а $n(x)$ – профиль распределения концентрации электронов в направлении, перпендикулярном поверхности (ноль отчитывается от a-Si:H/c-Si-гетерограницы). N_s определяет поверхностную проводимость G ,

$$G = q \mu_n N_s h/L,$$

где q – заряд электрона; μ_n – подвижность электронов; h – длина электродов; L – расстояние между ними.

Как видно из рис. 7 концентрация электронов зависит от ΔE_C . Проведенный расчет зависимости N_S от ΔE_C для температуры 300 К позволил, опираясь на экспериментальные данные, определить нижний предел для ΔE_C в 0.1 эВ. Однако анализ температурной зависимости N_S позволяет определить значение ΔE_C с гораздо большей точностью.

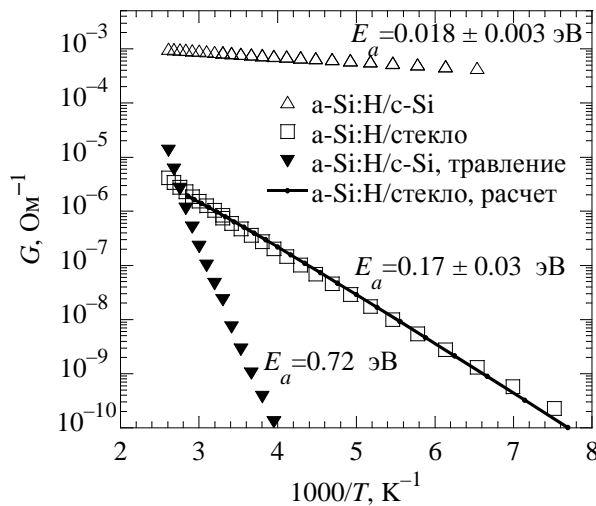


Рис.8. Экспериментальные температурные зависимости проводимости а-Si:H/стекло и а-Si:H/c-Si структур до и после травления

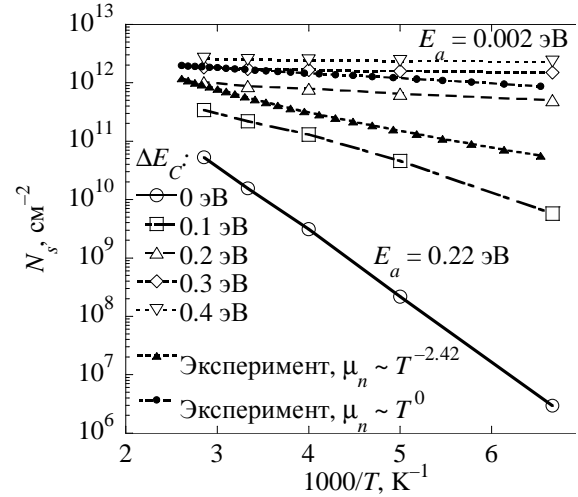


Рис. 9. Температурные зависимости N_S рассчитанные для различных значений ΔE_C и экспериментальные данные для двух крайних случаев зависимости $\mu_n(T)$

Зависимость рассчитанных значений N_S от обратной температуры представлена на рис. 9. С ростом ΔE_C происходит возрастание величины N_S , но температурная зависимость становится слабее, что приводит к снижению энергии активации E_a . Из выражения для концентрации электронов

$$n(x) = N_C \exp\left(-\frac{E_C(x) - E_F}{kT}\right),$$

где N_C – эффективная плотность состояний зоны проводимости в c-Si; E_C – дно зоны проводимости в c-Si, очевидно, что температурная зависимость N_S определяется в первую очередь разностью между E_C и E_F вблизи границы раздела, где концентрация электронов максимальна. Эта разница уменьшается с ростом ΔE_C , аналогичное поведение наблюдается и для E_a .

Экспериментальная температурная зависимость N_S , вычисленная по измеренной температурной зависимости проводимости представлена на рис. 9. Поскольку значение подвижности электронов (μ_n) и ее температурная зависимость ($\mu_n = \mu_{300}(T/300)^\alpha$) в инерсионном слое может существенно отличаться

ся от значения в объеме *c*-Si для оценки экспериментальной величины N_s используются два предельных значения: $\mu_{300} \approx 1500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и $\alpha \approx 2.4$ для объемного материала в качестве верхнего предела и $\mu_{300} \approx 500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $\alpha \approx 0$ худшие значения, встречаемые в литературе для приповерхностной области в *c*-Si, в качестве нижнего предела. Рассматривая эти два предельных случая, экспериментальные значения энергии активации находятся в диапазоне $0.018 < E_a \text{ (эВ)} < 0.07$. По ним можно определить, что значение ΔE_C находится в диапазоне от 0.12 до 0.19 эВ.

Аналогичным образом были проведены измерения поверхностной проводимости и проведен расчет температурных зависимостей поверхностной плотности дырок N_s для различных значений ΔE_V для (*p*)a-Si:H/(*n*)c-Si гетероперехода. Было обнаружено, что экспериментальные данные воспроизводятся лучшим образом при $\Delta E_V = 0.45 \pm 0.05 \text{ эВ}$. Полученное значение находится в хорошем согласии с определенным ранее значением $\Delta E_C = 0.15 \pm 0.05 \text{ эВ}$ и значением щели подвижности a-Si:H находящимся в диапазоне 1.7...1.8 эВ.

Наличие на границе раздела анизотипного гетероперехода a-Si:H/*c*-Si инверсионного слоя с высокой проводимостью было также независимо подтверждено с помощью метода сканирующей зондовой микроскопии – атомно-силовой микроскопией с зондом проводимости для обоих типов структур (*n*)a-Si:H/(*p*)c-Si и (*p*)a-Si:H/(*n*)c-Si.

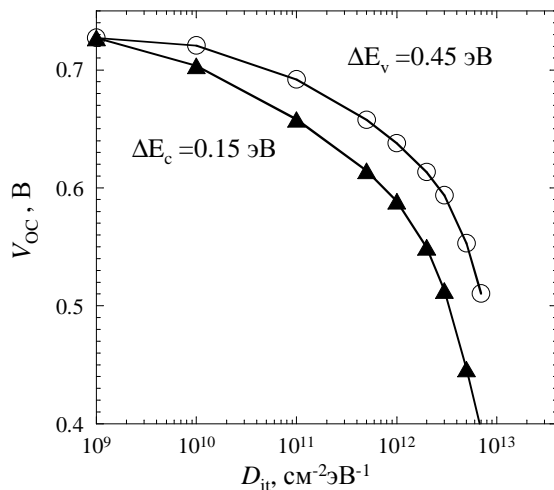


Рис. 11. Зависимость V_{OC} от D_{it} для СЭ на основе подложек Si *p*- и *n*-типов проводимости

Полученные представления о зонной структуре a-Si:H/*c*-Si гетеропереходов позволяют провести количественную оценку плотности состояний и их влияния на эффективность работы СЭ. Проведенный расчет V_{OC} от D_{it} для СЭ, сформированных на основе подложек Si *p*- и *n*-типа проводимости (рис. 11) демонстрирует преимущество подложек *n*-типа, заключающееся в меньшей чувствительности к D_{it} . Преимущество носит фундаментальный характер и связано с соотношением значений разрывов зон, сформированных на основе подложек Si *p*- и *n*-типа проводимости.

