Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

УДК 538.9

На правах рукописи

ЧУЧВАГА НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

Исследование и оптимизация гетеропереходных солнечных элементов на основе кремния

Специальность 6D072300 – Техническая физика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
Токмолдин Серекбол Жарылгапович,
д.ф.-м.н, профессор, ТОО «Физико-технический институт», Алматы, Казахстан

Зарубежный научный консультант:
Теруков Евгений Иванович,
д.т.н., профессор, ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Республика Казахстан
Алматы, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ 4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ 5
ВВЕДЕНИЕ 6
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ HIT 12

1.1 Общие сведения 12
1.2 Структура гетеропереходных фотоэлементов 13
1.3 Подготовка кристаллической подложки 15
1.4 Собственные тонкие плёнки и легированные слои a-Si:H 17
1.5 Прозрачный проводящий оксид 18
1.6 Металлизация 19
1.7 Повышение эффективности фотоэлементов HIT 21
1.8 Постановка задач исследования 24
Выводы по разделу 24

2 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ 26

2.1 Метод изготовления исследуемых структур 26
2.2 Методы измерения характеристик исследуемых структур 32
2.3 Метод моделирования фотоэлемента структуры HIT 34
2.4 Метод компьютерной оптимизации фотоэлемента HIT 37
2.4.1 Изучение влияния параметров изготовления, влияющих на характеристики структуры p-c-Si / n-c-Si (ФЭП 1) 37
2.4.2 Изучение влияния параметров изготовления, влияющих на характеристики структуры p-Si: H / i-a-Si: H / n-c-Si (ФЭП 2) 40
2.4.3 Изучение влияния параметров изготовления, влияющих на характеристики структуры n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+ -a-Si:H (Структура 3) 43
2.5 Метод расчёта слоёв Шоттки в структуре HIT 46
Выводы по разделу 51

3 ОПТИМИЗАЦИЯ И ЭКСЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ 52

3.1 Оптимизация компьютерной модели структуры HIT 52
3.2 Исследование компьютерной модели фотоэлемента HIT 66
3.2.1 Исследование влияния лицевого контакта на эффективность солнечного элемента 67
3.2.2 Исследование влияния тыльного контакта на эффективность солнечного элемента 72
3.2.3 Моделирование поверхностной рекомбинации на фронтальном и 76

тыльном контактах гетеропереходных кремниевых фотоэлементов
3.2.4 Расчёт слоёв Шоттки в фотоэлементе структуры HIT 80
3.2.5 Влияние тонкой плёнки аморфного гидрогенизированного кремния на пассивацию поверхностных состояний подложки кристаллического кремния 82
3.3 Исследование солнечных элементов структуры HIT 92
3.3.1 Оптимизация эмиттерного слоя p–типа проводимости 92
3.3.2 Оптимизация толщины BSF–слоя 94
3.3.3 Оптимизация толщины встроенного i–слоя собственного типа проводимости 95
3.3.4 Характеристики оптимизированных фотоэлементов 97
Выводы по разделу 98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 103

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСО РК 5.04.034-2011: Государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан. Послевузовское образование. Докторантура. Основные положения (изменения от 23 августа 2012 г. No 1080);

Правила присуждения учёных степеней от 31 марта 2011 года No 127;

ГОСТ 7.12-93 — Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила.

ГОСТ 8.417-81 — Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин.

Межгосударственные стандарты: ГОСТ 7.32-2001 (изменения от 2006 г.);

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

TCO, ППО	слой антиотражающего покрытия на основе прозрачного проводящего оксида
HIT	heterojunction with intrinsic thin layer – гетеропереход с внутренним тонким слоем собственной проводимости
КПД, *η, PCE*	коэффициент полезного действия
E_g	ширина запрещенной зоны
PVD	метод физического вакуумного напыления
PECVD, ПХО	метод плазмохимического осаждения из газовой фазы
V_{OC}, U_{xx}	напряжение холостого хода
I_{SC}	ток короткого замыкания
FF	коэффициент заполнения
AM1.5	стандарт интенсивности солнечного облучения, соответствующий углу зенита 48,2°
c-Si	кристаллический кремний
a-Si:H	аморфный гидрогенизированный кремний
d	толщина плёнки
k	коэффициент экстинкции
n	показатель преломления
R	сопротивление
ФЭП	фотоэлектрический преобразователь
TMB	триметилборан
Eff_{max}	максимальное значение эффективности
Eff_{min}	минимальное значение эффективности
СЭМ	сканирующий электронный микроскоп
ITO	оксид индия-олова (англ. Indium tin oxide)
ВАХ	вольт-амперная характеристика
МДП	металл-диэлектрик-полупроводник
ИПС	изопропиловый спирт
AM1.5	Коэффициент воздушной массы
R	Отношение максимальных и минимальных значений эффективности ячейки при изменении каждого параметра изготовления Eff_{max} / Eff_{min}

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. В диссертационной работе представлены результаты оптимизации технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов компьютерного моделирования, а также экспериментальные исследования физических свойств и структуры фотоэлементов HIT.

Актуальность темы. Энергетический потенциал солнечной энергии в 200 раз превышает все остальные источники энергии вместе взятые, что позволяет полностью покрыть текущие мировые энергетические потребности, используя менее 1% поверхности Земли. Тем не менее, рыночные факторы значительно влияют на скорость внедрения технологий по полезному использованию солнечной энергии. В последние годы рынок солнечной энергетики находился в состоянии тотального подавления китайскими производителями своих американских и европейских конкурентов. Это было связано с сильной финансовой поддержкой со стороны правительства КНР. Однако подобная государственная поддержка не могла продолжаться долго и была прекращена для 75% китайских компаний [1]. Также одним из факторов является высокая экологическая нагрузка со стороны производителей традиционных кремниевых солнечных элементов в Китае, что выливается в серьёзные социальные конфликты [2]. Считается, что в перспективе солнечная энергия будет играть определяющую роль в обеспечении энергетической безопасности, экологической и экономической устойчивости Казахстана. Для дальнейшего развития конкурентоспособной солнечной энергетики акцент ставится на создании высокотехнологичной продукции, способной конкурировать в стоимостном отношении с более дешёвыми зарубежными аналогами. Также необходимо в полной мере овладеть технологиями производства и оптимизации солнечных элементов. Казахстан является членом Евразийского Экономического Союза, наиболее богатым солнечным ресурсом, включая как интенсивность солнечного света [3], так и запасы кремниевого сырья. Все указанные факторы определяют экономическую целесообразность развития в Казахстане солнечной энергетики с акцентом на трансферт и разработку высокотехнологичных решений, способных значительно повысить коэффициент полезного действия (КПД) солнечных элементов, а также снизить себестоимость их изготовления за счёт использования меньшего количества сырья и электроэнергии.

Считается, что наиболее большой популярностью на рынке пользуются фотоэлементы на основе кристаллического кремния, в которых при помощи диффузии создан p-n – переход. Подобные солнечные элементы имеют такие преимущества, как относительно высокий коэффициент полезного действия и технологическая достаточность. Вместе с тем, к минусам данных фотоэлементов можно отнести высокую стоимость изготовления, обусловленную использованием высоких температур до 1000°C. Кристаллические кремниевые пластины таких ФЭП должны иметь требования к высокой чистоте материала. В совокупности все эти параметры обеспечивают

высокую эффективность солнечных элементов. Аморфный кремний – это материал, который отлично подходит на роль более дешёвой альтернативы кристаллическому кремнию. Тем не менее, эффективность лабораторных солнечных элементов на основе аморфного кремния не превышает 14% [4]. Аморфный и кристаллический кремний — это разные полупроводники, которые обладают различными физическими свойствами. Аморфный кремний обладает большей шириной запрещённой зоны (Eg = 1,9 эВ) по сравнению кристаллическим кремнием (Eg = 1,12 эВ), а также более высоким коэффициентом оптического поглощения света в видимой области спектра. Структура гетероперехoдного фотоэлемента, который объединил в себе преимущества как аморфного, так и кристаллического кремния, известного как HIT (heterojunction with intrinsic thin layer), демонстрирует возможность достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии при использовании меньшего количества кремния и пониженных температур в процессе изготовления, не превышающих 200–250°C [5]. В промышленном масштабе технология кремниевого гетероперехода позволяет получать солнечные элементы с эффективностью выше 18% [6].

Впервые технология гетеропереходных кремниевых солнечных элементов была запатентована компанией Sanyo в начале 1990-х годов. В первых фотоэлементах гетеропереход формировался на основе гладкой кристаллической кремниевой (c-Si) подложки n-типа проводимости, на поверхность которой осаждался тонкий слой аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) p–типа проводимости [7]. Эффективность такой структуры достигла 12,3%, при этом максимальное значение было получено для толщины аморфного слоя порядка 100 Å (10 нм). Также было обнаружено, что внедрение тонкой плёнки a-Si:H собственной проводимости между кремниевыми слоями n– и p–типа позволяет уменьшать плотность поверхностных дефектов на границе раздела между кристаллическим и аморфным кремнием, что отражается одновременно на повышении напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и коэффициента заполнения солнечного элемента. В этом случае КПД повышалось до 14,8%, при этом оптимальная толщина аморфного кремниевого слоя собственной проводимости оказалась равна 60–70 Å. Ещё одним нововведением компании Sanyo было создание текстурированной поверхности солнечного элемента для более эффективного поглощения света, а также возможности поглощать свет, падающий на пластину под малыми углами. Условия проведения текстурирования не указывались, однако упоминалось, что перед осаждением a-Si:H кристаллическая пластина подвергалась плазменной обработке в водороде. Помимо этого, для создания электрического поля на тыльной стороне солнечного элемента на обратную сторону кремниевой пластины осаждался слой a-Si:H n-типа проводимости. В результате эффективность солнечного элемента достигла значения 18,1% для образца размером 1 см^2.

Дальнейшее усовершенствование было направлено на улучшение пассивации поверхности кристаллического кремния оптимизацией процесса

осаждения аморфного кремния [8]. К 2009 году Тсуномура и коллеги доложили о высокоэффективном фотоэлементе для пластины размером 100,5 см^2 [9]. Основными факторами улучшения стала оптимизация характеристик гетероперехода «аморфный кремний-кристаллический кремний», уменьшение толщины пальцев и шин контактной сетки, а также снижение оптических потерь. Осенью 2009 года компанией Sanyo был показан фотоэлемент структуры HIT при использовании кремниевой пластины толщиной 98 мкм и площадью 100,3 см^2 [10]. В начале 2014 года рекордной эффективности элементов HIT при использовании высококачественного монокристаллического кремния достигла компания Panasonic [11].

Таким образом, для развития энергетического потенциала Республики Казахстан одной из приоритетных задач можно поставить развитие высокотехнологичных современных технологий в области солнечной энергетики. Одной из таких технологий является технология HIT.

Целью работы является оптимизация технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов для достижения ими коэффициента полезного действия 20% и более.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) Изучить стандартную технологию получения гетеропереходных кремниевых солнечных элементов и отработать метод её улучшения.

2) При помощи компьютерного моделирования с использованием программного пакета AFORS-HET определить параметры, влияющие на эффективность гетеропереходных кремниевых солнечных элементов.

3) Провести оптимизацию компьютерной модели фотоэлемента структуры HIT теоретическими расчётами, основанными на физических закономерностях полупроводниковой электроники и фотовольтаики.

4) Провести эксперименты для оптимизации технологических параметров фотоэлемента структуры HIT, в частности, толщины: эмиттерного слоя в ФЭП, встроенного фронтального слоя собственной проводимости в ФЭП, встроенного тыльного слоя собственной проводимости в ФЭП, BSF слоя ФЭП.

5) Изготовить оптимизированные экспериментальные HIT прототипы с эффективностью более 20 % и исследовать их характеристики методами измерения оптических и ВАХ характеристик.

Объект исследований. Гетеропереходные фотоэлементы со встроенным тонким аморфным слоем на базе подложки из монокристаллического кремния n-типа проводимости.

Предмет исследования. Технологические параметры структуры гетеропереходных солнечных элементов HIT.

Достоверность и обоснованность основывалась согласованием основных результатов со строго обоснованными теоретическими, практическими работами и выводами, изданными и входящими в достоверные научно-технические базы. Исследования проводились, используя зарекомендованные методы исследования с применением современного оборудования. Обсуждение полученных результатов на каждом этапе исследования докладывались на научных семинарах, также результаты представлялись на международных и

региональных конференциях с участием ведущих специалистов данной области. Полученные результаты проходили проверку на достоверность путём рецензирования при издании в периодических международных научных журналах и докладах международных конференций, входящих в базы Thompson Reuters и Scopus.

Методологическая база исследований. Основными методами анализа и исследований, использованных в работе, являются: расчёт оптимальных параметров структуры с помощью моделирования в программах AFORS-HET и PC1D; измерение оптических и ВАХ характеристик на установке «IV-16L», а также методом сканирующей электронной микроскопии; измерение времени жизни ННЗ на установке «SINTON».

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации. Экспериментальная часть работы выполнена на оборудовании, прошедшем государственную поверку в период эксплуатации, что обеспечивает соответствующий исследовательским и инженерным целям класс точности и соответствует «Закону об обеспечении единства измерений». В работе использованы единицы измерений, соответствующие метрологическим правилам и нормам Международной системы единиц СИ.

Практическая значимость работы.

— Показана возможность оптимизации технологических параметров структуры солнечных элементов посредством компьютерного моделирования, используя алгоритм, представленный в работе.

— Определены оптимальные значения характеристик HIT ФЭП, которые можно использовать в промышленном производстве фотоэлементов.

Научная новизна работы.

1) Впервые используя комплексный подход, включающий в себя экспериментальные исследования, теоретические расчёты и компьютерное моделирование найдены оптимальные геометрические параметры и уровни легирования функциональных слоёв, влияющие на выходные характеристики исследуемого фотоэлемента HIT.

2) Для фотоэлемента структуры HIT, изготовленного в промышленных условиях на основе коммерческой монокристаллической пластины n-типа проводимости определена оптимальная толщина эмиттерного аморфного слоя p-типа проводимости.

3) Для фотоэлемента структуры HIT, изготовленного в промышленных условиях на основе коммерческой монокристаллической пластины n-типа проводимости впервые определены оптимальные значения толщины для фронтального и тыльных встроенных аморфных слоёв собственной проводимости.

4) На гетеропереходных фотоэлементах HIT, произведённых в промышленных условиях с использованием оптимальных технологических параметров структуры достигнута эффективность более 20%.

Положения, выносимые на защиту:

1) Оптимизированная на основе разработанного метода структура p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-c-Si / i-a-Si:H/ n+ a-Si:H имеет следующие оптимальные

технологические параметры: толщины p-a-Si:H – слоя, фронтального i-a-Si:H – слоя, n-c-Si – слоя и тыльного i-a-Si:H – слоя составляют 7 нм, 5–7 нм, 200 мкм и 7–11 нм, соответственно.

2) Эффективность фотоэлементов HIT на основе монокристаллической пластины n–типа проводимости зависит от толщины эмиттерного p–слоя так, что её экспериментальное оптимальное значение составляет 10 нм, а дельнейшее увеличение толщины сопровождается падением тока короткого замыкания и уменьшением КПД. Уменьшение толщины p–слоя приводит к повышению тока короткого замыкания фотоэлемента, которое происходит вплоть до толщины p–слоя 8 нм.

3) Эффективность фотоэлементов HIT на основе монокристаллической пластины n–типа зависит от толщин фронтального и тыльного слоёв аморфного кремния i–типа так, что их экспериментальные оптимальные значения составляют 7 и 9 нм, соответственно, а их дальнейшее увеличение ведёт к уменьшению напряжения холостого хода и значения КПД.

4) Значение эффективности опытных образцов фотоэлементов HIT, оптимизированных на основе данных компьютерного моделирования, теоретических расчётов и экспериментальных результатов, составляют более 20 процентов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

— «Science and Applications of Thin Films, Conference & Exhibition (SATF 2016) », Измир, Турция;

— «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, Россия, 2016 год;

— «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, аддитивные технологии и робототехника», Алматы, Казахстан, 2017 год;

— «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», Санкт-Петербург, Россия, 2017 год;

— «19 Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург», Россия, 2017 год;

— Международная научная конференция студентов и молодых учёных «ФАРАБИ ӘЛЕМІ», Алматы, Казахстан, 2017 год;

— Международная научно-практическая конференция «Глобальная наука и инновации 2018», Астана, Казахстан.

Результаты работ получены при выполнении следующих научных программ и проектов:

— «Возобновляемые источники энергии» (2014 год);

— «Разработка чистых источников энергии Республики Казахстан на 2013–2017 годы в рамках ЭКСПО-2017» (2014–2017 годы);

— «Улучшение характеристик гетеропереходных кремниевых солнечных элементов» (2015–2017 годы);

— «Development and study of tandem perovskite/silicon heterostructure solar cells / Разработка и исследование тандемных перовскитных/кремниевых гетероструктурных солнечных элементов» в рамках программы «Ньютон — аль-Фараби» (2015–2017 годы);

— «Управление поверхностными состояниями кристаллического кремния пассивацией аморфным гидрогенизированным кремнием собственной проводимости» (2018 год);

— программа № BR05236498 «Разработка элементов и построение оптимальных систем автономного энергоснабжения объектов агропромышленного комплекса с использованием возобновляемых источников энергии» (2018 год).

Результаты настоящей работы используются на линии для производства гетеропереходных фотоэлементов на территории ТОО «Физико-технический институт», г. Алматы, Казахстан.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 16 работах, 2 из которых в журналах, входящих в базу данных SCOPUS, 3 работы в журналах, рекомендованных ККСОН, включая инновационный патент, 5 работ в сборниках казахстанских и международных конференций. Имеются статьи в других изданиях и трудах конференций.