Большее значение ΔE_V обуславливает меньший уровень рекомбинации на границе (*p*)a-S:H/(*n*)Si по

сравнению с границей (n)a-Si:H/(p)Si при одинаковых значениях D_{it} и позволяют достигать выигрыша КПД до 2%. Результаты, достигнутые на международном уровне, однозначно демонстрируют лучшие показатели для подложки n-типа по сравнению с подложкой p-типа. Однако эта разница связана не только с особенностями зонной структуры, но с разницей во влиянии условий обработки поверхности для двух типов проводимости Si подложки.

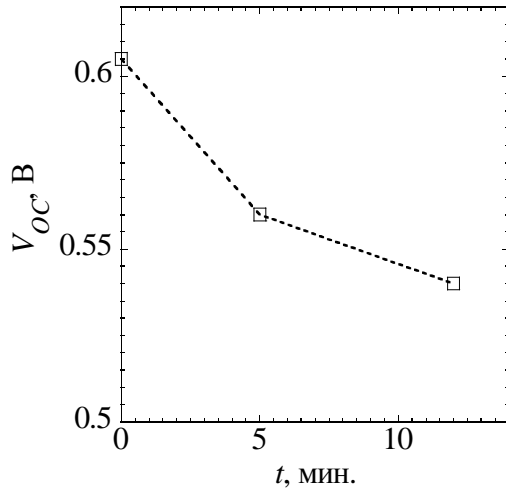


Рис. 12. Зависимость V_{oc} от времени обработки в H_2 плазме поверхности (p)c-Si перед нанесением (n)a-Si:H.

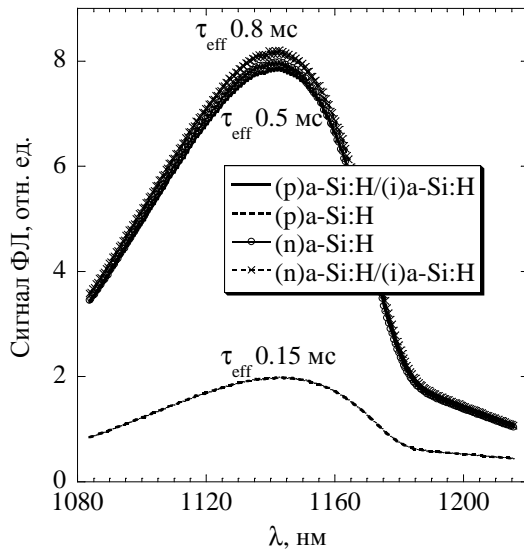


Рис. 13. Спектры фотолюминесценции для подложек Si с слоями a-Si:H p- и n-типов проводимости с введением нелегированного слоя и без.

Проведенные исследования влияния условий обработки поверхности кремниевой подложки позволили выявить различия в технологическом подходе к формированию СЭ на Si подложках p- и n-типа проводимости. Показано, что обработка в H_2 плазме поверхности Si p-типа проводимости (легированного бором) ухудшает характеристики (n)a-Si:H/(p)c-Si СЭ за счет пассивации легирующей примеси бора при диффузии водорода в приповерхностную область Si (рис. 12). Глубина диффузии водорода, согласно вольт-фарадным измерениям, превышает 2 мкм, т. е. выходит далеко за пределы области пространственного заряда в состоянии равновесия (порядка 1 мкм для $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Необходимо учитывать, что атомарный водород образуется при разложении SiH_4 в плазме тлеющего разряда и, следовательно, всегда присутствует во время осаждения пленок a-Si:H.

Согласно [1] для снижения плотности поверхностных состояний на границе a-Si:H/c-Si необходимо введение тонкого нелегированного слоя (i)a-Si:H между подложкой c-Si и легированными слоями a-Si:H. Проведенные исследования влияния слоя (i)a-Si:H на свойства границ раздела

показали, что введение нелегированного слоя a-Si:H между легированными бором слоями a-Si:H и подложкой Si n-типа действительно позволяет повы-

сильное эффективное время жизни неосновных носителей заряда в Si (рис. 13), приводя к повышению КПД на 2 %. Однако при легировании a-Si:H фосфором наличие тонкого промежуточного нелегированного слоя a-Si:H не оказывает заметного влияния на свойства границ раздела и, следовательно, на характеристики СЭ.

В главе 3 рассмотрены свойства гетерограниц эпитаксиальных слоев фотопреобразовательных структур на соединений АШВV, выращенных в условиях максимального согласования по параметру кристаллической решетки. В работе проводятся исследования структур, выращенных в лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. Иоффе РАН методом газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ).

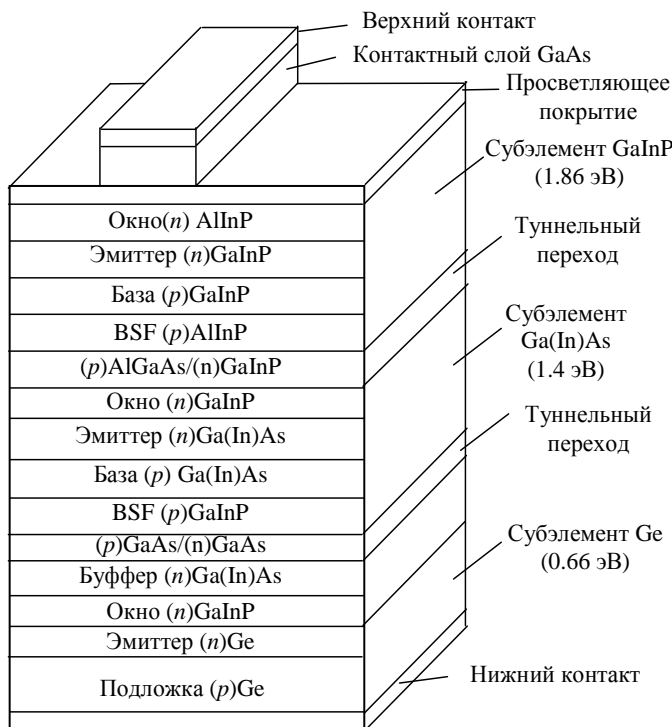


Рис. 14. Схематическое изображение варианта конструкции GaInP/GaAs/Ge СЭ

Многoperеходные солнечные элементы на основе соединений АШВV демонстрируют КПД более 40 % при преобразовании концентрированного солнечного излучения. Использование нескольких переходов с различной шириной запрещенной зоны позволяет минимизировать потери на термолизацию носителей заряда. Однако при выборе материалов для формирования фотоактивных переходов необходимо руководствоваться не только соображением оптимальной величины ширины запрещенной зоны, но и требованием по максимальному соответствию постоянной кристаллической решетки. Одним из наиболее оптимальных является сочетание материалов $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ ($E_g = 1.9$ эВ), GaAs ($E_g = 1.42$ эВ) и Ge ($E_g = 0.66$ эВ). Хотя с точки зрения величин E_g данные материалы не дают максимального значения КПД, равенство постоянных решеток позволяет получать структуры каскадных GaInP/GaAs/Ge фотопреобразователей (а точнее, GaInP/GaInAs/Ge СЭ с концентрацией индия порядка 1 % в среднем переходе), характеризующиеся высоким кристаллическим совершенством, за один процесс, поэтому они явля-

ются в настоящий момент основой массового производства высокоэффективных фотопреобразователей. Однако конструкция трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ содержит большое количество слоев с различным составом, что обуславливает исключительную роль границ раздела в данных структурах (рис. 14).

Если свойства границ раздела гетеропереходов на основе GaAs и тройных соединений AlGaAs, применяемые в первых СЭ на основе соединений АШВV, исследованы в достаточно полной мере, то гетеропереходы на основе тройных и четверных соединений фосфидов третьей группы (GaInP, AlInP и AlGaInP), применяющиеся при изготовлении многопереходных СЭ сравнительно недавно, требуют дальнейших исследований. Примером является проблема формирования верхнего перехода $p-n$ полярности на основе AlInP/GaInP гетероструктур, для которого характерно наличие изгиба на нагрузочной ВАХ в области V_{OC} , приводящего к уменьшению FF , а, следовательно, и КПД СЭ [3, 4]. Характерные экспериментальные ВАХ для изготовленных на подложках GaAs p - и n -типа проводимости солнечных элементов, представлены на рис. 15а. Наибольшее значение J_{SC} , V_{OC} , и FF , приводящие к наибольшему КПД получены для $n-p$ -структур с (n) AlInP окном. Структура $p-n$ с окном (p) AlInP обладает меньшими значениями J_{SC} и V_{OC} , но главная ее особенность заключается в том, что на вольт-амперных характеристиках наблюдается четко выраженный перегиб, который приводит к значительному падению FF (0.75) и, следовательно, КПД. Эта особенность AlInP/GaInP служит существенным препятствием для использования многопереходных СЭ $p-n$ полярности при преобразовании концентрированного излучения.

Проведенный анализ влияния D_{it} на характеристики СЭ на основе GaInP показал, что поверхностные состояния на границе раздела «контактный слой (GaAs)/широкозонное окно (AlInP, AlGaAs)» не оказывают влияния на характеристики СЭ. Однако поверхностные состояния на границе раздела «широкозонное окно (AlInP, AlGaAs)/ эмиттер (GaInP)» могут оказывать существенное влияние на параметры СЭ. Рост D_{it} на этом гетероинтерфейсе приводит к падению тока J_{SC} и V_{OC} , и как следствие, к снижению КПД. Для гетероинтерфейса AlInP/GaInP влияние поверхностных состояний сказывается при $D_{it} > 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, в то время как для границы AlGaAs/GaInP резкое уменьшение J_{SC} и V_{OC} начинается уже при $D_{it} > 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, что обусловлено сильным изгибом зон, приводящим к потоку неосновных носителей заряда к этой гетерогранице.

Для экспериментального определения значения D_{it} на границе раздела широкозонное окно/эмиттер (p-AlInP/p-GaInP) была разработана методика, основанная на изменении изгиба зон в приповерхностной области за счет вариации потока внешней подсветки. Проведенная оценка D_{it} на границе (p)AlInP/(p)GaInP дает значение $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ (при $\Delta E_c = 0.24 \text{ эВ}$ и $\sigma_n = 10^{-14} \text{ см}^2$), что указывает на слабое влияние плотности поверхностных состояний на свойства СЭ на основе гетероперехода AlInP/GaInP

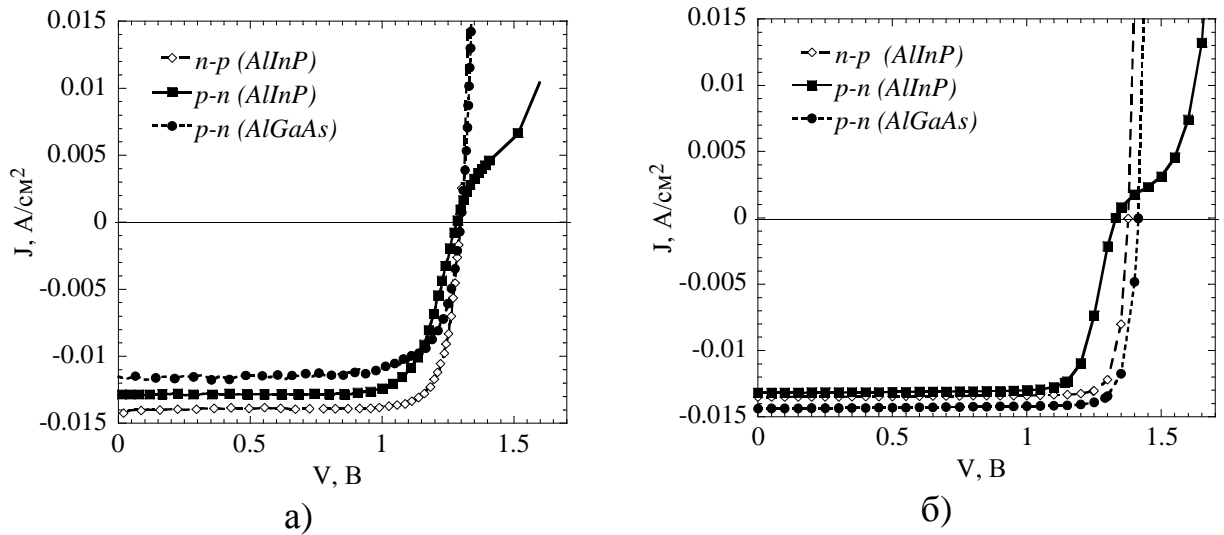


Рис. 15. Характерные экспериментальные (а) и расчетные (б) ВАХ при освещении AM1.5D для трех типов изготовленных GaInP солнечных элементов: n - p и p - n -структуры с окном AlInP, p - n -структура с окном $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$.

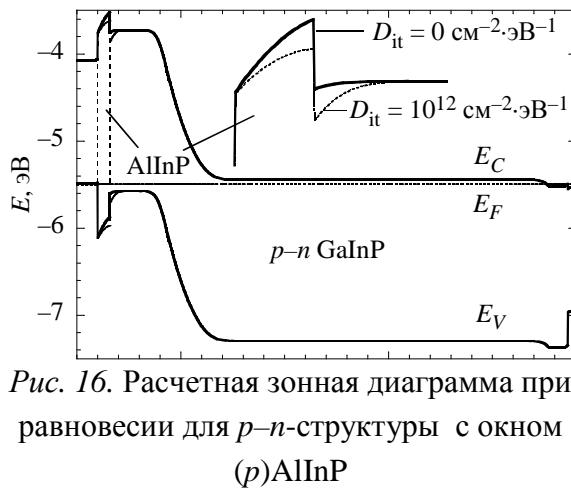


Рис. 16. Расчетная зонная диаграмма при равновесии для p - n -структуры с окном (p)AlInP

Теоретический анализ экспериментальных ВАХ (рис. 15б) показал, что особенности поведения ВАХ связаны с различиями в зонных диаграммах для структур. Большая величина разрыва валентных зон (ΔE_V) на границе p-GaAs/p-AlInP (контактный слой/широкозонное окно) p - n структуры приводит к формированию паразитного потенциального барьера

(порядка 0.54 эВ) для основных носителей заряда (дырок), движущихся от эмиттера к переднему контакту (рис. 16). Этот барьер ограничивает транспорт дырок и приводит к образованию перегиба на ВАХ при освещении.