Личный вклад автора. Автор участвовал в постановке экспериментов по оптимизации технологических параметров изготовления гетероструктурного ФЭП на кремнии и исследованию их фотоэлектрических характеристик. Автором лично проведена разработка модельных представлений, их анализ и обобщение экспериментальных данных. Обработка экспериментальных данных, и оптимизация параметров ФЭП проведены совместно с сотрудниками Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, «НТЦ тонкоплёночных технологий», ТОО «Физико-технический институт» и ТОО «Научно-производственный центр агроинженерии».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения и списка литературы, содержащего 118 наименований. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка и 18 таблиц.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ HIT

1.1 Общие сведения

Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) — это устройства, которые преобразуют энергию света в электрическую энергию. Солнце является относительно неисчерпаемым источником энергии, которым можно обеспечить человечество в избытке. Однако для реализации этих целей необходимо развивать технологии фотоэнергетики. Поэтому солнечная энергетика, и в частности, фотовольтаика, имеет большой потенциал. К тому же, фотовольтаика относится к экологически чистым источникам энергии [12]. На сегодняшний день стоимость солнечной энергии в Казахстане может составлять до 17 тенге/кВт, что позволяет этому источнику энергии конкурировать с традиционными источниками энергии. Тенденция снижением цен на солнечную энергию обусловлена увеличением производственных мощностей и усовершенствованием технологии в данной области [13,14].

Одним из наиболее перспективных направлений возобновляемой энергетики является — фотовольтаика. Правительства многих стран осуществляет государственную поддержку возобновляемой энергетики, увеличивая мощности солнечных электростанций, а также, увеличивая долю финансирования исследований в данной области [15].

В XX-ом веке из-за резкого подорожания ископаемых источников энергии началось бурное развитие возобновляемых источников энергии. С того времени фотоэлементы на основе кристаллического кремния начали занимать главенствующую роль на рынке фотовольтаических приборов и в настоящее время занимают около 90% составляющей рынка. Кристаллический кремний — это непрямозонный полупроводник с шириной запрещённой зоны 1,1 эВ. Коэффициент оптического поглощения составляет ~ 100 $см^{-1}$ при $E>E_g$. Большая часть стоимости фотовольтаического элемента составляет подложка из кристаллического кремния, поэтому повышение эффективности фотоэлемента — это основа к снижению стоимости за 1 Ватт энергии.

Фотовольтаический эффект был открыт А.Е. Беккерелем в 1839 году. В конце XIX века российский физик Александр Столетов создал первый фотоэлемент, работающий на внешнем фотоэффекте. В 1941 году в лабораториях Белла (Нью-Джерси, США) были обнаружены фотовольтаические свойства кристаллического кремния (c-Si). И только в 1954 году был разработан фотоэлемент на основе кристаллического кремния, который имел эффективность равную 6% [16].

В процессе эволюции технологий структура ФЭП на основе кристаллического кремния прошла путь от диффузионного p-n–перехода к многослойным структурам типа HIT. Эффективность солнечных батарей на основе монокристаллического и поликристаллического кремния увеличивается с каждым годом и достигает всё больших значений [17,18].

Наибольшую эффективность среди фотоэлементов показывают ФЭП с системами, позволяющими концентрировать солнечное излучение на

солнечном элементе. Такие системы обладают эффективностью более 37% [19]. Системы с концентраторами солнечного света состоят из двух основных модулей: системы слежения за положением источника света и светособирающей системы. Светособирающая система состоит из высококачественных отражающих покрытий, что делает такие системы достаточно дорогими. Другой более дешёвой альтернативой являются перовскитные фотоэлементы, однако проблемой этих структур является быстрая деградация в нормальных условиях среды [20].

С развитием технологий улучшается и качество производства кремниевых подложек, что сказывается на их чистоте. А это в свою очередь ведёт к увеличению КПД солнечных элементов на основе кристаллического кремния. Одновременно с этим развивается процесс изготовления полупроводниковых приборов и структур [13, p. 892].

Для оптимальной работы фотоэлемента генерация электронно-дырочных пар под действием света должна происходить во всём спектре солнечного излучения, а затем необходимо добиться максимального разделения зарядов под действием внутреннего поля с минимальной рекомбинацией в объёме структуры. Одной из приоритетных задач при изготовлении ФЭП является уменьшение вероятности поверхностной рекомбинации в материале. Эта задача решается пассивацией поверхностных состояний кремниевой подложки. В мире существует большое количество методов пассивации поверхности. Один из известных методов — это метод термического синтеза диоксида кремния (SiO_2). Однако на сегодняшний день развитие микроэлектронной промышленности нуждается в альтернативном SiO_2 диэлектрике [21]. Альтернативный пассивирующий слой должен обладать возможностью роста при низких температурах, как например плёнки, показанные в работах [22–25]. Другой альтернативой является аморфный оксид кремния (a-SiNx:H) [26–27], а также оксид алюминия (Al_2O_3) [29–31]. Обычно пассивирующая плёнка с передней стороны элемента является изолятором, поэтому металлические контакты наносятся так, чтобы они имели непосредственный контакт с активным слоем эмиттера [32–34].

Металлические контакты, обладающие общей границей со слоем эмиттера, накладывают ограничение на эффективность фотоэлемента, так как на границе метал-полупроводник происходит рекомбинация носителей электрического заряда. В следствие этого пассивация поверхности кремниевой подложки становится не такой эффективной, так как нивелируется рекомбинационными потерями на контактах. Для решения этой проблемы можно использовать контакты, которые одновременно и пассивируют, и контактируют. Данная проблема решалась в процессе исследования и разработки гетеропереходных солнечных элементов.

1.2 Структура гетеропереходных фотоэлементов

Суть гетеропереходных солнечных элементов в формировании p-n-переходов из материалов обладающими разными значениями запрещённой

зоны. Одной из основных особенностей гетероструктурных ФЭП является пассивирующий широкозонный полупроводниковый слой между омическими контактами и активными элементами структуры, который создаёт высокое напряжение при протекании через него тока, напряжение должно быть достаточно высоким для того, чтобы снизить вероятность рекомбинации [35–36]. Гетероструктурные полупроводниковые приборы на основе кремния имеют похожий принцип строения с приборами на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), принцип работы которых основан на туннелировании носителей заряда через диэлектрический слой [37]. При всём этом не исключается и диффузионный транспорт носителей заряда, который может играть основную роль при протекании тока через структуру [38]. Исходя из вышесказанного можно сказать, что для полупроводниковых кремниевых многослойных ФЭП в качестве буферного слоя отлично подойдут гидрогенизированные тонкие слои аморфного кремния (a-Si:H) толщиной несколько нанометров. Ширина запрещённой зоны аморфного кремния больше чем ширина монокристаллического кремния и он легко поддаётся легированию [39] n– и p–типа, что делает его подходящим кандидатом на роль буферного слоя.

В 1974 году В. Фус провёл первые исследования гетероструктуры кристаллический кремний-аморфный кремний a-Si/c-Si [40]. Первые исследования пассивации поверхности кристаллического кремния аморфным кремнием были показаны в работе [41]. В 1983 году в [42] был показан фотоэлемент тандемного типа со структурой частью a-Si/c-Si. Внедрение гетеропереходов такой структуры в фотоэлементы начала компания Sanyo (Япония) в 80-х годах. В изготовляемых приборах использовались кремниевые пластины n-типа проводимости и эмиттеры из аморфного кремния p-типа проводимости, легированного бором. Такие элементы обладали эффективностью около 12%, небольшими значениями фактора заполнения из-за высоких значений паразитного тока [43]. Но один из самых значительных шагов, определяющих новую высокоэффективную структуру фотоэлементов, был сделан с началом использования буферного слоя a-Si:H а собственной проводимостью между легированным эмиттером и кремниевой подложкой с целью снижения плотностей разорванных связей и дефектов на интерфейсе. Эту структуру называют гетеропереход с тонким внутренним слоем (Heterojunction with intrinsic thin layer — HIT). Эффективность первых элементов структуры HIT составляла 14,8% [7, p. 3521]. Подобная гетероструктура, но уже с добавлением пассивирующей ячейки на тыльную сторону, имела эффективность 18% [7, p. 3522]. Авторы данной работы наглядно показали, каким дизайном должен обладать современный гетеропереходной ФЭП, а именно с буферными пассивирующими слоями по обе стороны кремниевой пластины, а также со встроенным тонким слоем собственной проводимости между легированным слоем эмиттера и кристаллической пластиной.

Для пассивации поверхностных состояний между поверхностью кристаллического кремния и легированного слоя a-Si напыляется встроенный

тонкий слой a-Si с собственной проводимостью. Легированные аморфные слои сами по себе пассивируют поверхность кристаллической подложки, но как показано в работе [44], аморфные слои собственного типа проводимости пассивируют поверхность подложки гораздо лучше. Стоит отметить, что такая зависимость объясняется изменением значения уровня Ферми [45]. Такое изменение приводит к снижению энергии образования дефектов. Следовательно, увеличение легирования может привести к большей плотности дефектов. Исследования на тему связи уровня легирования и образования дефектов освещены в работах [46,47].

Использование аморфного кремния позволяет проводить технологические процессы производства ФЭП при низких температурах, не превышающих 200 ^{0}C, что позволяет использовать меньшее количество стадий при изготовлении ФЭП и снижает его себестоимость. Процесс осаждения аморфного кремния на кристаллическую подложку происходит по методу плазменно-химического осаждения из газовой фазы (PECVD — Plasma enhanced chemical vapor deposition). В этот же момент происходит легирование материала посредством добавления другого газа (C_3H_9B — для n–типа проводимости и PH_3 — для p–типа проводимости). Сам же собственный слой аморфного кремния осаждается из силана (SiH_4) с большой долей водорода (H_2) для гидронизации. Со стороны, противоположной эмиттеру, аналогично осаждается встроенный тонкий слой собственной проводимости и поверх него слой аморфного кремния того же типа проводимости, что и подложка. Такое сочетание формирует так называемое заднее запирающее поле (BSF — back surface field). BSF формируется для того, чтобы не дать неосновным носителям заряда добраться до внешней цепи и тем самым сформировать паразитные обратные токи. Далее, поверх готового «сэндвича» методом магнетронного распыления формируется слой прозрачного проводящего оксида (TCO — transparent conductive oxide) с низким сопротивлением менее 100 Ом/квадрат. Для производства ФЭП структуры HIT в качестве TCO основном используют оксид индия-олова (ITO – Indium tin oxide). Поверх TCO плёнки наносятся металлические контакты методом трафаретной печати по обе стороны структуры для двустороннего фотоэлемента, и только на фронтовую сторону для одностороннего ФЭП. Для одностороннего фотоэлемента на тыльную сторону наносится сплошной металлический контакт методом магнетронного распыления сразу после нанесения TCO слоя. Далее, полученную ячейку соединяют с другими такими же фотоэлементами в модуль и ламинируют.

1.3. Подготовка кристаллической подложки

Первые кремниевые ФЭП изготавливались с использованием кристаллических подложек n–типа проводимости, однако, вскоре был совершён переход на использование подложек p-типа проводимости, так как они более устойчивы к космической радиации [48]. Для использования ФЭП в условиях атмосферы Земли это не играет большой роли, поэтому со временем в процессе улучшения технологии ФЭП структуры HIT начали снова использовать

кристаллические подложки n-типа проводимости. Это связано с тем, что время жизни неосновных носителей в пластинах n–типа проводимости, произведённых методом Чохральского, имеет большее значение, нежели у пластин p-типа проводимости. Также, под действием солнечного излучения в пластинах p-типа проводимости примеси бора могут вступать в реакции с кислородом или железом [49].

При низкотемпературных процессах монокристаллический кремний выглядит более предпочтительным материалом, нежели поликристаллический, так как при низких температурах не происходит геттерирования примесей и гидрирования дефектов, что должно способствовать увеличению качества в объёме поликристаллического материала [50,51]. Высокая степень ориентации на подложке монокристаллического кремния обеспечивает более качественное осаждение тонких плёнок на поверхность кристаллической подложки.

Для уменьшения внешнего отражения света от поверхности ФЭП и улучшения внутреннего отражения на пластинах делается текстурирование поверхности. Выращенные монокристаллы кремния разрезают на пластины при помощи алмазных дисков с внутренней режущей кромкой или проволочной пилой с использованием суспензии алмазной пыли. Направление распила должно соответствовать определённой кристаллографической плоскости. Для кремниевых пластин самые распространённые направления в индексах Миллера — (111) и (100). После такой резки на поверхности кремниевых пластин появляется поверхностный нарушенный слой. Для изготовления высокоэффективного ФЭП такой слой необходимо стравить.

После травления нарушенного слоя и отчистки кремниевой пластины от органических и неорганических загрязнений производится процесс текстурирования. Текстурирование — это стравливание слоёв кремния в направлении (100) так, чтобы на поверхности монокристаллической кремниевой пластины получились пирамидки. Такая технология очистки требует использования большого количества кислот либо щелочей и изопропанола или других добавок, способствующих изменению скорости травления кремния в определённых направлениях. Кристалл кремния имеет кубическую структуру решётки, каждый атом кремния расположен в центре тетраэдра и связан с четырьмя другими атомами. Атомы кремния в кристаллической плоскости (111) связаны с тремя другими атомами Si кристалла кремния (Si). Такое расположение атомов приводит к тому, что одна связь остаётся свободной. Атомы кристаллической плоскости (100) связаны с кристаллом кремния двумя атомами Si, следовательно, две связи остаются свободными. Таким образом, для растворения атомов Si, расположенных в плоскости (111) требуется больше энергии, чем для растворения атомов Si, расположенных в плоскости (100). Разница в свободных связях или энергии связей разных плоскостей приводит к образованию пирамидок на поверхности монокристаллического кремния с ориентацией (100). Поэтому для производства ФЭП предпочтительней использовать кремниевые пластины с ориентацией (100) при условии, что при помощи специальных добавок будет обеспечена различная скорость травления кремния для направлений (111) и (100), что

обеспечит равносторонние пирамидки [52,53]. Высота пирамид обычно составляет около нескольких микрон.

Так как методы магнетронного распыления и PECVD чувствительны к качеству поверхности подложки, то важно, чтобы пирамидки получились одинаковыми и с гладкими поверхностями. В работе [54] показано, что плёнки аморфного кремния, нанесённые на текстурированные пластины более чем в полтора раза тоньше, чем плёнки, нанесённые на гладкие плоские поверхности. Можно заметить, что на поликристаллических кремниевых пластинах в процессе текстурирования образуются впадины U–образной формы.

Для финальной очистки от загрязнений, а также стравливания оксида кремния с поверхности используют плавиковую кислоту (HF), что позволяет получить необходимую для качественного осаждения аморфных плёнок поверхность [55,56]. Полный метод очистки пластины включает в себя обезжиривание в перекиси водорода (окисление) и щёлочи (удаление оксида), промывку водой, травление нарушенного слоя в щёлочи, очистку от металлов в кислотах и удаление оксидной плёнки в плавиковой кислоте [57]. Во время процесса окисления захватываются загрязнения поверхности, которые потом стравливаются вместе с оксидной плёнкой во время процесса восстановления. Стоит отметить, что важным условием для получения качественной пассивации является минимальное время между химической обработкой пластин и осаждением слоёв аморфного кремния.

1.4 Собственные тонкие плёнки и легированные слои a-Si:H

Из вышесказанного можно сделать вывод, что тонкие плёнки аморфного гидрогенизированного кремния хорошо подходят для пассивации поверхностных состояний подложки кристаллического кремния [41, p. 157]. Нанесение плёнки a-Si:H происходит методом PECVD из разбавленного в водороде силана (SiH_4). Частота разряда плазмы обычно равна 13,56 МГц [45, p. 4439]. Однако стоить отметить, что у различного оборудования могут быть различные оптимальные параметры осаждения [54, p. 29; 58].

Пассивация поверхности кристаллической подложки при осаждении аморфного кремния происходит путём пассивации оборванных связей водородом, что приводит к снижению плотности поверхностных состояний [45, pp. 4440]. Предположительно, дефект, который отвечает за поверхностную рекомбинацию – это оборванная связь на поверхности кремния. Данный дефект может быть, как нейтральным, так и отрицательным либо положительным. Такая модель поверхностной рекомбинации была экспериментально подтверждена для a-Si:H/c-Si структур [59]. Описанная пассивация пластин должна избавлять поверхность от дефектов такого рода, приводящих к активной поверхностной рекомбинации.

Легированные слои в структуре HIT играют роль либо эмиттера p–типа проводимости, либо запирающего BSF слоя n^+-типа проводимости. Осаждаются эти плёнки методом PECVD в тех же реакторах, что и слои аморфного кремния собственной проводимости. Обычно используют разные камеры для каждого из типов плёнки, но можно осаждать все слои и в одной камере, если

предварительно перед осаждением проводить процесс чистки и кондиционирования камеры. Для изготовления плёнок p–типа проводимости применяют газ триметил бор (ТМВ) или биборан (B_2H_6), для изготовления плёнок n-типа проводимости используют фосфин (PH_3). Все процессные газы в рабочих камерах сильно разбавлены в водороде.

Увеличение времени жизни носителей заряда, достигнутое путём пассивации поверхностных состояний нанесением тонких аморфных слоёв, позволяет безрекомбинационно проходить зарядам сквозь все слои структуры к внешним металлическим контактам. Высокие значения времени жизни (порядка нескольких тысяч микросекунд) и возможность наносить контакты непосредственно поверх проводящего оксида, не допуская контакта металла и эмиттера, исключают рекомбинационные потери на границе металла и легированного аморфного кремния и позволяют достичь высоких показателей напряжения холостого хода (U_{xx}). Однако, так как время жизни носителей заряда в аморфных плёнках во много раз меньше, чем кристаллическом кремнии, то это оказывает негативное влияние на проводимость структуры. Так как видимый свет поглощается в кристаллической пластине, то негативное влияние ощутимо лишь с фронтальной стороны ФЭП, оно выражается падением тока короткого замыкания ($I_{кз}$) [60].

1.5 Прозрачный проводящий оксид

Подвижность носителей зарядов в плёнках аморфного кремния очень мала, поэтому для лучшей транспортировки заряда ФЭП покрывают прозрачным проводящим оксидом, аналогично элементам на основе аморфного кремния [61]. Поверхностное сопротивление ТСО в гетероструктурных ФЭП составляет менее 100 Ом/квадрат.

Тонкий проводящий оксид ТСО в гетероструктурных фотоэлементах, служит буферным слоем между эмиттером и металлическими контактами, который уменьшает рекомбинацию носителей заряда на контакте металл-полупроводник. Также, ТСО работает как проводящий токоснимающий слой, который собирает носители заряда с поверхности образца на металлические контакты. Проводящий оксид обладает такими оптическими свойствами, что позволяют ему служить антиотражающим покрытием, которое обеспечивает большее поглощение попадающего на поверхность образца солнечного излучения. Для высокоэффективных ФЭП необходимо использовать материалы, удовлетворяющие всем перечисленным требованиям.

ТСО слои применяют как для двусторонних, так и для односторонних ФЭП, если для двусторонних гетеропереходных фотоэлементов ТСО фронтальной и тыльной областей должны обладать одинаковыми свойствами, то для односторонних элементов ТСО с тыльной стороны должен в первую очередь иметь хорошую проводимость и отличные оптические качества для прохождения света.

Один из самых используемых тонких проводящих оксидов — это оксид олова, легированный индием (ITO), который осаждают методом магнетронного распыления [62]. Плёнки ITO обладают малой подвижностью носителей заряда

(20–40 $см^2/В·с$), с концентрацией 10^{19}–10^{21} $см^{-3}$, которая может варьироваться в зависимости от потока подаваемого кислорода в реактор. Технология позволяет получать тонкий проводящий оксид с поверхностным сопротивлением около 20 Ом/квадрат [63]. В данный момент активно исследуются и альтернативные материалы на роль ТСО, такие как оксид цинка, легированный алюминием либо бором, а также и другие материалы на основе оксида индия [64–66].

Нерешённой проблемой использования ТСО для кремниевых гетероструктурных ФЭП остаётся поиск и внедрение новых материалов, подходящих на данную роль, так как различие в зонной структуре ТСО и плёнок аморфного кремния оказывает влияние на транспорт носителей заряда [67]. Для ТСО n-типа проводимости омический контакт обеспечен лишь со стороны плёнки аморфного кремния, легированной фосфором, но для плёнки a-Si:H, легированной бором, необходимо обеспечить высокую вероятность туннелирования зона — зона ТСО/c-Si, так как по расчётам авторов работы [68] именно механизм туннелирования носителей заряда в данной области обеспечивает хороший фактор заполнения высокоэффективных гетероструктурных ФЭП.

1.6 Металлизация

Для достижения высокой эффективности гетеропереходных кремниевых солнечных элементов необходимо иметь контакты хорошего качества. Такие контакты должны быть достаточно высокопроводящими для хорошей передачи тока. А также такие контакты должны быть необходимо узкими (стандартная ширина — 75–100 мкм) по размерам для того, чтобы уменьшить затенение поверхности в ФЭП. Самый распространённый способ нанесения тонких контактов — это метод трафаретной печати. На поверхность структур при помощи специальных масок наносят и вдавливают серебросодержащую пасту, а затем отжигают в специальной печи при температурах не превышающих 200^0С. Более высокие температуры применять не рекомендуется, так как это может привезти к разрушению аморфных и ТСО слоёв [69]. В этом и заключается главное отличие низкотемпературных паст. Например, обычные пасты отжигаются при температурах до 800 ^{0}С. Одной из задач данной технологии нанесения контактов является достижение необходимой проводимости при низком контактном сопротивлении к ТСО слою.

Термопластичные пасты — вид низкотемпературных паст с контролем температуры затвердевания, содержащих в своём составе большое количество растворителя. Принцип работы состоит в том, чтобы управлять затвердеванием с помощью температуры. Во время нагрева начинается затвердевание, которое способствует свободному движению полимерных цепей, а во время охлаждения — это движение останавливается. Другой вид низкотемпературных паст – это термоусадочные пасты.

Несмотря на свои преимущества низкотемпературные серебросодержащие пасты имеют существенные недостатки. Сопротивление этих паст составляет порядка десяти μОм·см, тогда как высокотемпературные пасты обладают

сопротивлением в разы ниже. Поэтому поиск и исследование низкотемпературных паст или альтернативных технологий является важной задачей для современной фотовольтаики. Одним из направлений таких исследований является изучение паст на основе меди [69, pp. 001142]. С учётом того, что медь является более дешёвым металлом, то такой материал кажется более привлекательным для полномасштабного производства солнечных элементов и модулей. Фирмой «KANEKA» (Канека) (Япония) было показано применение таких паст на модулях собственного производства [70].

Помимо качества металлических контактов, так же важное влияние на эффективность фотоэлементов оказывает и их дизайн. Существуют несколько видов дизайна металлических контактов: «BUSBAR», «SMART WIRE» и «IBC».

Фотоэлементы с дизайном контактов типа «BUSBAR» металлизированы тонкими полосками прямоугольной формы, напечатанными на лицевой и задней сторонах солнечного фотоэлемента. Эти металлические контакты называются «busbars» и имеют важное назначение: они проводят постоянный ток, генерируемый солнечным фотоэлектрическим элементом. Перпендикулярно к шинам «busbars» расположены более тонкие металлические контакты «fingers», которые собирают генерируемый ток для доставки к шинам «basbars».

Стоимость металлизации производства гетеропереходных солнечных элементов была значительно снижена путём применения дизайна контактной сетки «Smart Wire» [71]. Данный дизайн заменяет шины «busbars» на большое количество тонких проводов. Спайка таких контактов с контактами «fingers» происходит непосредственно во время ламинации фотоэлемента.

Альтернативным дизайном контактов является «IBC», структура которого показана на рисунке 1.1.

Использования такого дизайна контактов позволяет увеличить площадь поверхности фотоэлемента, на которую падает солнечный свет, что положительно влияет на ток короткого замыкания фотоэлемента.

Наибольшие значения эффективности фотоэлементов структуры HIT показывают ФЭП с применением дизайна контактов «IBC» [17, p. 2].

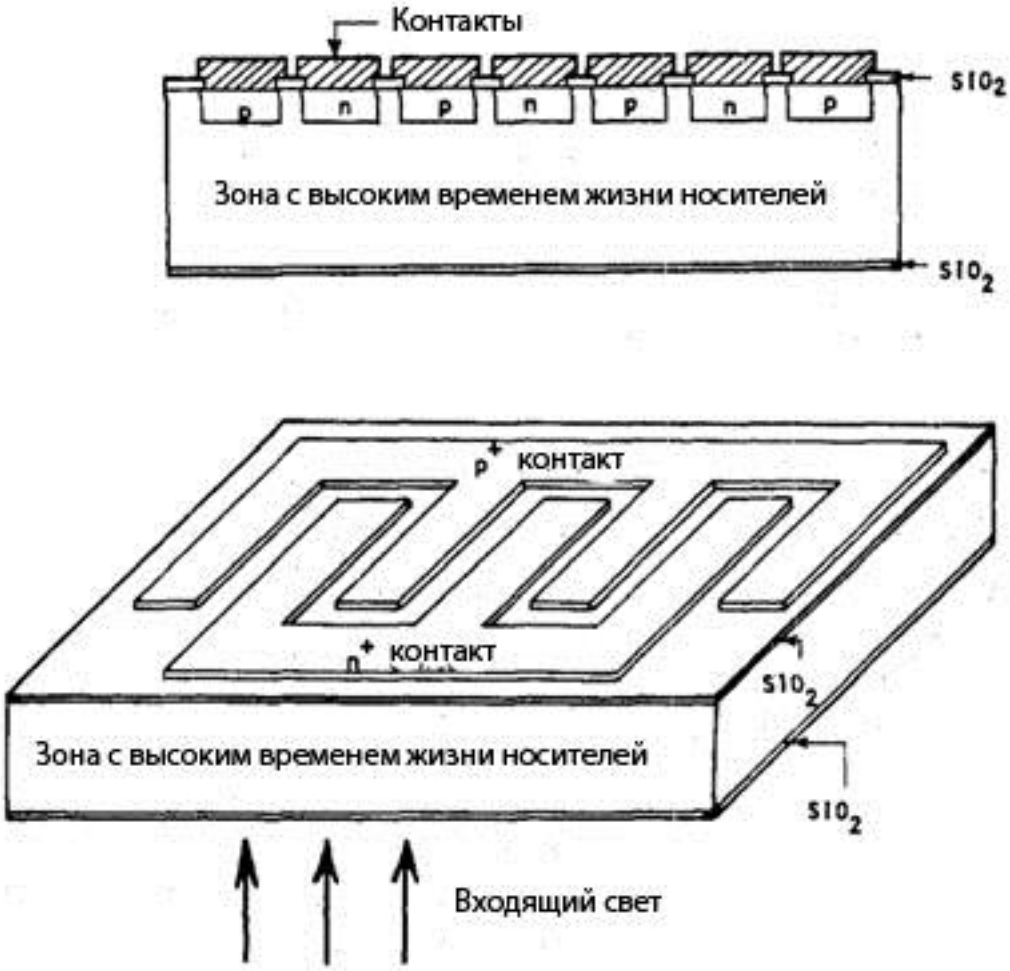


Рисунок 1.1 – Схема дизайна металлических контактов типа «IBC» [72]

1.7 Повышение эффективности фотоэлементов HIT

Гетеропереходные солнечные элементы структуры HIT обладают сэндвич-дизайном, состоящим из пяти основных слоёв: слой аморфного кремния p-типа проводимости, фронтальный встроенный слой аморфного кремния собственной проводимости, слой монокристаллического кремния n-типа проводимости, тыльный аморфный слой собственной проводимости и сильнолегированный слой аморфного кремния n-типа проводимости (рисунок 1.2). Слой кристаллического кремния образует p-n – гетеропереход со слоем p–типа проводимости. Сильнолегированный слой аморфного кремния n–типа проводимости создаёт тыльное запирающее поле, которое создаёт энергетический барьер для неосновных носителей заряда. Встроенные тонкие аморфные слои собственной проводимости обеспечивают пассивацию поверхностных состояний подложки кристаллического кремния.

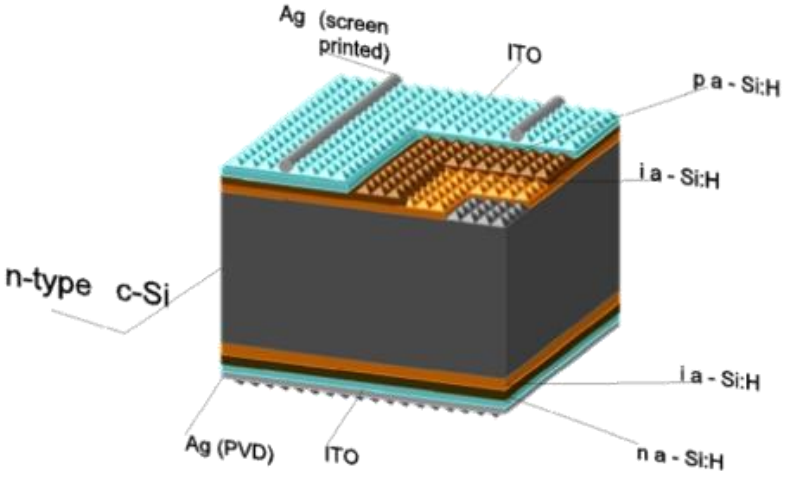


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение структуры HIT – гетеропереходного кремниевого солнечного элемента

HIT технология была развита компанией «Sanyo Ltd.» в 1994 году [73–76]. С тех пор технология HIT структур развивалась, с каждым годом достигая новых высот в показателях эффективности [77–79]. В одной из первых работ была показана важность определения наиболее эффективных параметров фотоэлемента HIT–технологии. Авторы показали влияние толщины эмиттерного и собственного встроенного слоя структуры фотоэлементов [7, P. 3519–3520].

На рисунке 1.3 показано, что эффективность фотоэлемента начинает расти при использовании собственного нелегированного слоя. Кривая зависимости имеет максимум, после которого начинается спад. Это говорит о важности правильного подбора параметров фотоэлемента.

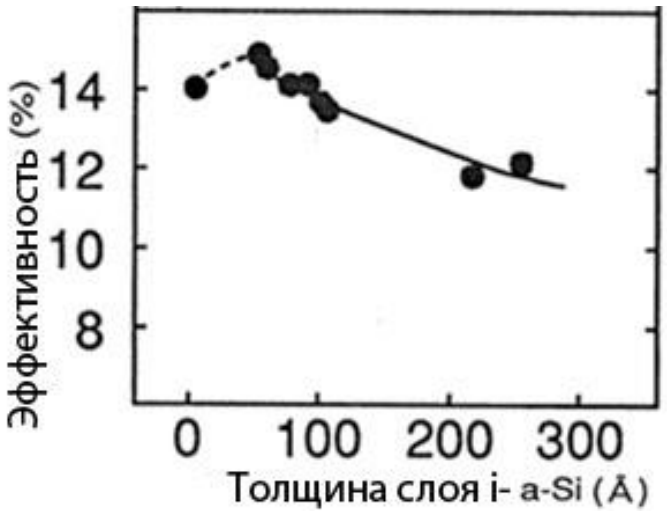


Рисунок 1.3 – Зависимость эффективности прибора от толщины встроенного слоя [7, p. 3520]

Для того чтобы фотоэлементы работали максимально эффективно необходимо определить от чего зависят основные выходные характеристики фотоэлемента и найти оптимальные параметры, которые можно достичь при росте гетероструктур. Как показали авторы некоторых работ [80,81], одним из важнейших параметров является качество слоя кристаллического кремния в HIT структуре. Плотность поверхностных дефектов D_{it}, а также плотность объёмных дефектов (в кристаллическом кремнии p-типа такие дефекты вызваны включениями кислорода D_{od}), значение которой зависит от методики и качества роста материала и влияет на выходные характеристики фотоэлементов. При рассмотрении солнечного элемента, имеющего структуру TCO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Al-BSF/Al, авторы показали, что для минимальных потерь эффективности фотоэлемента D_{it} не должна превышать значения 10^{11} $см^{-2}$, а D_{od} быть не более 10^{9} $см^{-2}$. Близкие результаты были показаны в работе, в которой была смоделирована структура TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p)/Al/. По данным авторов оптимальная величина D_{it} должна быть не более 10^{10} $см^{-2}$.

Одним из управляемых параметров при росте фотоэлемента является толщина того или иного слоя структуры [7, P. 3519–3520]. По данным исследователей толщина слоя кристаллического кремния в HIT элементе должна быть 50-300 мкм, в зависимости от структуры. Оптимальные толщины аморфного эмиттера и собственного слоя проводимости 5–10 нм, и 3–5 нм, соответственно [81–84].

Одним из важнейших факторов, влияющих на работу HIT фотоэлемента, является граница раздела материалов между TCO слоем и аморфным материалом, а также между кристаллическим и аморфным кремнием. Исследования этих факторов описаны в некоторых теоретических работах посвящённых моделированию фотоэлементов [82, p. 168; 85,86].

По данным исследователей в гетеропереходе кремний-аморфный кремний оптимальная энергия разрыва зон ΔE_V = 0,37 эВ и ΔEc = 0,25 эВ, так как больший потенциальный барьер для основных носителей заряда ведёт к падению тока короткого замыкания и, следовательно, эффективности фотоэлемента. Также в работах показано, что при работе выхода в слое TCO W_{TCO} = 5,1–5,2 эВ наблюдается рост выходных характеристик, а при меньших значениях происходит спад. Это связанно с распределением заряда в обеднённой области, которое влияет на квазиуровни Ферми в данных областях, что ведёт к изменению зонной диаграммы и уменьшению эффективности фотоэлемента.

Важным управляемым входным параметром фотоэлемента, влияющего на его выходные характеристики, является концентрация носителей заряда в каждом из слоёв структуры. По данным авторов работы [84, p. 0111] концентрация основных носителей заряда эмиттерного слоя p–типа в HIT элементе должна составлять не менее $2 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$. К сожалению, работ по исследованию влияния концентрации носителей заряда в слоях фотоэлемента не так много.

1.8 Постановка задач исследования

В последние годы всё больше и больше работ посвящено исследованию фотоэлементов HIT, однако, экспериментальных работ не так много. В большинстве своём лидеры в области технологии HIT сообщают об использовании более чистых и дорогих материалов для достижения высоких КПД фотоэлементов в лабораторных условиях. Работы, посвящённые модификации дизайна фотоэлементов HIT в основном основаны на использовании компьютерного моделирования, но в большинстве своём не рассматривают фотоэлемент HIT в целом, только лишь какие-то отдельные его части. Стоит отметить, что существует проблема повышения качества фотоэлементов структуры HIT в промышленных условиях, и в основном этот вопрос рассматривается со стороны оптимизации технологических процессов и режимов работы оборудования, но не со стороны улучшения дизайна структуры фотоэлемента.

Решением проблемы улучшения качества фотоэлементов в промышленных условиях может служить комплексный подход к оптимизации технологических параметров структуры HIT с применением методов компьютерного моделирования, теоретических и численных расчётов, а также экспериментальных исследований с использованием промышленного или полупромышленного оборудования.

Исходя из выше изложенного, в работе были поставлены следующие задачи:

1) Освоить стандартную технологию гетеропереходных кремниевых солнечных элементов.

2) При помощи компьютерного моделирования определить параметры, влияющие на эффективность гетеропереходных кремниевых солнечных элементов.

3) Оптимизировать компьютерную модель фотоэлемента структуры HIT.

4) Провести эксперименты для оптимизации технологических параметров фотоэлемента структуры HIT:

— оптимальной толщины эмиттерного слоя в ФЭП;

— оптимальной толщины встроенного фронтального слоя собственной проводимости в ФЭП;

— оптимальной толщины встроенного тыльного слоя собственной проводимости в ФЭП;

— оптимальной толщины BSF слоя ФЭП.