Для независимого экспериментального подтверждения выдвинутого предположения была разработана методика определения эффективной высоты потенциального барьера для основных носителей заряда на основе результатов измерений спектров полной проводимости. Упрощенный подход к ана-

лизу спектров полной проводимости с помощью эквивалентной схемы, предполагая, что в изотипном гетеропереходе транспорт носителей главным образом определяется переносом через потенциальный барьер и проводимость может быть выражена исходя из приближения термоэлектронной эмиссии, демонстрирует возможность определения эффективной высоты потенциального барьера по положению максимумов зависимостей $G_p/\omega(T)$, соответствующих точке перегиба $C_p(T)$. Экспериментально с помощью спектроскопии полной проводимости было подтверждено существование и определена высота эффективного потенциального барьера для основных носителей заряда на границе раздела p-GaAs/p-AlInP, равная 0.6 ± 0.05 эВ, что соответствует значению, полученному в результате моделирования и находится в хорошем соответствии со значением ΔE_V на границе раздела GaAs/AlInP, находящимся, согласно [5], [6], в диапазоне от 0.54 до 0.63 эВ.

Был предложен способ избежать ограничения применения AlInP/GaInP структур $p-n$ полярности для преобразования концентрированного излучения за счет использования двухслойного широкозонного окна, состоящего из слоев $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ и $(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P$. Данная комбинация позволяет с одной стороны снизить барьер для дырок, а с другой стороны уменьшить влияние плотности поверхностных состояний на границе раздела широкозонное окно/эмиттер. Экспериментально с помощью спектроскопии полной проводимости, а также ВАХ продемонстрировано, что высота эффективного потенциального барьера с использованием двухслойного широкозонного окна, состоящего из слоев $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ и $(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.51}In_{0.49}P$, равна 0.2 ± 0.07 эВ и достаточно мала для эффективного транспорта основных носителей заряда.

Рассмотренная проблема формирования паразитного потенциального барьера для основных носителей заряда за счет разрывов валентной зоны между фосфидами и арсенидами металлов III-группы p -типа проводимости может быть представлена в более общем виде. Было продемонстрировано возникновение паразитного барьера на границе раздела изотипных гетеропереходов AlGaInP/ $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ для среднего перехода на основе GaAs на границе тыльный потенциальный барьер/ p -слой туннельного диода. Наличие потенциального барьера было подтверждено экспериментально с помощью измерений спектроскопии полной проводимости и вольтамперных характеристик в условиях освещения при низкой температуре (100 К). Выявленный потенциальный барьер приводил к появлению перегиба на нагрузочной ВАХ структур и уменьшению ее КПД (рис. 17а). Предложенный способ уменьшить высоту потенциального барьера для основных носителей заряда за счет

использования в качестве тыльного потенциального барьера слой $p\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ позволил избавиться от перегиба на нагрузочной вольтамперной характеристике (рис. 16б) и повысить величину КПД трехпереходного GaInP/GaAs/Ge солнечного элемента с 33.6 % до 34.6 %.

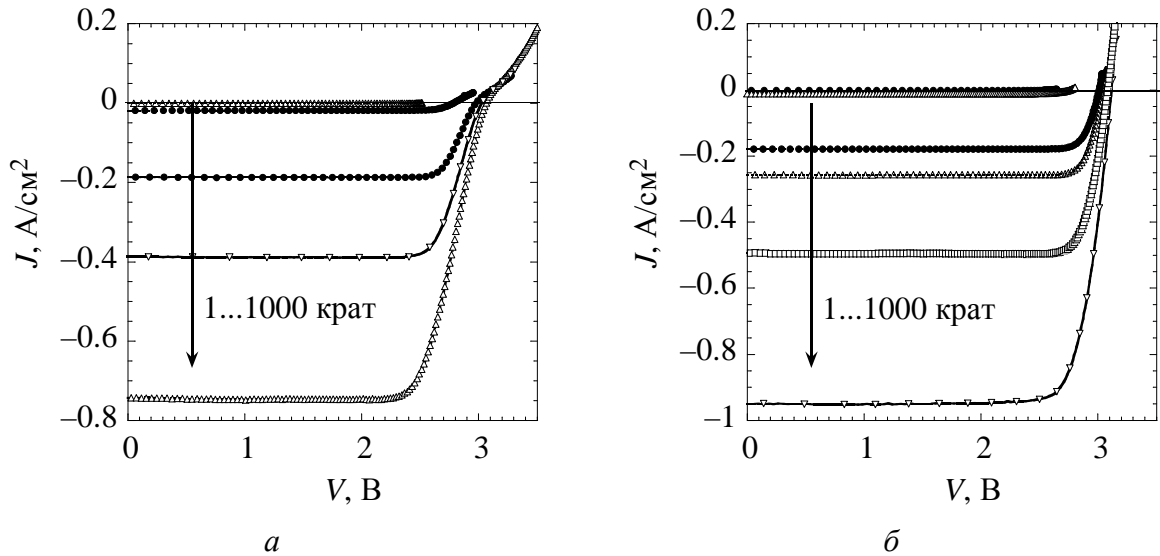


Рис. 17. Экспериментальные ВАХ при разной интенсивности концентрированного солнечного освещения трехпереходных GaInP/GaAs/Ge СЭ в которых GaAs-переход выполнен с BSF-слоями AlGaInP (а) и AlGaAs (б)

С целью определения дальнейших путей повышения КПД многопереходных СЭ был проведен теоретический анализ потенциальных преимуществ использования анизотипных гетеропереходов. Был продемонстрирован способ снижения рекомбинационных потерь в слое эмиттера для среднего перехода на основе GaAs, используя слой широкозонного эмиттера (GaInP, AlInP или AlGaAs). Снижение рекомбинационных потерь достигается за счет уменьшения концентрации неосновных носителей заряда поскольку поглощение в широкозонном слое минимально, а диффузия неосновных носителей заряда ограничена потенциальным барьером, сформированным за счет разрывов зон. В случае, когда характеристики СЭ на основе GaAs гомоперехода ограничены рекомбинацией в $n+$ GaAs эмиттере, предложенная конструкция может позволить увеличить напряжение холостого хода и КПД. Анализ влияния плотности D_{it} на границе раздела широкозонный эмиттер/база на характеристики СЭ показал, что эффективность работы $(n)\text{AlInP}/(p)\text{GaAs}$ и $(n)\text{AlGaAs}/(p)\text{GaAs}$ гетеропереходов не зависит от D_{it} вплоть до $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ ($\sigma_n = 10^{-14} \text{ см}^2$) демонстрируя высокий потенциал этих гетеропереходов для применения в многопереходных солнечных элементах. В то время как $(n)\text{GaInP}/(p)\text{GaAs}$ гетеропереходы обладают сильной чувствительностью к плотности поверхностных состояний, что может ограничивать их применение.