5) Изготовить оптимизированные экспериментальные HIT прототипы с эффективностью более 20 % и исследовать их характеристики.

Выводы по разделу

Анализ литературных данных позволил сделать следующие выводы:

1. На сегодняшний день солнечная энергетика является одним из самых развивающихся направлений, которое показывает постоянный рост эффективности фотоэлементов и усовершенствование их конструкции.

Одной из наиболее развивающихся технологий изготовления солнечных элементов является технология HIT. Гетеропереходные фотоэлементы структуры HIT производятся, используя более низкие температуры (до 200 ^{0}C) и показывают более высокие эффективности по сравнению с традиционной диффузионной технологией производства ФЭП.

2. Технология производства гетеропереходных фотоэлементов достигла высокого уровня. Сегодня всё больше и больше исследований в области фотовольтаики и солнечной фото-энергетики посвящены фотоэлементам структуры HIT. Исследования охватывают различные вопросы: качество материалов, дизайн фотоэлемента, дизайн контактов, компьютерное моделирование.

3. Оптимизация гетеропереходных ФЭП является одной из важнейших задач современной фотовольтаики. Благодаря исследованиям, проводимым по данной теме, на лабораторных образцах, используя высокочистые лабораторные подложки монокристаллического кремния и последние разработки в дизайне металлических контактов, удалось достигнуть эффективности фотоэлементов, приближающейся к теоретическому пределу эффективности кремниевых фотоэлементов.

4. Развитие технологии производства фотоэлементов структуры HIT на территории Республики Казахстан является перспективной задачей.

2 ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Для проведения исследования была освоена технология производства фотоэлементов структуры HIT. Были изготовлены фотоэлементы HIT с различными параметрами, которые сравнивались в дальнейшем по различным параметрам: толщинам слоёв аморфного кремния собственной проводимости, как с тыльной, так и с фронтальной стороны; толщинам слоёв p−типа проводимости с фронтальной стороны ФЭП; толщинам тыльных BSF – слоёв аморфного кремния n−типа проводимости.

После изготовления образцов проводились измерения электрических свойств по методикам измерения ВАХ и квантовой эффективности. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и квантовой эффективности проводились на установках производства компании «PV Measurements, Inc.» «IV-16L» и «QEX10», соответственно.

Для проведения исследований, также, была создана компьютерная модель фотоэлемента HIT. Была проведена оптимизация этой модели по разработанной методике. Для оптимизации компьютерной модели фотоэлемента HIT также использовался метод расчёта гетероперехода модели Андерсона и данные из литературных источников.

В результате исследований были изготовлены оптимизированные фотоэлементы HIT.

В данной главе приводятся методы, с помощью которых были исследованы и произведены гетеропереходные структуры.

2.1 Метод изготовление исследуемых структур

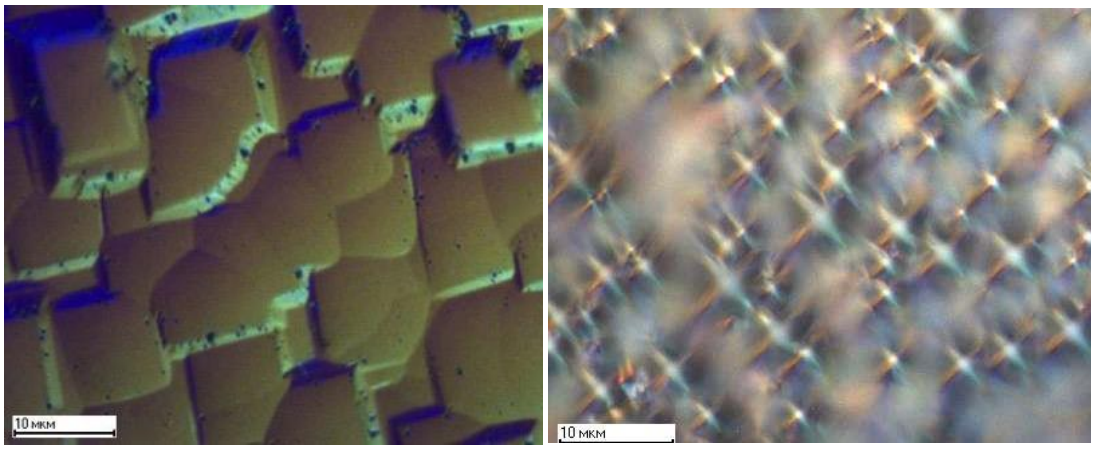
Большое влияние на финальные значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания оказывают первые этапы изготовления HIT−фотоэлемента, а именно, качество процедуры текстурирования пластин и подготовка поверхности для плазмохимического осаждения. Кремниевые монокристаллические пластины обладают нарушенным дефектным слоем на своей поверхности. Такой слой образуется при нарезании кремния в пластины. Для того чтобы избавится от дефектного поверхностного слоя, а также, от органических загрязнений, проводится химическая очистка пластин.

Очистка от органических загрязнений проводится в разбавленном растворе щёлочи и перекиси водорода в течение нескольких минут с концентрацией 1−2% KOH и 1−4% H_2O_2. В процессе очистки пластин при удалении загрязнения происходит разрушение перекиси водорода, необходимо поддерживать постоянную концентрацию H_2O_2, добавлять дополнительное количество H_2O_2 в раствор перед повторным использованием ванны с раствором. В данном процессе перекись водорода служит окислителем кремния, в результате чего образуется оксидная плёнка на поверхности кремниевой пластины. После чего оксидная плёнка стравливается в щелочном растворе.

Далее, для достижения высокой эффективности HIT–элемента, необходимо удалить поверхностные повреждения и микротрещины. Для удаления нарушенного слоя используется концентрированный раствор щёлочи KOH, при этом происходит удаление слоя кремния толщиной до десятка микрометров с каждой стороны пластины. Щёлочь образует оксидный слой кремния, а затем стравливает его с образованием $K_2SiO_3 + H_2O$.

Затем для очистки от загрязнений и увеличение гидрофильности поверхности повторяется стадия очистки с использованием 1–2% KOH и 1–4% H_2O_2. Стадия необходима для создания наиболее равномерной текстуры на поверхности подложки.

Для того чтобы добиться высоких значений тока короткого замыкания и квантовой эффективности необходимо добиться как можно меньшего отражения падающего на поверхность солнечного элемента света. Одним из путей уменьшения отражения света является текстуризация поверхности фотоэлемента, а именно — создание пирамидок на поверхности кремниевой монокристаллической пластины. Текстурирование поверхности обычно достигается путём анизотропного мокрого химического травления пластин кремния (100) в щелочных растворах, содержащих изопропиловый спирт (ИПС) в качестве текстурирующей добавки. ИПС добавляют к щелочному раствору, чтобы достичь однородности пирамид по всей поверхности пластины кремния путём модификации смачиваемости поверхности, при этом происходит контролируемое зарождение пирамидальной текстуры. В лабораторных исследованиях для создания пирамидальной поверхности используется раствор щёлочи KOH с коммерческой текстурирующей добавкой, в этом случае обработка проводится в течение нескольких минут. Фотография с оптического микроскопа после текстурирования показана на рисунке 2.1.



a) b)

a) поверхности кремниевой пластины после стадии удаления нарушенного слоя
b) после текстурирования и окончания процесса подготовки

Рисунок 2.1 – Фотографии, полученные с оптического микроскопа Nikon LV100D

После этапа текстурирования проводится удаление слоя оксида кремния и очистка от ионов металлов в поверхностном слое кремния. Для данного процесса используется раствор, содержащий 3% HF и 5% HCl при комнатной температуре.

Затем проводится обработка в растворе азотной кислоты при комнатной температуре. В результате происходит следующая реакция: $Si + 4HNO_3 = SiO_2 + 4NO_2 + 2H_2O$. Такая реакция окисляет кремний для дальнейшей его очистки при стравливании оксида.

Удаление слоя оксида кремния, пассивация поверхности водородом за счёт образования Si-H связей проводится в растворе плавиковой кислоты HF.

После каждой стадии проводится двухстадийная промывка в деионизованной воде. Процесс проводится в специализированных химически стойких ваннах.

После удаления оксидного слоя пластины отправляются в реактор для напыления плёнки аморфного кремния и создания HIT – структуры.

Одним из важнейших элементов дизайна в твёрдотельных фотоэлементах является p-n или p-i-n – переход, в котором и происходит генерация электрического заряда под действием солнечных лучей. В данной работе в качестве n–слоя использовалась коммерческая пластина кристаллического кремния, а i- и p–слои напылялись методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD). Метод заключается в разложении реакционных газов на радикалы при помощи газоразрядной плазмы. Сами реакционные газы приобретаются коммерческим путём, либо производятся на специальном оборудовании [87]. Далее происходит осаждение радикалов на поверхность подложки. В процессе осаждения подложка находится на нагретом держателе, где поддерживается температура 200^0C. На электроды в камере, которая заполнена реакционными и сопутствующими газами, подаётся высокочастотное напряжение. После зажигания ёмкостного разряда происходит разложение газовой смеси на электроны, ионы и радикалы. Далее ионы и радикалы осаждаются на подложку, где и происходит рост аморфной плёнки. В качестве альтернативного метода, для нанесения аморфных плёнок можно использовать магнетронное распыление. В работе [88] продемонстрирована установка, позволяющая регулировать скорость попадания ионов мишени на подложку изменением потенциала управляющего катода. При этом создаётся возможность для изменения скорости роста осаждаемой плёнки.

Последовательность осаждения слоёв аморфного кремния на поверхность кремниевой подложки проводилось методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) в следующей последовательности:

1) включение и прогрев установки;
2) удаление слоя оксида кремния с поверхности кремниевой пластины, образование на поверхности Si-H связей;
3) промывка кремниевых пластин в ДИ воде;
4) установка пластины на держатель загрузочной камеры установки;
5) откачка вакуума;

6) запуск рецепты;
7) перемещение пластины в рабочую камеру;
8) прогрев;
9) нанесение буферного (рабочие газы: SiH_4, CH_4, H_2; рабочая температура: 250°C) и собственного (нелегированного) слоя (рабочие газы: SiH_4, H_2; рабочая температура: 250°C) с фронтальной стороны в первой камере;
10) перемещение пластины в другую рабочую камеру;
11) нанесение слоя легированного аморфного кремния p-типа с использованием триметилбора в качестве легирующего газа (рабочие газы: SiH_4, C_3H_9B (TMB), H_2; рабочая температура: 250°C);
12) перемещение образца в загрузочную камеру;
13) напуск воздуха;
14) переворот кремниевой пластины;
15) повторение пунктов с 5 по 10;
16) нанесение слоя легированного аморфного кремния с проводимостью n^+-типа с использованием фосфина в качестве легирующего газа (рабочие газы: SiH_4, PH_3, H_2);
17) перемещение образца в загрузочную камеру;
18) напуск воздуха;
19) выгрузка полученного образца.

Для контроля качества пассивации поверхности кристаллической подложки после осаждения аморфных слоёв собственной проводимости отбираются несколько образцов. На этих образцах измеряется время жизни неосновных носителей заряда бесконтактным методом Синтона. Чем лучше пассивация поверхности кремниевой подложки, тем меньше рекомбинационных центров и ловушек, что ведёт к более большим значениям времени жизни неосновных носителей заряда в структуре.

Принцип работы прибора для бесконтактного измерения времени жизни ННЗ основан на электромагнитной индукции. Метод основан на измерении потерь высокочастотного (ВЧ) электромагнитного поля на вихревых токах, индуцируемых в исследованной полупроводниковой пластине. С целью измерения этих потерь создают LC высокодобротный колебательный контур. Катушка устанавливается ниже образца, а исследуемую полупроводниковую пластину помещают над катушкой индуктивности, в результате чего первичное ВЧ поле индуктивности наводит вихревые токи в полупроводниковом образце. Индуцированные таким образом вихревые токи создают своё ВЧ поле, которое уменьшает первичное ВЧ поле колебательного контура. Снижение напряжения на катушке линейно пропорционально проводимости материала пластин, при этом проводимость пропорциональна концентрации носителей заряда.

Вспышка ксеноновой лампы обеспечивает световой импульс, необходимый для создания фотоиндуцированных неравновесных носителей заряда. Эталонный фотоэлемент синхронизирует измерение фотопроводимости с интенсивностью светового импульса.

Для того чтобы растить аморфные плёнки с достаточно точными значениями толщины, производится настройка рецепта роста. Для этого на

стекле растят плёнки различной толщины, а затем производится измерение толщины выращенных плёнок. Высчитывается скорость роста плёнки при заданных параметрах: потока газов, давления в камере, частоты высокочастотного генератора. Затем в рецепте задаётся высчитанная скорость роста той или иной плёнки при указанных параметрах. Таким образом можно утверждать, что, следуя настроенным рецептам, можно вырастить аморфную плёнку нужной, указанной в рецепте толщины. Параметры полученных плёнок указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры полученных плёнок аморфного кремния собственного типа проводимости

Параметр	Среднее	Минимум	Максимум	Среднеквадратичное отклонение	Диапазон %
Толщина оксида (нм)	2.51	2.11	3.38	0.21	2.54
Толщина a-Si (нм)	43.45	37.17	47.72	2.75	1.21
Eg, эВ	1.7082	1.7001	1.7285	0.0052	0.8298
n a-Si при 500 нм	4.6685	4.6461	4.7127	0.0133	0.7136
k a-Si при 500 нм	0.5572	0.5531	0.5659	0.0027	1.1517

Измерения толщины, нанесённой на стекло аморфной плёнки производилось на эллипсометре «AccuMap-SE V1500». Для вычисления толщины плёнки использовался режим работы эллипсометра, в котором измерения делаются по площади образца. Вычисления параметров проводились при помощи модели Таук-Лоренца. На рисунке 2.2 изображена картина распределения толщины наносимой плёнки в зависимости от ее положения на держателе образцов. На рисунке по оси абсцисс и координат отложено геометрическое расстояние в сантиметрах, а толщина плёнки показана разным цветом. Среднеквадратичное отклонение распределения толщины плёнки после её осаждения, в центральной части камеры составляет 9%, а погрешность — ±3,4%.

Одним из методов уменьшения отражения падающего на фотоэлемент света является использование оксидной проводящей антиотражающей плёнки (TCO). В исследуемых гетеропереходных HIT фотоэлементах в качестве такой плёнки использовался оксид индия-олова (ITO). Для получения тонких плёнок оксида индия–олова чаще всего применяется метод магнетронного реактивного распыления мишени ITO, а в качестве реактивного газа применяется кислород, который должен улучшать оптические свойства получаемых плёнок. В данной работе плёнки ITO наносились на лабораторной установке магнетронного реактивного распыления Oxford Instruments PlasmaPro 400 и на установке фирмы IZOVAC.

Осаждение фронтальных и тыльных слоёв ITO производится при различных рабочих температурах, мощностях разряда и времени напыления. В общей сложности было изготовлено свыше 20 гетеропереходных кремниевых солнечных элементов.

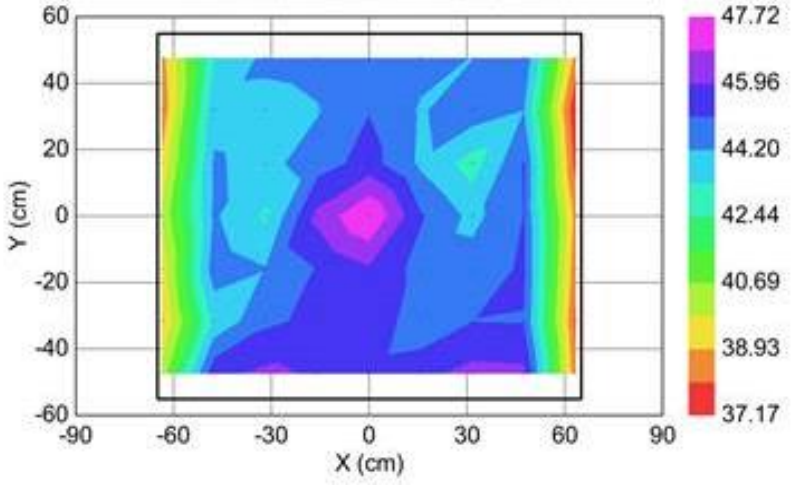


Рисунок 2.2 – Распределение толщины наносимой плёнки в зависимости от положения на держателе образцов

Альтернативой плёнкам оксиду индия-олова осаждаемым методом магнетронного распыления, так же могут быть плёнки оксида цинка (ZnO), получаемые золь-гель методом. В работах [89,90] показана возможность изменения оптических свойств плёнки оксида цинка, в зависимости от концентрации дигидрата ацетата цинка в образующем растворе (рисунок 2.3).

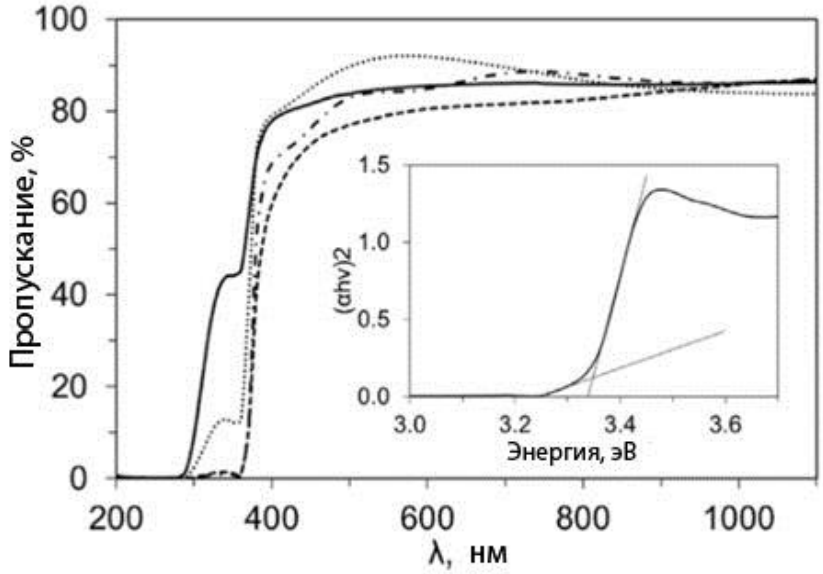


Рисунок 2.3 – Спектры пропускания тонких плёнок ZnO, выращенных на стекле из растворов с различными концентрациями дигидрата ацетата цинка: 0,1 М — сплошная линия, 0,3 М — пунктирная линия, 0,5 М — пунктирная линия, 0,7 М — штрихпунктирная линия. Спектры измерялись при комнатной температуре [89, p. 159]

Все полученные пленки оксида цинка демонстрируют высокую прозрачность ~ 85% в диапазоне длин волн ~ 350-2500 нм. Наибольшая прозрачность ~ 90% в диапазоне 400–700 нм наблюдается для плёнки, осажденной из раствора 0,3 моль / л.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что идея использование оксида цинка в качестве ТСО имеет право на существование. Однако, на сегодняшний день одной из самых отработанных и стабильных технологий нанесения ТСО слоя на HIT структуру является использование оксида индия-олова методом магнетронного распыления.