ние для солнечных элементов. Предложенный принцип использования анизотипных гетеропереходов может быть применен для всех субэлементов многопереходных СЭ за исключением верхнего перехода

В главе 4 рассмотрены свойства границ раздела между соединениями АШВV и IV группы на примере GaInP/Ge гетероперехода, используемого в качестве нижнего перехода трехпереходных GaInP/GaAs/Ge СЭ. В случае нижнего Ge-субэлемента эпитаксиальные слои АШВV, выращенные на Ge-

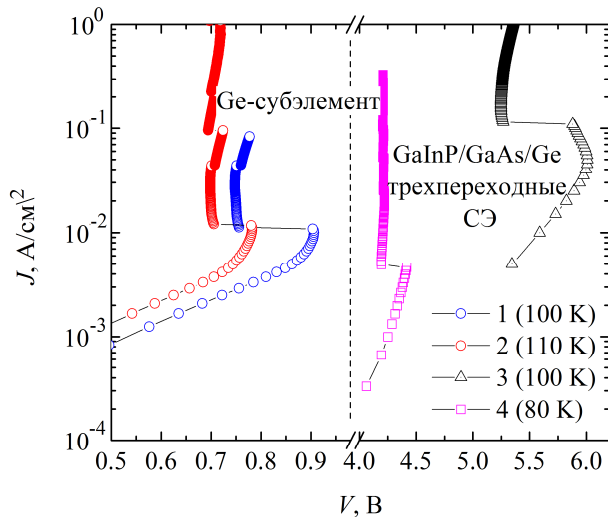


Рис. 18. Темновые ВАХ при различных температурах для «субэлемента» при 100 К (1) и 110 К (2); для GaInP/GaAs/Ge трехпереходного СЭ, выращенного на том же оборудовании (3), для коммерческого СЭ другого производителя (4)

подложке (обычно с помощью МОС ГФЭ), используются как источник легирующей примеси для формирования $p-n$ -перехода в Ge, а также как широкозонное окно для Ge-субэлемента. Следовательно, в дополнение к $p-n$ -переходу в Ge, граница раздела между соединениями АШВV и Ge также влияет на свойства транспорта носителей заряда. Электронные свойства границ раздела между соединениями АШВV и IV группы еще не достаточно глубоко изучены, особенно в случае, когда при формировании этой гетерограницы происходит взаимная диффузия компонентов, составляющих полупроводниковые слои. Явления на границах раздела могут сильно влиять на перенос носителей в Ge переходе, также как и на весь многопереходный СЭ.

Проведенные исследования свойств границ раздела $(n)\text{GaInP}/(n-p)\text{Ge}$ гетеропереходов показали, что на границе раздела $(n)\text{GaInP}/(n)\text{Ge}$ возникает паразитный потенциальный барьер для основных носителей заряда. Этот потенциальный барьер приводит к возникновению S -образности ВАХ при низких температурах, что также было обнаружено для трехпереходных СЭ, изготовленных на разных установках МОС ГФЭ (рис. 18).

Теоретический расчет, проведенный для модели с потенциальным барьером (рис. 19), позволяет в полной мере описать особенности экспериментальных ВАХ. Наличие паразитного потенциального барьера на гетерогранице $(n)\text{GaInP}/(n)\text{Ge}$ было подтверждено с помощью двух независимых измерений: спектроскопии полной проводимости и $C-V$ профилирования. Оце-

полнение к $p-n$ -переходу в Ge, граница раздела между соединениями АШВV и Ge также влияет на свойства транспорта носителей заряда. Электронные свойства границ раздела между соединениями АШВV и IV группы еще не достаточно глубоко изучены, особенно в случае, когда при формировании этой гетерограницы происходит взаимная

ночные значения эффективной высоты барьера и его ширины, полученные с помощью этих методов, находятся в хорошем соответствии и составляют 0.12 ± 0.05 эВ и 45-55 нм, соответственно.

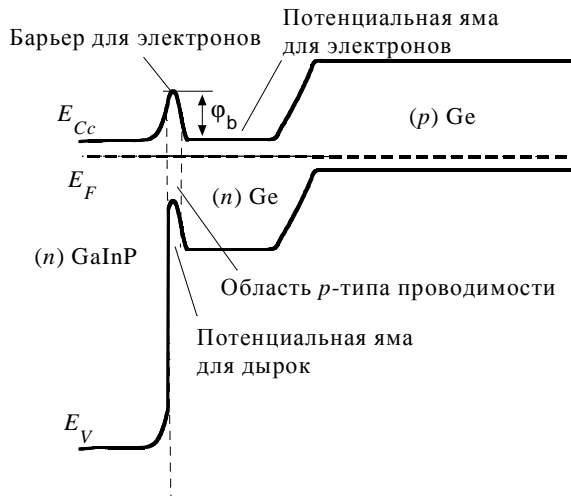


Рис. 19. Схематическое изображение зонной диаграммы, предполагаемое для структуры «субэлементов»

($\sim 5.9 \cdot 10^{-13}$ см²·с⁻¹) [7], что обуславливает более глубокую диффузию фосфора в Ge подложку. Однако предел растворимости Ga в Ge ($4.5 \cdot 10^{20}$ см⁻³) существенно выше по сравнению с фосфором ($5 \cdot 10^{19}$ см⁻³) [8], [9]. Следовательно, возникает ситуация, когда вблизи границы раздела GaInP/Ge локальная концентрация атомов Ga, диффундировавших в Ge, существенно превосходит концентрацию P в этой области, приводя к узкому слою, в котором легирование p-типа превалирует. Инверсия типа проводимости в этой области вблизи границы раздела создает потенциальный барьер для электронов, который оказывает влияние на транспорт носителей в Ge СЭ. Данное явление необходимо принимать во внимание при рассмотрении более широкого класса материалов, по крайней мере, при исследовании свойств границ раздела между соединениям АШВV и элементами IV группы.

Основные выводы

1. Показано, что использование классической полупроводниковой модели гетеропереходов с постоянным распределением плотности поверхностных состояний гетероперехода позволяет достоверно описать фотоэлектрические и электрофизические свойств фотопреобразовательных гетероструктур на основе a-Si:H и кристаллического кремния в которых основной вклад в процесс фотоэлектрического преобразования происходит за счет генерации в кристаллическом кремнии.