Важной составляющей фотоэлемента являются контакты, а также дизайн их технологии. Важно, чтобы контакты смогли как можно больше собирать на себя заряд, но при этом как можно меньше занимать площади на поверхности фотоэлемента. Одним из удачных дизайнерских и технологичных решений являются контакты типа «Smart wire». «Smart wire» представляет собой контактную сетку, покрывающую всю поверхность солнечного элемента, без использования «Busbar» в центральной области элемента. Контакты наносились методом трафаретной печати с использованием коммерческой серебросодержащей пасты.

2.2 Методы измерения характеристик исследуемых структур

Вольт–амперные характеристики изготовленных структур измерялись при помощи установки для измерения ВАХ IV-16L компании «PV Measurements, Inc.». Установка IV-16L оснащена двумя типами измерительных контактов: 1) так называемыми «зондами Кельвина» и 2) специализированными измерительными планками. Фотоэлементы с контактами по технологии «SMART WIRE» измеряются при помощи дополнительно приобретённому к этому оборудованию столику.

Снятие световых ВАХ проводилось при освещении солнечных элементов излучением имитатора солнца класса ААА со спектром, максимально приближенным к стандартному спектру AM1.5 и интенсивностью 1000 Вт/м^2 (определяемой как «1 Sun») при температуре измерительного столика 25°С. Помимо световых ВАХ, с солнечных элементов снимались ВАХ при интенсивности 0,5 Sun (500 Вт/м^2), а также темновые ВАХ.

Вольт-амперная характеристика фотоэлемента — это суперпозиция вольт-амперной характеристики в темноте и светового тока солнечного элемента. При освещении светом фотоэлемента ВАХ смещается в четвертую координатную четверть. Уравнение вольт–амперной характеристики фотоэлемента при освещении имеет вид:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] - I_L, \qquad (2.1)$$

где I_L — световой ток, n — коэффициент идеальности.

Ток короткого замыкания — это ток, протекающий через солнечный элемент, когда напряжение равно нулю. Ток короткого замыкания зависит от

генерации и разделения электронно-дырочных пар в области p-n–перехода. Поэтому ток короткого замыкания зависит от таких параметров как: площадь солнечного элемента, число падающих на фотоэлемент фотонов, спектра падающего излучения, оптических потерь солнечного элемента (отражение и поглощение света), вероятность разделения электронно-дырочных пар.

Напряжение холостого хода — это максимальное напряжение, возникающее при нулевом токе. Если в уравнение (2.1) положить $I = 0$, то

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln(\frac{I_L}{I_0} + 1). \quad (2.2)$$

Из уравнения (2) видно, что напряжение холостого хода зависит от светового тока и тока насыщения солнечного элемента, который зависит от рекомбинации носителей заряда в фотоэлементе. Поэтому напряжение холостого хода характеризует рекомбинацию в полупроводниковом приборе.

Коэффициент заполнения солнечного элемента (FF) является мерой квадратичности вольт-амперной кривой и определяется формулой:

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}. \quad (2.3)$$

Если в уравнение (3) подставить уравнения (1) и (2), то можно заметить, что FF зависит от коэффициента идеальности n. Величина коэффициента идеальности зависит от качества p-n − перехода и говорит о виде рекомбинации в СЭ. Коэффициент идеальности может принимать значения от 1-го до 2-х.

КПД солнечного элемента определяется как отношение вырабатываемой мощности солнечного элемента к мощности падающего солнечного излучения. Максимальная мощность фотоэлемента выражается следующим образом:

$$P_{max} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}}. \quad (2.4)$$

Так как мощность фотоэлемента зависит от таких параметров как коэффициент заполнения, напряжения холостого хода и ток короткого замыкания, то эти параметры являются основными характеризующими параметрами фотоэлемента.

Методика измерения квантовой эффективности ФЭП (отношения количества генерируемых носителей, которые были преобразованы в зафиксированный электронно-дырочный ток, к количеству фотонов света, падающего на поверхность ФЭП) заключается в следующем. Образец кладётся на измерительный столик, который позволяет подвести металлические контакты для измерения тока к исследуемому образцу. После подвода контактов образец освещается монохроматическим светом с разными длинами волн, которые охватывают диапазон поглощения электромагнитных волн исследуемого материала. При попадании ЭМВ на ФЭП генерируются

электронно-дырочные пары, которые детектируются после попадания во внешнюю сеть. Затем рассчитывается квантовая эффективность.

Измерение спектров квантовой эффективности изготовленных структур проводилось на установке QEX10 компании «PV Measurements, Inc.». Размер светового пучка при измерении квантовой эффективности был равен приближенно 5 мм^2. Во время измерений пучок помещался на незатененную часть солнечного элемента между контактными дорожками. Значение квантовой эффективности измерялось при длинах волн падающего излучения от 300 нм до 1100 нм.

Квантовая эффективность показывает отношение количества падающего света на образец к количеству взаимодействующего с образцом света. Внутренняя квантовая эффективность показывает отношение попавших на образец фотонов к числу сгенерированных электронно-дырочных пар.

Квантовая эффективность идеальных ФЭП имеет квадратную форму, но для реальных ФЭП она искажена вследствие влияния рекомбинации.

Параллельным этапом эксперимента являлся поиск оптимальных параметров фотоэлементов HIT методом компьютерного моделирования.

2.3 Метод моделирования фотоэлемента структуры HIT

Моделирование солнечных элементов для определения основных факторов, влияющих на их эффективность, осуществлялось на основе программных пакетов «PC1D» и «AFORS-HET». В частности, были смоделированы как стандартные солнечные фотоэлементы на основе кристаллического кремния, так и аморфные кремниевые солнечные элементы, и элементы на основе гетероперехода «аморфный кремний - кристаллический кремний».

Значительным достижениям в фотовольтаике последнее время способствовало сильное фундаментальное понимание свойств материалов и возможность тонкой настройки их структуры с использованием методов моделирования. Среди наиболее широко используемых и легкодоступных пакетов — AFORS-HET и PC1D [91,92]. Более ранние исследования с использованием этих программ были сфокусированы моделировании работы TCO слоя и влияния его на характеристики ФЭП [93,94]. Так же исследовалось влияния p^+ инверсионного слоя на гетеропереход «кристаллический кремний-аморфный кремний» [95]. В работе [96] показана роль положения уровня Ферми в легированных a-Si: H и смещения энергетических уровней на границе a-Si: H / c-Si.

Оба программных пакета позволяют автоматически оптимизировать параметры изготовления устройства, такие как толщина слоя и легирование. Например, в работах [97,98] используется метод компьютерного моделирования для оптимизации функциональных слоёв в перовскитных фотоэлектрических приборах. Для проведения модельных расчётов были использованы параметры функциональных слоёв, включая диоксид титана (TiO_2) — полупроводниковый слой n-типа проводимости, $CH_3NH_3PbI_3$ — светопоглощающий слой, Spiro-OMeTAD — полупроводник p-типа

проводимости. В результате компьютерного моделирования удалось получить оптимизированную модель фотоэлектрического прибора с эффективностью 17,11%. Однако, данный метод оптимизации занимал значительное количество времени и, в используемой в работе [98, стр. 196] технологии производства перовскитных солнечных элементов, изготовить ячейку с предсказанными оптимальными параметрами было затруднительно. Поэтому для эффективного применения компьютерного моделирования в исследовании гетеропереходных фотоэлементов структуры HIT требуется комплексный подход к методу оптимизации функциональных слоёв фотоэлементов.

При разработке новых фотоэлектронных приборов или компьютерному моделированию фотоэлементов, которые обладают сложной гетеропереходной структурой из нескольких активных слоёв могут возникнуть сложности с множеством численных расчётов производимых с использованием компьютерных мощностей. Это приводит к значительному времени, затрачиваемому как во время моделирования, так и во время лабораторных работ при поиске диапазонов оптимальных параметров исследуемых моделируемых приборов. В современных программных пакетах реализована возможность вычислений моделируемых систем при заданном диапазоне параметров, что значительно уменьшает время расчётов. Однако, при сложных многослойных системах время вычислений остаётся очень большим и в конечном итоге различный алгоритм выбора диапазона исследуемых параметров может давать различные результаты. В этом разделе продемонстрирован подход, в котором поиск исследуемых диапазонов в толщине слоя и легировании в многослойных солнечных элементах осуществляется с помощью более простых систем. В качестве модельной системы используется стандартный солнечный элемент HIT со структурой: p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-a-Si:H/i-a-Si:H/n-a-Si:H (рисунок 2.4).

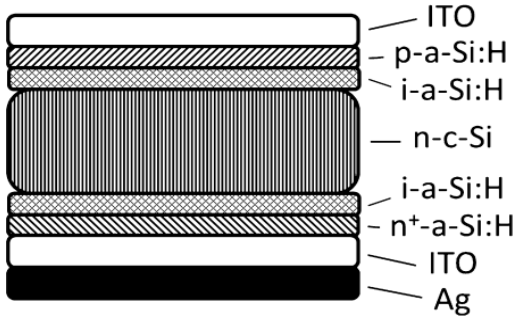


Рисунок 2.4 – Схематическая структура солнечного элемента гетероперехoдного кремния (HIT)

Поиск эффективного алгоритма оптимизации такой сложной многослойной системы требует знания относительного влияния параметров изготовления на производительность результирующего устройства. Это можно измерить как отношение максимальных и минимальных значений эффективности ячейки при изменении каждого параметра изготовления $R = Eff_{max} / Eff_{min}$.

Точная настройка сложной структуры HIT изначально требует рассмотрения более широких диапазонов изменения параметров. Однако, это приводит к нестабильности программы для ряда тестируемых параметров и остановке вычислений. Чтобы преодолеть эту проблему сложную структуру HIT разделили на три более простые структуры, а именно:

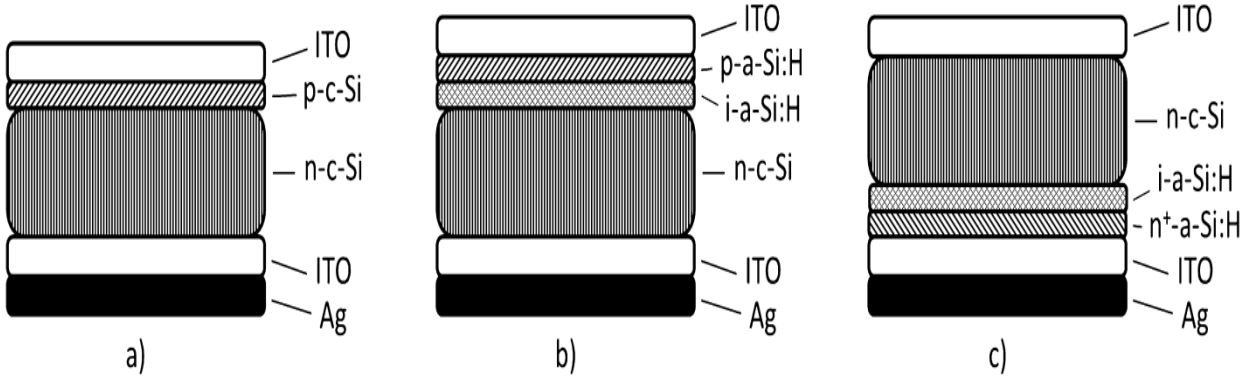
a) p-c-Si/n-c-Si (рисунок 2.5 – a),

b) p-a-Si:H/i-a-Si:H/c-Si (рисунок 2.5 – b),

c) n-c-Si/i-a-Si:H/n+-a-Si:H (рисунок 2.5 – c).

Внешние контакты в этих устройствах считаются омическими.

Моделирование проводилось с использованием AFORS-HET, который оптимизирован для моделирования аморфных слоёв в таких устройствах. Помимо создания модели фотоэлемента, программа также может и имитировать измерения различных оптических и электрических методов исследования гетероструктур (ВАХ, импеданс-спектроскопия, спектроскопия глубоких уровней, измерение квантовой эффективности и другие). Кроме того, в программе есть возможность выбирать различные параметры, которые должны соответствовать методам измерений. Например, можно задать верхний контакт как «метал-полупроводник» или «метал-оксид-полупроводник».



a) Ячейка 1 - основанная на apc Si / nc Si-соединении, b) ячейка 2 - основанная на a-Si: H / i-a Si: H / nc -Si-соединение, c) ячейка 3 - на основе ac Si / ia Si: H / n + a Si: H-переход

Рисунок 2.5 – Схематические структуры основных структур кремниевых солнечных элементов

Для моделирования оптических и электрических свойств солнечного элемента используются одномерные уравнения, а именно уравнения Пуассона (2.5) и уравнения непрерывности для электронов (2.6) и дырок (2.7). Данные уравнения могут быть решены с помощью граничных условий.

Уравнение Пуассона в декартовой системе координат

$$\nabla^2 \varphi = f \ , \tag{2.5}$$

где ∇ — оператор набла, f — вещественная или комплексная функция на некотором многообразии.

Уравнения непрерывности для электронов и дырок

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p-p_0}{\tau_p} + D_p \frac{d^2p}{dx^2} - \mu_p E \frac{dp}{dx} - p\mu_p \frac{dE}{dx} \ , \quad (2.6)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n-n_0}{\tau_n} + D_n \frac{d^2n}{dx^2} - \mu_n E \frac{dn}{dx} - n\mu_n \frac{dE}{dx} \ , \quad (2.7)$$

где τ_p — время жизни дырок, τ_n — время жизни электронов, E — напряжённость электрического поля, D_p — коэффициент диффузии дырок, D_n — коэффициент диффузии электронов, μ_p — подвижность дырок, μ_n — подвижность электронов, n — концентрация электронов, p — концентрация дырок, n_0 — концентрация электронов в равновесном состоянии, p_0 — концентрация дырок в равновесном состоянии.

Оптические модели рассчитываются при помощи закона Бугера — Ламберта — Бера (2.8), в котором учитываются морфология поверхности структуры, а также внутренние отражения, когерентность и не когерентность света [99].

Закон Бугера — Ламберта — Бера выражается формулой

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l} \ , \quad (2.8)$$

где $I(l)$ — интенсивность света, прошедшего слой материала толщиной l, I_0 — интенсивность света на входе в материал, k_λ — показатель поглощения.

В созданной модели учитывались различные модели рекомбинации носителей заряда, такие как: излучательная рекомбинация, Оже-рекомбинация, рекомбинация Шокли — Рида — Холла. Исходя из вышесказанного, AFORS-HET отлично подходит для моделирования фотоэлементов и симуляции их свойств, включая энергетические уровни, квазиуровни Ферми, генерацию и рекомбинацию носителей заряда, токи и фазовые сдвиги. В процессе моделирования возможны изменения параметров материала и внешней среды, что даёт возможность сделать модель максимально приближённой к реальности [97, стр. 52; 100, 101].

2.4 Метод компьютерной оптимизации фотоэлемента HIT

2.4.1 Изучение влияния параметров изготовления на характеристики структуры p-c-Si / n-c-Si (ФЭП 1)

Рассмотрим простую структуру p-Si/n-Si-перехода со следующими начальными параметрами: толщина слоя p-Si – 0,1 мкм, толщина n-слоя – 300 мкм, концентрация акцепторов в слое p-Si – 1×10^{19} см$^{-3}$, концентрация доноров в n-типе Si – $1{,}5 \times 10^{16}$ см$^{-3}$. Поверхностные скорости рекомбинации для кремниевой пластины были выбраны равными 10^3 см·с$^{-1}$, что является разумным приближением для случая пассивированной поверхности. Для сравнения, расчёты повторялись для не пассивированной пластины со скоростью поверхностной рекомбинации 10^7 см·с$^{-1}$. Эти значения представляют

собой параметры, используемые в литературных источниках по изготовлению кристаллических кремниевых солнечных элементов [102].

Эффективность смоделированного солнечного элемента (ФЭП 1) равна 24,62%, ток короткого замыкания 40,48 мА/см^2, напряжение открытой цепи 0,7261 В, коэффициент заполнения 0,837.