Природа происхождения обнаруженного барьера связывается с одновременной диффузией элементов V-ой (фосфора) и III-ей (галлия и индия) группы в подложку Ge. Поскольку Ga и In являются атомами акцепторной примеси для Ge, они могут формировать область p-типа. При температуре роста коэффициент диффузии фосфора ($\sim 2.4 \cdot 10^{-11}$ см²·с⁻¹) гораздо больше по сравнению с галлием ($\sim 3.5 \cdot 10^{-13}$ см²·с⁻¹) и индием

2. Разработан комплекс методов характеристики свойств границ раздела гетеропереходов a-Si:H/c-Si используя методы емкостной спектроскопии.
3. Показано, что при плотности поверхностных состояний выше $10^{13} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ на границе раздела происходит смещение положения уровня Ферми к середине запрещенной зоны. При этом на спектрах полной проводимости наблюдается отклик плотности поверхностных состояний (ПС), обусловленный обменом дырок между ПС и (p)c-Si в случае (n)a-Si:H/(p)c-Si гетероперехода и обменом электронов между ПС и (n)c-Si в случае (p)a-Si:H/(n)c-Si. При плотности ПС, находящейся на уровне $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$, уровень Ферми на границе раздела смещается в сторону зоны проводимости в случае (n)a-Si:H и в сторону валентной зоны в случае (p)a-Si:H. На спектрах полной проводимости наблюдается отклик, связанный с обменом электронов между ПС и (n)a-Si:H в случае (n)a-Si:H/(p)c-Si и обменом дырок между ПС и (p)a-Si:H в случае (p)a-Si:H/(n)c-Si. При плотности ПС меньше $10^{12} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ положение уровня Ферми не зависит от ПС, при этом также не наблюдается отклика ПС на спектрах полной проводимости.
4. Обнаружено, что наличие слоя с инверсией типа проводимости в c-Si на границе раздела с a-Si:H, подтвержденное независимыми измерениями, делает принципиально невозможным использование измерений вольт-фарадных характеристик для определения диффузионного потенциала в кристаллическом кремнии, и следовательно, определения значения разрывов зон на границе a-Si:H/ c-Si.
5. Продемонстрированы различия в зонной структуре на границе раздела гетеропереходов (p)a-Si:H/(n)c-Si и (n)a-Si:H/(p)c-Si, приводящие к большему изгибу зон в (n)c-Si и, следовательно, к более слабой зависимости напряжения холостого хода от плотности поверхностных состояний для (p)a-Si:H/(n)c-Si гетероструктур.
6. Проведенные исследования показали, что плотность поверхностных состояний на границе раздела эпитаксиальных слоев соединений АПВV, согласованных по параметру решетки, не превышает $10^{10} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ и в большинстве случаев не оказывает влияния на фотоэлектрические свойства фотопреобразовательных структур. Показано, что рекомбинационные процессы на границе раздела оказывают влияние на эффективность преобразования гетероструктур только в случае сильного изгиба зон, приводящего к потоку неосновных носителей заряда к этой гетерогранице.

7. На основе измерения спектроскопии полной проводимости разработан новый метод определения потенциальных барьеров для основных носителей заряда в фотопреобразовательных гетероструктурах.
8. Продемонстрировано, что эффективность работы фотопреобразовательных структур на основе соединений АІІВV, согласованных по параметру решетки, существенно зависит от наличия паразитных потенциальных барьеров для основных носителей заряда, образующихся за счет разрывов зон на границах раздела.
9. Показано, что электрические и фотоэлектрические свойства гетероструктур на основе соединений элементов ІІІ и V групп и полупроводниками IV группы во многом определяются процессами взаимной диффузии и на границе раздела. Продемонстрирована необходимость учитывать не только коэффициенты диффузии, определяющие глубину диффузии примесей, но и пределы растворимости, обуславливающие концентрацию примеси на границе раздела.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Electroluminescence from amorphous-crystalline silicon heterostructures / M. S. Bresler, O.B. Gusev, E.I. Terukov, W. Fuhs, A. Froitzheim, A. S. Gudovskikh, J. P. Kleider, G. Weiser // Journal of Non-Crystalline Solids. 2004. Vol. 338-340, P. 440-443.
2. Investigation of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells interface properties / A.S. Gudovskikh, J.P. Kleider, A. Froitzheim, W. Fuhs, E.I. Terukov // Thin Solid Films. 2004. Vol. 451-452. P. 345-349.
3. TEM Study of the Formation and Modification of Nanocrystalline Si Inclusions in a-Si:H Films / V. P. Afanasiev, A. S. Gudovskikh, A. Z. Kazak-Kazakevich, A. P. Sazanov, I. N. Trapeznikova, and E. I. Terukov // Semiconductors. 2004. Vol. 38, P. 221-224.
4. Investigation of nc-Si inclusions behaviour in multilayer a-Si:H films obtained by layer by layer technique / A.S. Gudovskikh, J.P. Kleider, V.P. Afanasjev, A.Z. Kazak-Kazakevich, A.P. Sazanov // Journal of Non-Crystalline Solids. 2004. Vol. 338-340, P. 135-138.
5. High-field transport in amorphous carbon and carbon nitride films / Sushil Kumar, C. Godet, A. Gudovskikh, J.P. Kleider, G. Adamopoulos and V. Chu // Journal of Non-Crystalline Solids. 2004. Vol. 338-340, P. 349-352.
6. Gudovskikh A.S., Kleider J.P., Terukov E.I. Characterization of a-Si:H/c-Si interface by admittance spectroscopy // Semiconductors. 2005. Vol. 39, P. 904-909.

7. Interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells from admittance spectroscopy / A. S. Gudovskikh, J. P. Kleider, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, Y. Veschetti, J.-C.Muller, P.-J. Ribeyron, E. Rolland // *Thin Solid Films*. 2006. Vol. 511-512, P. 385-389.
8. Optimisation of amorphous and polymorphous thin silicon layers for formation of front-side heterojunction solar cells on p-type crystalline silicon substrates / Y. Veschetti, J.-C.Muller, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, A. S. Gudovskikh, J.-P. Kleider, P.-J. Ribeyron, E. Rolland // *Thin Solid Films*. 2006. Vol. 511-512, P. 543-547.
9. Gudovskikh A. S., Kleider J. P., Stangl R. New approach to capacitance spectroscopy for interface characterization of a-Si:H/c-Si heterojunctions // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. Vol. 352, P. 1213-1216.
10. About the efficiency limits in HIT structures / J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, A.S. Gudovskikh, J.P. Kleider, Y. Veschetti, J.C. Muller, P.J. Ribeyron // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. Vol. 352, P. 1928-1932.
11. Kleider J. P., Gudovskikh A. S., Godet C. DC and AC hopping transport in metal / amorphous carbon nitride / metal devices // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. Vol. 352, P. 1323-1326.
12. Gudovskikh A.S., Kleider J.P. Capacitance spectroscopy of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells at forward bias and under illumination // *Appl. Phys. Letter*. 2007. Vol. 90, P. 034104.
13. Determination of band offsets in a-S:H/c-Si heterojunctions from capacitance-voltage measurements: capabilities and limits / A.S. Gudovskikh, S. Ibrahim, J.-P. Kleider, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, Y. Veschetti, P.-J. Ribeyron // *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, P. 7481-7485.
14. Godet C., Kleider J.P., Gudovskikh A.S., Frequency scaling of ac hopping transport in amorphous carbon nitride // *Diamond & Related Materials*. 2007. Vol. 16, P. 1799–1805.
15. Godet C., Kleider J.P., Gudovskikh A.S., Scaling analysis of field-enhanced bandtail hopping transport in amorphous carbon nitride // *Phys. Stat. Sol. (b)*. 2007. Vol. 244, P. 2081-2099.
16. High interfacial conductivity at amorphous silicon/crystalline silicon heterojunctions / J.P. Kleider, M. Soro, R. Chouffot, A.S. Gudovskikh, P. Roca i Cabarrocas, J. Damon-Lacoste, D. Eon, P-J. Ribeyron // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008. Vol. 354/19-25, P. 2641-2645.
17. Kleider J. P. , Gudovskikh A.S., Roca i Cabarrocas P. Determination of the conduction band offset between hydrogenated amorphous silicon and crystalline silicon from surface inversion layer conductance measurements // *Appl. Phys. Lett*. 2008. Vol. 92, P. 162101.