Наиболее очевидными параметрами, влияющими на производительность в этом устройстве, являются:

1) толщина монокристаллического слоя c-Si n-типа проводимости;

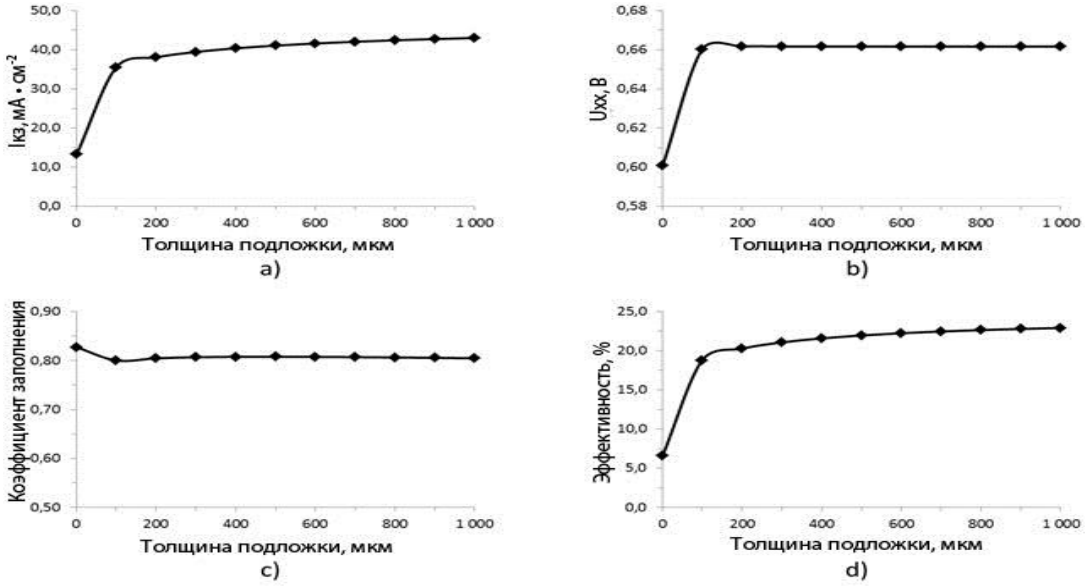
2) легирование монокристаллического слоя c-Si n-типа проводимости;

3) толщина слоя эмиттера c-Si p-типа проводимости;

4) легирование слоя эмиттера c-Si p-типа проводимости.

Последние два параметра несущественны для рассмотрения устройств HIT из-за отсутствия собственного слоя a-Si: H между n-Si и p-Si в ФЭП 1, поэтому опустим шаги оптимизации ФЭП 1 с использованием этих двух параметров.

Для оптимизации характеристик кристаллического p-n-переходного устройства с использованием толщины пластины был выбран широкий диапазон от 1 до 1000 мкм. Характеристики имитируемого устройства, включая плотность тока короткого замыкания ($I_{кз}$, J_{SC}), напряжение холостого хода (U_{xx}, V_{OC}), коэффициент заполнения (Fill Factor, FF) и эффективность преобразования энергии (КПД, PCE), можно увидеть на рисунке 2.6.

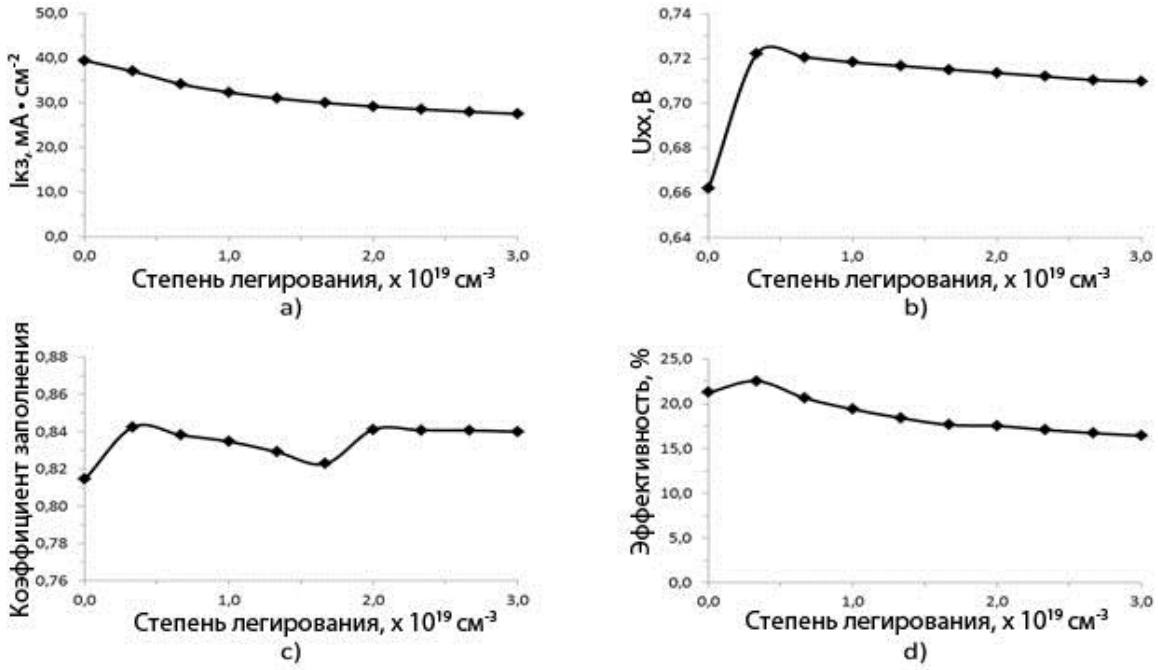


a) зависимость плотности тока короткого замыкания ($I_{кз}$) от толщины кремниевой пластины, b) зависимость напряжения холостого хода (U_{xx}) от толщины кремниевой пластины, c) зависимость фактора заполнения от толщины кремниевой пластины и d) зависимость эффективности (КПД) ФЭП от толщины кремниевой пластины

Рисунок 2.6 - Влияние толщины пластины n-типа c-Si в ФЭП 1 на выходные электрические характеристики

Ток короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжение холостого хода U_{xx} возрастают с толщиной кристаллического слоя n–типа проводимости вплоть до значения толщины 100 мкм (рисунок 2.6 – a,b), тогда как величина FF остаётся неизменной (рисунок 2.6 – c). Эффективность ФЭП 1 повышается с 6,61% при 1 мкм до 22,92% при 1000 мкм (рисунок 2.6 – d). Таким образом, изменение толщины пластины приводит к соотношению максимальной эффективности к минимальной эффективности R = 3,47.

Оптимизация кристаллического p-n-переходного устройства посредством легирования пластины проводилась в диапазоне от $1{,}5 \times 10^{16}$ $см^{-3}$ до $2{,}8 \times 10^{19}$ $см^{-3}$ (рисунок 2.7). Последнее значение представляет собой эффективную плотность состояний зоны проводимости в кремнии, которая и ограничивает концентрацию легирования [103].



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от степени легирования c-Si, b) зависимость напряжения холостого хода от степени легирования c-Si, c) зависимость фактора заполнения от степени легирования c-Si и d) зависимость эффективности ФЭП от степени легирования c-Si

Рисунок 2.7 – Влияние степени легирования донором n–типа c-Si в ФЭП 1 на выходные электрические характеристики

В широком диапазоне, увеличение степени легирования приводит к снижению выходных значений фотоэлементов. В основном это связано с падением тока короткого замыкания J_{SC} (рисунок 2.7 – a), в то время как форм-фактор FF остаётся неизменным (рисунок 2.7 – c). Во всем диапазоне оптимизации эффективность устройства варьируется от 16,43% до 22,55% (рисунок 2.7 – d), что приводит к значению R = 1,37.

2.4.2 Изучение влияния параметров изготовления, влияющих на характеристики структуры p: Si: H / i a Si: H / n-c-Si (ФЭП 2)

Теперь рассмотрим структуру a-Si:-H / i-a-Si:H / n-c-Si со следующими начальными параметрами: толщина слоя p-a-Si: H (эмиттер) – 10 нм, толщина i-a-Si: H слоя – 10 нм, толщина кристаллической пластины n–типа – 300 мкм, концентрация акцепторов в слое эмиттера – $7{,}47 \times 10^{19}$ $см^{-3}$, концентрация доноров в подложке – $1{,}5 \times 10^{16}$ $см^{-3}$. Предполагается, что подвижность электронов и дырок в аморфном кремнии $\mu_n = 20$ $см^2$ / В·с и $\mu_p = 5$ $см^2$ / В·с. Поверхностные скорости рекомбинации для кремниевой пластины были выбраны равными 10^3 $см \cdot с^{-1}$, что является разумным приближением для случая пассивированной поверхности. Для сравнения, расчёты повторялись для непассивированной пластины с частотой поверхностной рекомбинации 10^7 $см \cdot с^{-1}$.

При помощи данной структуры исследовалось влияние таких факторов как толщина эмиттерного слоя, толщина слоя аморфного кремния собственной проводимости и легирование эмиттерного слоя.

Параметры, влияющие на производительность в этом устройстве, включают:

— толщина слоя a-Si:H i–типа проводимости;

— толщина аморфного слоя a-Si-H p–типа проводимости;

— легирование аморфного слоя a-Si-H p–типа проводимости;

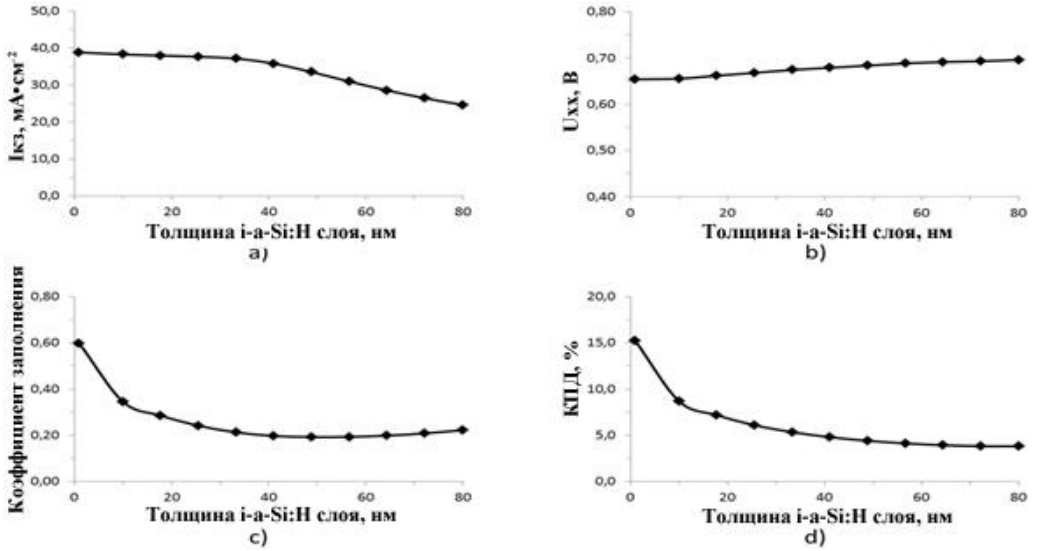
— толщина монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости;

— легирование монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости.

Последние два параметра уже рассмотрены для случая соединения p-c-Si / n-c-Si, поэтому в этом случае мы можем опустить оптимизацию устройства с использованием этих двух параметров.

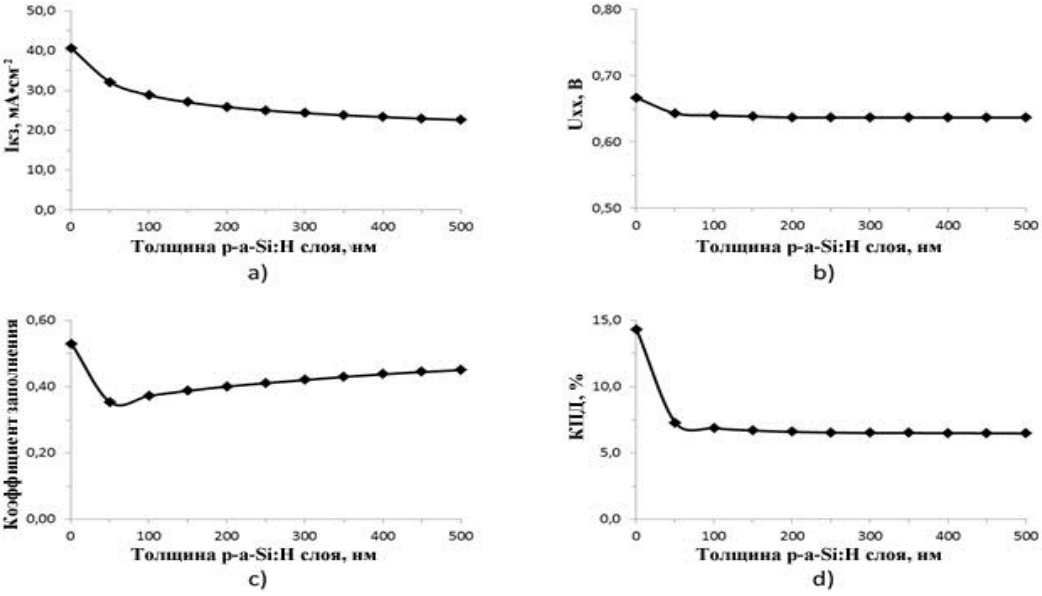
Оптимизация структуры ФЭП 2 путём изменения толщины внутреннего слоя аморфного кремния проводилась в диапазоне от 1 до 80 нм (рисунок 2.8). Как видно на рисунке 2.8 – d, до 80 нм эффективность устройства остаётся практически постоянной и не демонстрирует существенных изменений.

Наивысшее значение эффективности 15,23% демонстрируется при значении толщины собственного аморфного слоя 1 нм, снижаясь до 3,82% при 80 нм (рисунок 2.8 – d). Результаты показывают, что с увеличением толщины внутреннего слоя эффективность снижается, что сопровождается падением тока короткого замыкания и фактора заполнения, тогда как напряжение холостого хода повышается (рисунок 2.8 – a,b,c). Это согласуется с увеличением последовательного сопротивления устройства из-за более толстого внутреннего аморфного слоя. В то же время увеличение разделения между n– и p–легированными слоями в устройстве может привести к уменьшению рекомбинации носителей заряда, следовательно, увеличивается значение напряжения холостого хода. Отношение максимального и минимального значений эффективности в этом случае равно R = 3.98.



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от толщины i-слоя аморфного кремния, b) зависимость напряжения холостого хода от толщины i-слоя аморфного кремния, c) зависимость фактора заполнения от толщины i-слоя аморфного кремния и d) зависимость эффективности ФЭП от толщины i-слоя аморфного кремния

Рисунок 2.8 – Влияние толщины слоя i–типа a-Si: H в ФЭП 2 на выходные характеристики

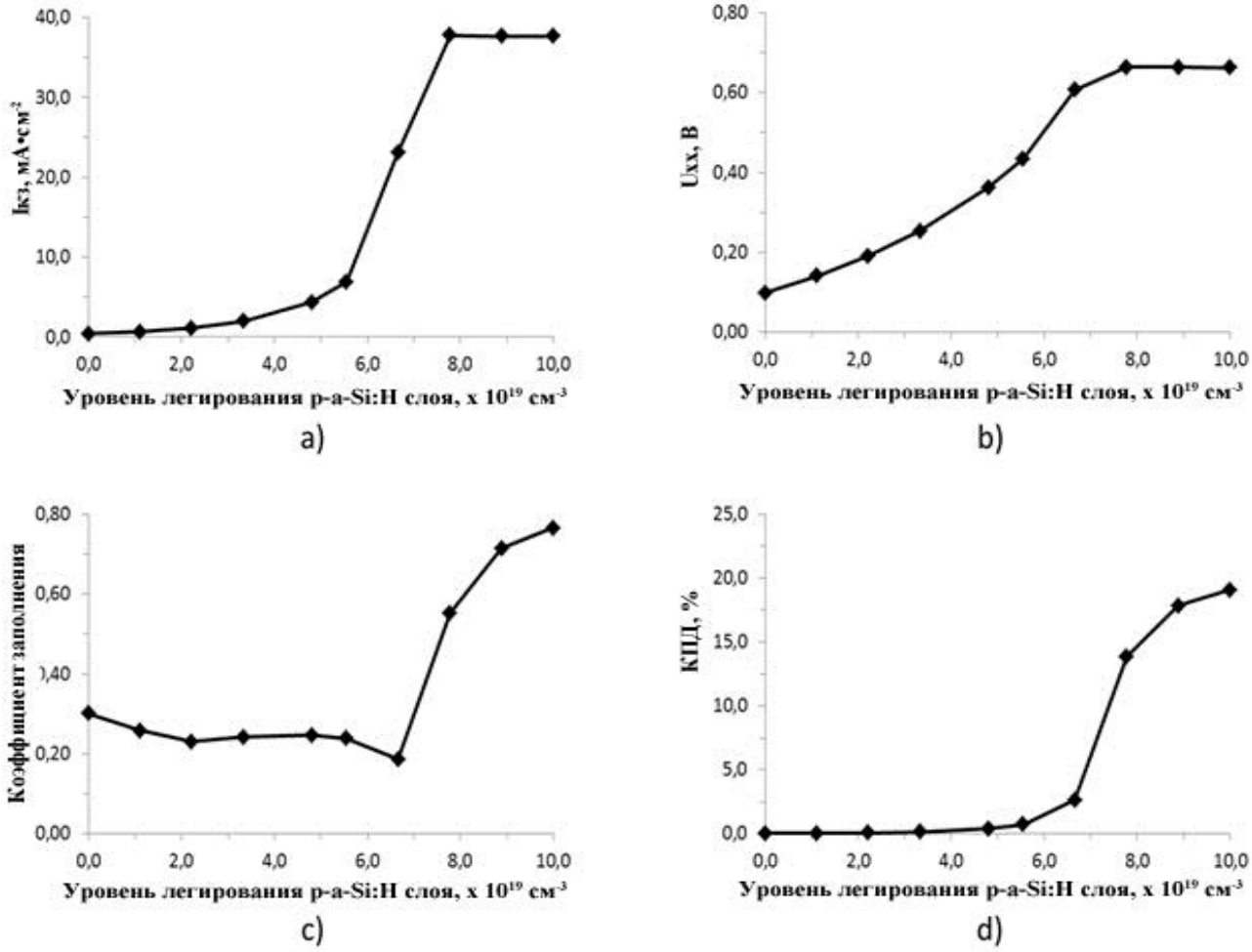


a) зависимость плотности тока короткого замыкания от толщины p–слоя аморфного кремния, b) зависимость напряжения холостого хода от толщины p–слоя аморфного кремния, c) зависимость фактора заполнения от толщины p–слоя аморфного кремния и d) зависимость эффективности ФЭП от толщины p–слоя аморфного кремния

Рисунок 2.9 – Влияние толщины слоя эмиттера a-Si: H в ФЭП 2 на выходные характеристики

Влияние толщины слоя эмиттера на производительность ФЭП 2 показано на рисунке 2.9. Толщина эмиттера варьировалась от 1 до 500 нм. Эффективность монотонно уменьшается от 1 нм, что в основном зависит от уменьшения значений напряжения холостого хода и тока короткого замыкания (рисунок 2.9 – a,b), тогда как коэффициент заполнения медленно возрастает почти на всём диапазоне толщин после резкого падения между 1 нм и 50 нм (рисунок 2.9 – c). Значение R в этом случае равно 1,74.