18. Comparison of photoluminescence and capacitance spectroscopies as efficient tools for interface characterisation of heterojunction solar cells / R. Chouffot, S. Ibrahim, R. Brüggemann, A.S. Gudovskikh, J.P. Kleider, M. Scherff, W.R. Fahrner, P. Roca i Cabarrocas, D. Eon, P.-J. Ribeyron // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008. Vol. 354/19-25, P. 2416-2420.
19. Numerical modelling of GaInP solar cells with AlInP and AlGaAs windows / A.S. Gudovskikh, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, P. 6739-6743.
20. New method for interface characterisation in heterojunction solar cells based on diffusion capacitance measurements / A.S. Gudovskikh, R. Chouffot, J. P. Kleider, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, J. Damon-Lacoste, D. Eon, P. Roca i Cabarrocas, P.-J. Ribeyron // *Thin Solid Films*. 2008. Vol. 516, P. 6786-6790.
21. Godet C., Kleider J.P., Gudovskikh A.S., Electric field-controlled sign of the capacitance in metal-carbon nitride-metal devices // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008. Vol. 354/19-25, P. 2637-2640.
22. Electronic and structural properties of the amorphous/crystalline silicon interface / J.P. Kleider, R. Chouffot, A.S. Gudovskikh, P. Roca i Cabarrocas, M. Labrune, P.-J. Ribeyron and R. Brüggemann // *Thin Solid Films*. 2009. Vol. 517 (23), P. 6386-6391.
23. Свойства границ раздела в солнечных элементах на основе GaInP / А.С. Гудовских, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Андреев // *ФТП*. 2009. Т. 43, С. 1403-1408.
24. III-phosphides heterojunction solar cell interface properties from admittance spectroscopy / A. S. Gudovskikh, J. P. Kleider, R. Chouffot, N. A. Kalyuzhnyy, S. A. Mintairov and V. M. Lantratov // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42, P. 165307.
25. Band structure at heterojunction interfaces of GaInP solar cells / A.S. Gudovskikh, J. P. Kleider, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010. Vol. 94, P. 1953-1958.
26. Observation by conductive-probe atomic force microscopy of strongly inverted surface layers at the hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon heterojunctions / O. A. Maslova, J. Alvarez, E. V. Gushina, W. Favre, M. E. Gueunier-Farret, A. S. Gudovskikh, A. V. Ankudinov, E. I. Terukov, and J. P. Kleider // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97, P. 252110.
27. Study of the interfacial properties of amorphous silicon/n-type crystalline silicon heterojunction through static planar conductance measurements / W. Favre, M. Labrune, F. Dadouche, A. S. Gudovskikh, P. Roca i Cabarrocas, and J. P. Kleider // *Phys. Status Solidi C*. 2010. Vol. 7, No. 3–4, P. 1037– 1040.
28. Германиевые субэлементы для многопереходных фотоэлектрических преобразователей GaInP/GaInAs/Ge / Н.А. Калюжный, А.С. Гудовских, В.В.

- Евструпов, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев // ФТП. 2010. Т. 44, Вып. 11, С. 1568-1576.
29. Characterization of silicon heterojunctions for solar cells / J.-P. Kleider, J. Alvarez, A.V. Ankudinov, A.S. Gudovskikh, E.V. Gushchina, M. Labrune, O. A. Maslova, W. Favre, M.-E. Gueunier-Farret, P. Roca i Cabarrocas and E.I. Terukov // *Nanoscale Research Letters*. 2011. Vol. 6, P. 152.
30. Characterization of GaInP/Ge heterostructure solar cells by capacitance measurements at forward bias under illumination / A. S. Gudovskikh, K.S. Zelentsov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, J.P. Kleider // *Energy Procedia*. 2011. Vol. 3, P. 76–83.
31. Interface properties of GaInP/Ge heterostructure subcells of multijunction solar cells / A.S. Gudovskikh, K. S. Zelentsov, N. A. Kalyuzhnyy, V. V. Evstropov, V. M. Lantratov, S. A. Mintairov // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. Vol. 45, P. 495305
32. Space charge capacitance spectroscopy in amorphous silicon Schottky diodes: Theory, modeling, and experiments / O.A. Maslova, M.E. Gueunier-Farret, J. Alvarez, A.S. Gudovskikh, E.I. Terukov, J.P. Kleider // *Journal of Non-crystalline Solids*. 2012. Vol 358, P. 2007–2010.
33. Modeling of capacitance spectroscopy of (p) a-Si:H/(n) c-Si interfaces / O. Maslova, A. Brézard-Oudot, W. Favre, J. Alvarez, A. Gudovskikh, E. Terukov, J.P. Kleider // *Phys. Status Solidi C*. 2012. Vol. 9, No. 6, P. 1481– 1483.
34. Kudryashov D., Gudovskikh A., Zelentsov K. Indium Tin Oxide Films Grown at Room Temperature by RF-Magnetron Sputtering in Oxygen-Free Environment // *Solid State Phenomena*. 2013. Vol. 200, P. 10-13.
35. Морозов И.А., Гудовских А.С. Исследование свойств границ раздела солнечных элементов на основе GaInP с помощью измерения спектральных характеристик с варьируемым потоком излучения // ФТП. 2014. Т. 48, Вып. 4, С. 475-480
36. Characterization of the manufacturing processes to grow triple-junction solar cells / N. A. Kalyuzhnyy, V. V. Evstropov, V. M. Lantratov, S. A. Mintairov, M. A. Mintairov, A. S. Gudovskikh, A. Luque and V. M. Andreev // *International Journal of Photoenergy*. 2014. V. 2014, P. 836284
37. Temperature and bias dependence of hydrogenated amorphous silicon-crystalline silicon heterojunction capacitance: The link to band bending and band offsets / O. Maslova, A. Brézard-Oudot, M.E. Gueunier-Farret, J. Alvarez, W. Favre, D. Muñoz, A.S. Gudovskikh, J.-P. Kleider // *Canadian Journal of Physics*. 2014. Vol. 92, P. 690-695.

Монографии и главы в монографиях

Гудовских А. С. Границы раздела в солнечных элементах на основе гетероструктур СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 160 с.

Gudovskikh A.S., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Lantratov V.M. Interfaces in III-V High Efficiency Solar Cells // Wang X., Wang Z. M. (Eds.) High-Efficiency Solar Cells: Physics, Materials, and Devices, Springer Series in Materials Science Vol. 190, 2014, pp 545-570

Афанасьев В.П., Гудовских А.С., Сазанов А.П. Циклическое плазмохимическое осаждение наноструктурированных пленок аморфного гидрогенизированного кремния// Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы/ под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. – М. Физматлит, 2006. С. 250-283

Прочие публикации

1. Interface properties of a-Si:H/c-Si heterojunctions investigated by admittance spectroscopy / A.S. Gudovskikh, J.-P. Kleider, R. Stangl, M. Schmidt, W. Fuhs Proc. of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France. 2004. P. 697-700.

2. Monitoring of the polymorph/silicon interface properties in the HIT solar cell by surface photovoltage technique in expanded spectral region / V. Švrček, Y. Veschetti, J.-C. Muller, A. S. Gudovskikh, J.-P. Kleider, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, C. Jaussaud, P.-J. Ribeyron // Proc. of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France. 2004, P. 1445-1448.

3. Plasma treatments of the interface in n-type amorphous hydrogenated silicon/p-type crystalline silicon heterojunction solar cells / J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, A.S. Gudovskikh, J.-P. Kleider, C. Jaussaud, P.-J. Ribeyron, V. Švrček, Y. Veschetti, J.C. Muller // Proc. of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France. 2004, P. 1453-1456.

4. Improvement of polymorphous/crystalline heterojunction solar cells using low temperature screen-printed pastes on $5 \times 5 \text{ cm}^2$ / Y. Veschetti, J.-C. Muller, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, A. S. Gudovskikh, J.-P. Kleider, P.-J. Ribeyron, E. Rolland // Proc. of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, Florida, January 2005.

5. Polymorphous/crystalline heterojunction solar cells with low cost industrial process on p type monocrystalline silicon / P.-J. Ribeyron, Y. Veschetti, J.-C. Muller, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, A. S. Gudovskikh, J.-P. Kleider // Proc. of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain. 2005.

6. Polymorphous/crystalline single heterojunction and double heterojunction solar cells optimisation on p type monocrystalline silicon / P.-J. Ribeyron, A.Vandeneynde, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, R.Chouffot, A. S. Gudovskikh, J.-P. Kleider // Proc. of the 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany. 2006. P. 926.
7. Kleider J.P., Gudovskikh A.S. Characterization of amorphous/crystalline silicon interfaces from electrical measurements // MRS Spring Meeting, San Francisco, 24-28 March 2008, Proc. Vol. 1066, P. 75-86
8. Study of GaInP heterojunction solar cell interface properties by admittance spectroscopy / A.S. Gudovskikh, J. P. Kleider, R. Chouffot, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov // Proc. of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain. 2008, P. 358-363.
9. Anisotype GaAs based heterojunctions for III-V multijunction solar cells / A.S. Gudovskikh, K.S. Zelentsov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov // Proc. of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valence, Spain. 2010, P. 472-476.
10. Current flow and efficiency of Ge p-n junctions in triple-junction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells for space applications / N.A. Kalyuzhnyy, A.S. Gudovskikh, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, N.Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev // Proc. of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valence, Spain. 2010, P. 865-871.
11. Kudryashov D., Gudovskikh A. and Zelentsov K. Low temperature growth of ITO transparent conductive oxide layers in oxygen-free environment by RF magnetron sputtering //J. Phys.: Conf. Ser. 2013. 461 012021

Патенты

Патент № WO 2008/000949 A1 «Adjustable capacity device and process thereof» J.P. Kleider, C. Godet, A.S. Gudovskikh Приоритет 30.06.2006 Зарегистрирован 03.01.2008

Патент № 2407108 «Концентраторный солнечный элемент». Авторы: Терра А.Р. Андреев В.М., Гудовских А.С., Румянцев В.Д., Ланtratov В.М. Приоритет 07.04.2008 Зарегистрирован 20.12.2010

Патент № 2436191 «Каскадный фотоэлектрический преобразователь с наноструктурным просветляющим покрытием» Андреев В.М., Малевская А.В., Гудовских А.С., Задиранов Ю.М. Приоритет 28.06.2010 Зарегистрирован 10.12.2011

Патент № 24442242 «Многoperеходный преобразователь». Авторы: Андреев В.М., Калюжный Н.А., Ланtratov В.М., Минтаиров С.А., Гудовских А.С.,

Заявка на патент № 2010143070. Приоритет 20.10.2010 Зарегистрирован 10.02.2012.

Цитированная литература

- [1] Development status of high-efficiency HIT solar cells / Mishima T., Taguchi M., Sakata H., Maruyama E. // *Sol Energy Materials & Solar Cells*. 2011. Vol. 95, P. 18–21.
- [2] Rösch M., Brüggemann R., Bauer G. H. Influence of interface defects on the current-voltage characteristics of amorphous silicon/cristalline silicon heterojunction solar cells // *Proc. of the 2nd World Conf. and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, edited by J. Schmid, H.A. Ossenbrink, P. Helm, H. Ehmman and E.D. Dunlop. Vienna, Austria, 1998. P. 964–967.
- [3] Passivation of Interfaces in High-Efficiency Photovoltaic Devices / S. R. Kurtz, J. M. Olson, D. J. Friedman et al // *Proc. of the Compound Semiconductor Surface Passivation and Novel Device Processing Symposium / Eds. H. Hasegawa, M. Hong, Z.H. Lu, S.J. Pearton, Materials Research Society Symposium Proc. Vol. 573*. Warrendale, USA, 1999. P. 95–106.
- [4] S. J. Wojtczuk, S. M. Vernon, M. M. Sanfacon Comparison of windows for p–on–n InGaP Solar Cells // *Proc. of the 23th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (1993), P. 655–658.
- [5] Watanabe M. O., Ohba Y. Interface properties for GaAs/InGaAlP heterojunctions by the capacitance-voltage profiling technique // *Appl. Phys. Lett.* 1987. Vol. 50, P. 906–908.
- [6] Determination of the Band Offset of GaInP–GaAs and AlInP–GaAs Quantum Wells by Optical Spectroscopy / H. C. Kuo, J. M. Kuo, Y. C. Wang et al // *Journal of Electronic Materials*. 1997. Vol. 26, P. 944–948.
- [7] Hannay N. B. *Semiconductors*. New York. Reinhold publishing corporation. 1959.
- [8] Захаров Н. Д., Рожанский Н. В., Корчажкина Р. Л. Дефекты, возникающие при распаде твердого раствора фосфора в германии // *ФТТ*. 1974. Т. 16. Вып. 5. С. 1444–1450.
- [9] Растворимость и выделение электроактивного фосфора в Ge / Фистуль В. И., Яковенко А. Г., Гвелесиани А. А., Цыганков В. Н., Корчажкина Р. Л. // *Изв. АН СССР. Неорганич. мат-лы*. 1975. Т. 11. С. 539–542.