Было показано, что легирование p-типа Si-H–эмиттерным слоем является одним из самых сильных факторов, влияющих на производительность устройства (рисунок 2.10).



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от концентрации легирования p–слоя аморфного кремния, b) зависимость напряжения холостого хода от концентрации легирования p–слоя аморфного кремния, c) зависимость фактора заполнения от концентрации легирования p–слоя аморфного кремния и d) зависимость эффективности ФЭП от концентрации легирования p–слоя аморфного кремния

Рисунок 2.10 – Влияние легирования слоя a-Si: H–эмиттера p–типа в ФЭП 2 на выходные характеристики

Изменение легирования проводилось в диапазоне от 1×10^{16} $см^{-3}$ до 1×10^{20} $см^{-3}$, что приблизительно соответствует эффективной плотности зоны проводимости состояний в аморфном кремнии. Это согласуется с экспериментальными значениями концентраций бора в плёнках аморфного кремния p-типа ~ 5×10^{20} $см^{-3}$ и в нанокристаллических плёнках Si: H p-типа ~ 7×10^{19} $см^{-3}$ [104,105]. Эффективность ФЭП имеет быстрый рост между 6×10^{19} $см^{-3}$ и 8×10^{19} $см^{-3}$ от значений, близких к нулю, до 15%, достигая максимума 19,1% при плотности 1×10^{20} $см^{-3}$. Дальнейшее увеличение степени легирования не привело к каким-либо изменениям эффективности. По всему диапазону вариаций легирования значение R оказалось равным 1539,52.

2.4.3 Изучение влияния параметров изготовления, влияющих на характеристики структуры n-a-Si:H/i-a-Si:H/n^+-a-Si:H (Структура 3)

Известно, что структура i-n^+, осаждённая на задней поверхности солнечного элемента, на основе структуры HIT, создаёт запирающее поле в тыльной части ячейки, что уменьшает поток дырок в направлении заднего электрода и, следовательно, рекомбинацию. Этот эффект можно увидеть в n a-Si:H/i-a-Si:H/n+ a-Si:H переходе (ФЭП 3), который был смоделирован со следующими параметрами: толщина кристаллической пластины n-типа – 300 мкм, концентрация доноров в подложке - $1{,}5 \times 10^{16}$ $см^{-3}$, толщина слоя i-a-Si: H – 3 нм, толщина слоя n^+ – 5 нм, концентрация доноров в n^+ слое – 1×10^{19} $см^{-3}$.

Параметры, влияющие на производительность в этом устройстве, включают:

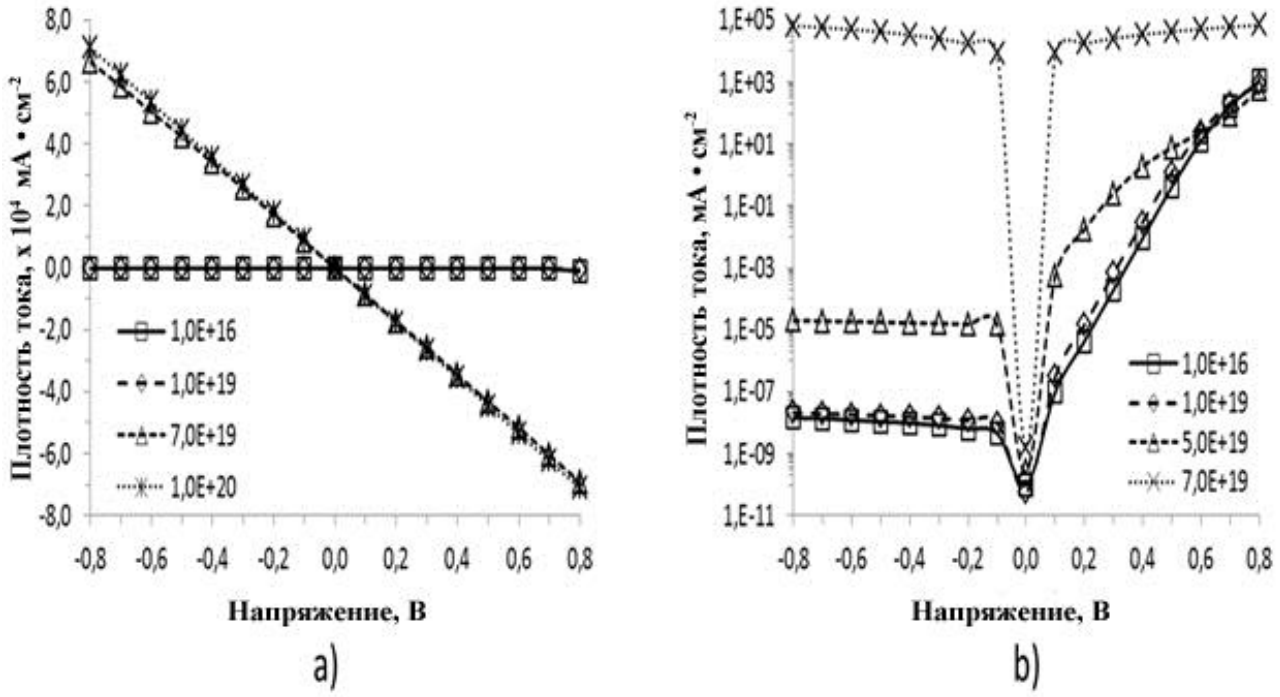
— легирование тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+ – типа проводимости;

— толщина тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+ – типа проводимости;

— толщина тыльного слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости.

Несмотря на то, что структура на основе n-i-n^+-перехода с начальными параметрами генерирует свободные носители при освещении, направление тока в ней протекает противоположно направлению в устройстве HIT. Поэтому улучшение этого перехода с целью оптимизации устройства HIT должно быть сосредоточено на обеспечении того, чтобы он создавал омический контакт для переноса электронов, разделённых p-i-n-переходом к заднему электроду ФЭП HIT. На рисунке 2.11 показаны темновые ВАХ n-i-n^+ – перехода при изменении степени уровня легирования n^+-слоем от 1×10^{16} $см^{-3}$ до 1×10^{20} $см^{-3}$. На графиках рисунка 2.11 ось ординат соответствует току, а ось абсцисс – напряжению.

Из рисунка 2.11 видно, что до уровня легирования около 1×10^{19} $см^{-3}$ n-i-n^+ – переход представляет собой диод. Дальнейшее увеличение легирования приводит к изменению кривой ВАХ, что эквивалентно омическому контакту. Этот переход происходит в диапазоне от 1×10^{19} $см^{-3}$ до 7×10^{19} $см^{-3}$.



a) линейная шкала, b) логарифмическая шкала

Рисунок 2.11 – Влияние легирования n + -типом a-Si: H на темновые ВАХ структуры 3

На рисунке 2.12 показана эволюция изгиба кривой энергии в структуре n-i-n^+ при увеличении легирования в слое n^+. На графиках рисунка 2.12 по оси ординат отложена шкала энергий, а ось абсцисс соответствует расстоянию в микрометрах, которое отсчитывается от фронтальной части фотоэлемента. По мере увеличения концентрации примесей в заднем слое изгиб кривой уменьшается, что приводит к ситуации с плоской полосой при 7×10^{19} $см^{-3}$. Это эквивалентно образованию омического контакта. Дальнейшее увеличение концентрации не приводит к каким-либо изменениям формы кривой ВАХ. Поэтому представляется, что легирование n^+-типа тыльного слоя Si: H непосредственно не влияет на эффективность ФЭП HIT с точки зрения генерации заряда, но влияет на него как структура проводящая основные носители заряда из фотоэлемента на внешний контакт. При этом структура является барьеров для неосновных носителей заряда и ток не проводит. Для достижения омического контакта для основных носителей заряда требуется превышение определённого порогового значения степени легирования, в данном случае около 7×10^{19} $см^{-3}$. Исходя из этого анализа можно предположить, что аналогичным образом роль таких факторов, как толщина n^+-типа слоя Si: H и толщины слоя i-типа Si: H заключается в обеспечении омического контакта для беспрепятственного переноса основных носителей (электронов) из пластины n-типа на внешний контакт. Именно поэтому запирающий слой должен иметь необходимо большой уровень легирования.

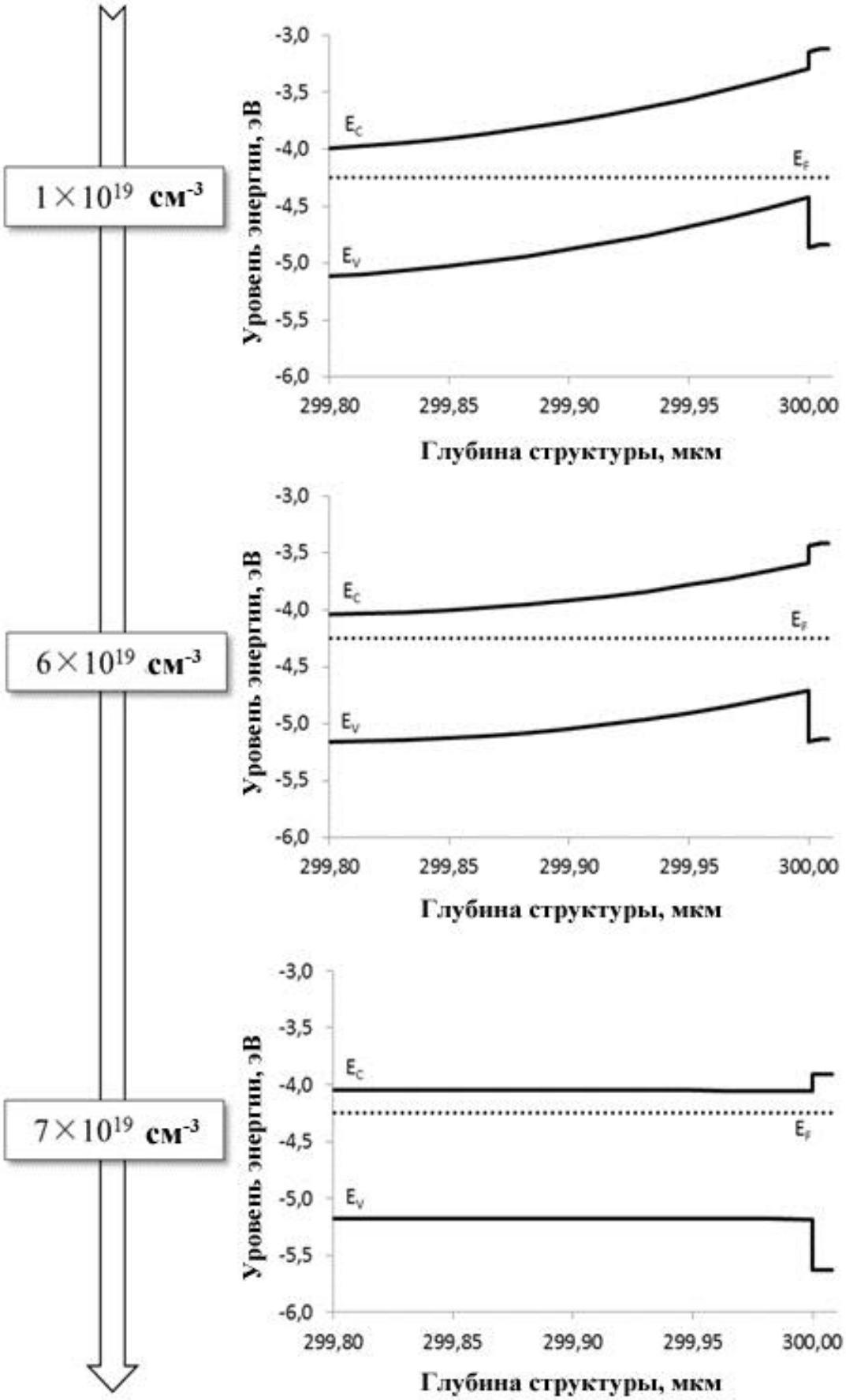


Рисунок 2.12 – Эволюция искривления энергетических зон в n / i / n^+-переходе в зависимости от уровня легирования в n^+слое

Основываясь на приведённых выше результатах моделирования с использованием упрощённых структур солнечных элементов, можно оценить уровень влияния каждого из параметров изготовления на эффективность более сложного солнечного элемента структуры HIT. Значения $R = Eff_{max} / Eff_{min}$ для каждого из рассмотренных параметров приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Оценка параметров изготовления, влияющих на работу солнечных элементов

Параметр изготовления	Влияние параметров, R
легирование p-типа эмиттерного слоя a-Si:H	1539,52
толщина фронтального слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости	3,98
толщина монокристаллической подложки c-Si n-типа проводимости	3,47
толщина аморфного слоя a-Si:H p-типа проводимости	1,74
легирование монокристаллической подложки c-Si n-типа проводимости	1,37
легирование тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+-типа проводимости	должен превышать пороговое значение для формирования омического контакта
толщина тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+ –типа проводимости	должен привести к омическому заднему контакту
толщина тыльного слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости	должен привести к омическому заднему контакту, обеспечить необходимую пассивацию поверхностных состояний

2.5 Метод расчёта слоёв Шоттки в структуре HIT

Представленный метод компьютерной оптимизации гетеропереходного солнечного элемента структуры HIT имеет свои недостатки. Один из таких недостатков — это то, что программа не учитывает изменение электрических полей в зависимости от толщины слоя объёмного заряда, а также не учитывает количественную зависимость пассивации разорванных связей кристаллического кремния аморфным гидрогенизированным кремнием. Тем не менее продемонстрированный подход к компьютерной оптимизации фотоэлементов позволяет найти ограничения для оптимальных параметров толщины слоёв исследованной структуры «сверху». Для того чтобы определить границы оптимальных толщин «снизу» и учесть недостатки программного пакета необходимо рассмотреть гетеропереход ITO / p-a-Si:H и p-a-Si:H / n-c-Si.

Основной частью фотоэлемента является p-n–переход, в котором происходит разделение электронно-дырочных пар. Поэтому минимальная

толщина слоёв структуры, которые образуют p-n–переход должна быть не меньше, чем расстояние, на котором распространяется поле p-n–перехода. Поэтому важно рассчитать расстояние, на которое распространяется внутреннее электрическое поле, это так называемый слой Шоттки.

Для расчёта идеального гетероперехода необходимо учитывать диффузионный потенциал гетероперехода и отсутствие на границе раздела слоёв локальных состояний, что обеспечивает электронейтральность границы. Для расчётов будет использоваться метод, описанный в работе [106].

Если рассматривать неидеальный гетеропереход, то придётся учитывать параметры, которые присущи только к данной конкретной структуре, а также, учитывать параметры её изготовления.

Пусть в рассматриваемом гетеропереходе в приконтактном слое каждого из материалов происходит изменение потенциальной энергии электрона $\varphi_{1,2}$. Тогда равновесный диффузионный потенциал равен сумме φ_1 и φ_2. Изменения потенциальной энергии электрона равны разности термодинамических работ выхода.

Электростатический потенциал меняется непрерывно, а поле p-n–перехода имеет одно направление. Вследствие этого уровень вакуума E_0 на зонной диаграмме меняется на величину, равную φ_0.

Носители заряда с большой энергией могут пройти гетеропереход, изменив своё значение энергии на φ_0. Но для электронов и дырок с тепловыми энергиями разрывы энергетических зон являются скачками потенциала. Следовательно, гетеропереход обладает эффективными потенциальными барьерами, которые имеют разную высоту для различных носителей заряда.

Если рассматривать неидеальный гетеропереход, то можно взять во внимание наличие двойного электрического слоя в приконтактной области, то есть диполя Ф. Диполь меняет разрывы энергетических зон на величину Ф.

$$\varphi_0 = \pm\varphi_1 \pm \varphi_2 \pm \Phi = \chi_1 - \chi_2, \tag{2.9}$$

где $\chi_{1/2}$ — термодинамическая работа выхода.

При расчёте конкретного гетероперехода первым делом вычисляют диффузионный потенциал φ_0. Для этого необходимо узнать положение уровня Ферми ($\mu \equiv F - E_c$) на энергетической диаграмме структуры для каждого из материалов гетероперехода, которая зависит от температуры (T), концентрации основных носителей заряда и плотности состояний в валентной зоне (N_v) и зоне проводимости (N_c). Плотности состояний можно вычислить через эффективные массы дырок (m_{dp}) и электронов (m_{dn}).

$$N_{c,v} = \frac{2(2\pi m_{d\,n,p} kT)^{2/3}}{h^3}, \tag{2.10}$$

$$m_d = M^{2/3}(m_\perp^2 m_\parallel)^{1/3}, \tag{2.11}$$

где h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, $m_{\parallel,\perp}$ — продольная или поперечная составляющая эффективной массы, M — число эквивалентных эллипсоидов.

Затем можно вычислить химический потенциал (μ) и диффузионный потенциал (φ_0):

$$\mu = kTln\frac{n}{N_c}, \qquad \mu = -(\Delta E + kTln\frac{p}{N_v}), \tag{2.12}$$

$$\varphi_0 = |\chi_1 - \chi_2| = |(\chi_{01} + |\mu_1|) - (\chi_{02} + |\mu_2|)|, \tag{2.13}$$

где χ_{01} и χ_{02} — сродство электрона.

В условиях равновесия при интегрировании уравнения Пуассона получим уравнение для плотности объёмного заряда (ρ):

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{e\rho}{\varepsilon_0\varepsilon}, \tag{2.14}$$

$$\rho = e(p - n) + e(N_д - N_a), \tag{2.15}$$

где $N_д$ — концентрация ионов донорной примеси, N_a — концентрация ионов акцепторной примеси.

Каждая из составляющих объёмного заряда (заряд дырок, электронов и ионов примесей) может иметь зависимость от координаты в силу различных причин: неоднородного легирования, степени ионизации примеси, концентрации электронов и дырок, а так же потенциала. Поэтому точное аналитическое решения уравнения (2.14) невозможно.

Однако если использовать приближение Шоттки, то можно получить аналитическое решение. В приближении Шоттки предполагается:

а) примеси полностью ионизированы, концентрации ионов не зависят от потенциала и следуют закону распределения примеси;

б) каждый из проводников имеет достаточно выраженный примесный характер проводимости;

в) контактное поле создаёт в каждом из полупроводников обеднённый слой;

д) толщина обеднённых слоёв много больше длины Дебая $l_Д$ для соответствующего полупроводника на внешней границе обеднённого слоя.

Исходя из приближения Шоттки, в уравнении (2.15) можно представить заряд примеси, который преобладает в данном полупроводнике. Тогда перепишем (2.15) в виде:

$$\rho(x) = e\begin{Bmatrix} N_д(x) \\ -N_a(x) \end{Bmatrix} = e\begin{Bmatrix} n(x) \\ -p(x) \end{Bmatrix}. \tag{2.16}$$

Граница приконтактного слоя с электронейтральным объёмом полупроводника размыта, но в силу предположения д), допустим, что граница слоя резкая. То есть, с одной стороны этой границы заряд равен (2.16), а с другой стороны — нулю. Слой, обеднённый основными носителями тока, в результате экранирования электрического поля называется слоем Шоттки.

Рассчитаем потенциал для случая анизотипного гетероперехода с равномерным легированием примесей в приближении слоёв Шоттки. Обозначим n_1 и n_2 за концентрации основных носителей заряда в полупроводниках, которые образуют гетеропереход. Путь ось x будет направлена по нормали к плоскости контакта из первого полупроводника во второй. Примем, что координата x=0 — это плоскость контакта. Опишем гетеропереход, как двойной слой зарядов:

$$-x_1 \le x \le 0, \qquad \rho = \pm e n_1 = const(x),$$

$$0 \le x \le x_2, \qquad \rho = \pm e n_2 = const(x).$$

Задача сводится к интегрированию уравнения (2.14) с постоянной правой частью. Граничные условия задачи являются:

$$\left.\frac{d\varphi}{dx}\right|_{-x_1} = \left.\frac{d\varphi}{dx}\right|_{x_2} = 0, \tag{2.17}$$

$$\varepsilon_0\varepsilon_1 \left.\frac{d\varphi}{dx}\right|_{-0} = \varepsilon_0\varepsilon_2 \left.\frac{d\varphi}{dx}\right|_{+0} + e\sigma, \tag{2.18}$$

$$|\varphi(-x_1) - \varphi(x_2)| = \varphi_0, \tag{2.19}$$

$$\varphi(-0) = \varphi(+0), \tag{2.20}$$

где σ – это плотность заряда на поверхности раздела.

Рассмотрим конкретный вид решения уравнения Пуассона для случая, когда первый полупроводник — дырочного типа, а второй — электронного типа проводимости. Примем $\varphi(x \ge x_2) = 0$. Тогда имеем:

При $-x_1 \le x \le 0$:

$$E = -\frac{en_1}{\varepsilon_0\varepsilon_1}(x + x_1), \tag{2.21}$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{e^2 n_1}{2\varepsilon_0\varepsilon_1}(x + x_1)^2. \tag{2.22}$$

При $0 \le x \le x_2$:

$$E = -\frac{en_2}{\varepsilon_0\varepsilon_2}(x_2 - x), \tag{2.23}$$

$$\varphi = \varphi_0 \frac{e^2 n_2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_2} (x_2 - x)^2. \quad (2.24)$$

Вследствие того, что условие легирования проводника — однородное, зависимость напряжённости поля от координаты является — линейной, а зависимость потенциала – параболической.

Рассчитаем парциальный диффузионный потенциал (φ_i).

$$\varphi_i = \frac{e^2 n_i x_i^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_i} = \frac{Q_i^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_i n_i}; \quad (2.25)$$

$$Q_i = \mp e x_i n_i, \qquad i=1, 2; \quad (2.26)$$

где Q_i — заряды слоёв Шоттки в расчёте на единичную площадь перехода. Напряжённость электрического поля на границе раздела выражается формулой:

$$E_i = \frac{e n_i}{\varepsilon_0 \varepsilon_i} x_i, \qquad i = 1, 2. \quad (2.27)$$

Если $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$, то из (2.25) и (2.26) следует, что ($Q_1 - Q_2$) является каноническим уравнением эллипса. Тогда полуоси эллипса (Q_{0i}) равны:

$$Q_{0i} = (2\varepsilon_0 \varepsilon_i n_i \varphi_0)^{1/2}. \quad (2.28)$$

Напишем уравнение электронейтральности

$$Q_1 + Q_2 + \sigma = 0. \quad (2.29)$$

Тогда из системы уравнений (2.25), (2.26) и (2.29) следует решение для зарядов слоёв Шоттки:

$$Q_1 = \frac{f}{1+f}\left[-\sigma - \sqrt{\frac{1}{f}\left({Q_{01}}^2 + {Q_{02}}^2 - \sigma^2\right)}\right] \quad (2.30)$$

$$Q_2 = \frac{1}{1+f}\left[-\sigma + \sqrt{f\left({Q_{01}}^2 + {Q_{02}}^2 - \sigma^2\right)}\right] \quad (2.31)$$

$$f \equiv \frac{\varepsilon_1 n_1}{\varepsilon_2 n_2}. \quad (2.32)$$

Из формул (2.30) и (2.31) можно рассчитать заряды слоёв Шоттки. Из формулы (2.25) рассчитываются диффузионные парциальные потенциалы, а далее, по формулам (2.26) и (2.27) можно рассчитать толщину слоёв Шоттки. Толщина слоёв Шоттки (x_i) выражается формулой

$$x_i = \left(\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_i\varphi_i}{e^2 n_i}\right)^{1/2} \quad (2.33)$$

Выводы по разделу

Методика эксперимента для оптимизации гетеропереходных фотоэлементов структуры HIT включает в себя как теоретическую расчётную часть, так и экспериментальную. Такой подход обеспечивает объективный взгляд на результаты расчётов и экспериментов по оптимизации фотоэлементов.

В экспериментальной части работы используются современные методы для изготовления полупроводниковых структур: химическая обработка материалов, PECVD и PVD методы. Измерения характеристик изготовленных структур проводилось современными методами исследования.

Используя компьютерную модель высокоэффективного гетероперехода кремниевого солнечного элемента, найден алгоритм оптимизации солнечных элементов с использованием инструментов моделирования. Первоначально идентифицировали относительные воздействия изменения каждого из параметров устройства, в частности, толщин и уровней легирования для каждого слоя. Это было сделано путём рассмотрения более простых структур устройств, содержащих определённые элементы структуры HIT. Затем оценили эти параметры путём учёта их влияния на эффективность преобразования мощности устройства. Найдена оптимальная последовательность компьютерной оптимизации фотоэлемента HIT:

— оптимизация степени легирования p–типа эмиттерного слоя a-Si:H;

— оптимизация толщины фронтального встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости;

— оптимизация толщины монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости;

— оптимизация толщины аморфного слоя a-Si:H p-типа проводимости;

— оптимизация степени легирования монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости;

— оптимизация степени легирования тыльного слоя аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация толщины тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация толщины тыльного слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости.

Метод компьютерной оптимизации позволяет найти ограничения для оптимальных параметров толщины слоёв исследованной структуры «сверху», то есть верхнюю границу диапазона оптимальных значений. Для того, чтобы определить границы оптимальных толщин «снизу» был применён метод расчёта слоёв Шоттки. Для расчёта слоёв Шоттки в гетеропереходах исследуемой структуры была описана методика расчёта анизатипного гетероперехода.

3 ОПТИМИЗАЦИЯ И ЭКСЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

3.1 Оптимизация компьютерной модели структуры HIT

Основываясь на понимании влияния параметров изготовления на производительность простой структуры ФЭП 1, 2 и структуры 3 (раздел 2), была проведена оптимизация p-i-n-i-n+ HIT : p-a-Si:H толщина слоя эмиттера – 10 нм, концентрация акцепторов в слое эмиттера – 7,47 × 10^{19} $см^{-3}$, передний i-a-Si: H – внутренняя толщина слоя – 10 нм, толщина кристаллической пластины n-типа – 300 мкм, концентрация доноров в n-типа Si-пластины – 1,5 × 10^{16} $см^{-3}$, толщина i-a-Si: H тыльного слоя – 3 нм, толщина тыльного слоя n^+ – 5 нм, концентрация доноров в слое n^+ – 1 × 10^{19} $см^{-3}$. Начальная эффективность устройства составила 11,26%. Схематическое изображение структуры и её выходные параметры представлены на рисунках 3.1 - 3.3.

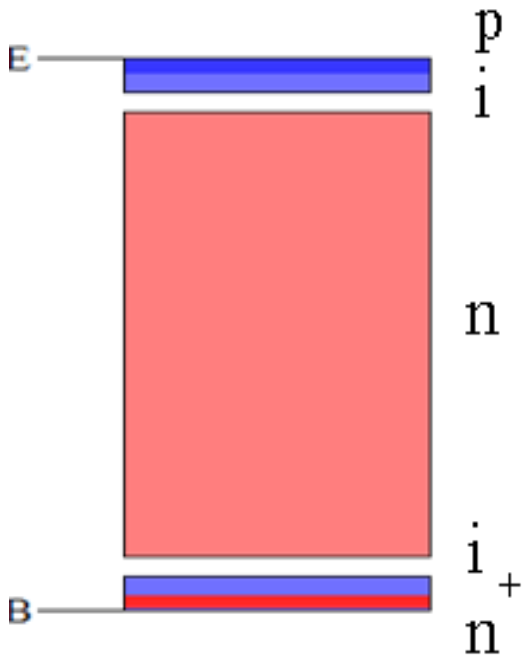
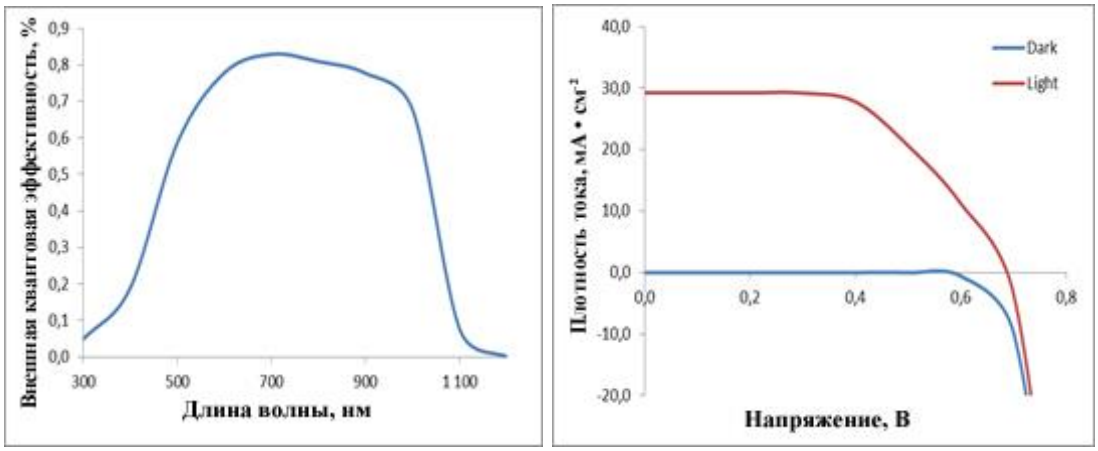


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение смоделированного исходного фотоэлемента

На рисунке 3.1 показаны составляющие слои фотоэлемента. По обе стороны кристаллической подложки n-типа проводимости расположены тонкие плёнки аморфного кремния собственной проводимости, которые служат для пассивации поверхностных состояний кристаллической подложки. С фронтальной стороны расположен слой аморфного кремния p-типа проводимости, который образует p-i-n–гетеропереход, где и происходит разделение электронно-дырочных пар. С тыльной стороны расположен слой аморфного кремния n^+-типа проводимости. Этот слой служит для создания энергетического барьера для неосновных носителей заряда.



a) b)

a) квантовая эффективность, b) ВАХ

Рисунок 3.2 – Выходные параметры исходного фотоэлемента со структурой p-i-n-i-n^+

Результаты расчётов, представленные на рисунке 3.2 (a), показали, что поглощения света структурой ФЭП в основном совпадает с поглощением света кристаллическим кремнием. Это объясняется тем, что количество монокристаллического кремния несравнимо велико по отношению к другим материалами структуры ФЭП.

На рисунке 3.2 – b представлена ВАХ исследуемой структуры. Темновой ток обозначен синей кривой, а световой — красной. На световом ВАХ видно, что форм-фактор фотоэлемента имеет невысокое значение, равное 0,563, что отражается на конечной эффективности ФЭП, которая равна 11,26%. Ток короткого замыкания равен 29,25 мА·$см^{-2}$, а напряжение холостого хода 0,68 В.

Зонная диаграмма исходного солнечного элемента представлена на рисунке 3.3. На рисунке в диапазоне от 0 до 0,3 мкм показано искривление линий, соответствующих энергетическим уровням потолка валентной зоны, дна зоны проводимости и уровня Ферми. Это связано с тем, что область кристаллического кремния искривлена вверх по оси энергий относительно слоя аморфного кремния p–типа проводимости. Это объясняется перераспределением зарядов у границ раздела гетероперехода и стремлением системы прийти к равновесию. В таком случае искривление зон идёт вверх от n-типа полупроводника к p–типу. Искривление зон отсутствует в диапазоне диаграммы от 0,3 до 300 мкм, так как слой кристаллического кремния составляет сотни микрон, в то время как влияние электрического поля гетероперехода распространяется на единицы микрометров. Также можно отметить, что в диапазоне 10–20 нм слой собственной проводимости не имеет искривления, но имеет наклон, пропорциональный электрическому полю p-n–перехода, так ведёт себя зонная диаграмма полупроводника в сильных электрических полях, каким является поле p-n–перехода для встроенного слоя. В части зонной диаграммы, соответствующей диапазону от 300 мкм и выше,

показан участок BSF–слоя. Можно заметить, что для неосновных носителей заряда в кристаллической подложке — дырок, образован энергетический барьер.

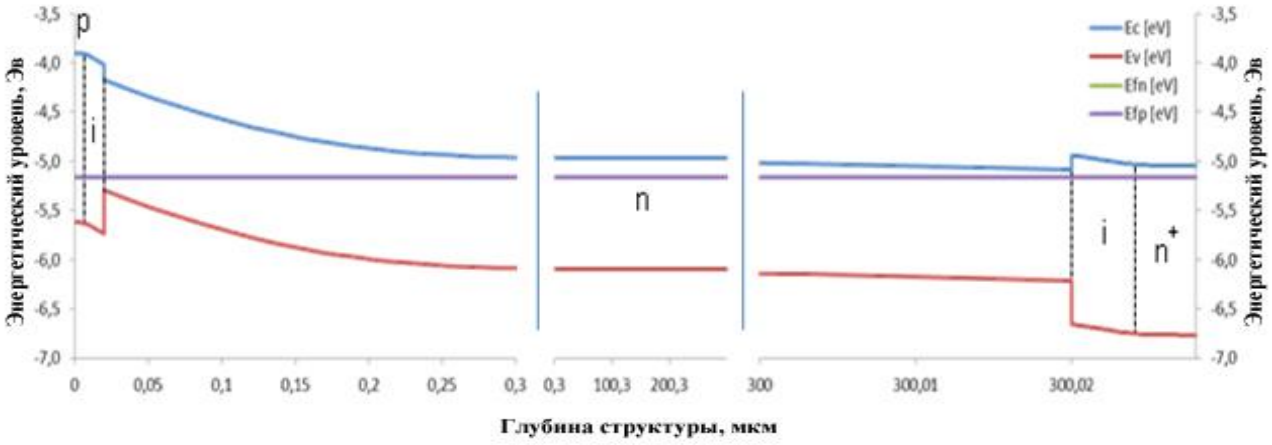


Рисунок 3.3 – Зонная диаграмма смоделированного фотоэлемента, демонстрирующая искривление зон

Оптимизация производительности устройства производилась поэтапно в порядке, указанном в таблице 2.2 (порядок убывания R):

— оптимизация степени легирования p-типа эмиттерного слоя a-Si:H;

— оптимизация толщины фронтального слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости;

— оптимизация толщины монокристаллической подложки c-Si n-типа проводимости;

— оптимизация толщины аморфного слоя a-Si:H p–типа проводимости;

— оптимизация степени легирования монокристаллической подложки c-Si n-типа проводимости;

— оптимизация степени легирования тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация толщины тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация толщины тыльного слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости.

Для оптимизации использовался тот же диапазон значений параметров, как и в разделах 2.2.1–2.2.3, с одним дополнительным шагом оптимизации – тонкой настройки, то есть вычислениями в дополнительных точках, расположенными близко к области максимальной эффективности.

Моделирование фотоэлемента структуры HIT было выполнено при помощи программного пакета AFORS-HET. Программный пакет предназначен для моделирования гетеропереходных солнечных элементов на базе кристаллического и аморфного кремния и включает в себя базу данных параметров этих материалов. Подробный принцип работы программного пакета AFORS-HET описан в работе [107]. Смоделированные фотоэлементы

использовали параметры материалов из интегрированной в программное обеспечение базы данных, а также измеренные отдельно на изготовленных образцах. Параметры слоёв монокристаллического и аморфного кремния, использованных при моделировании, приведены в таблицах 3.2 и 3.3.

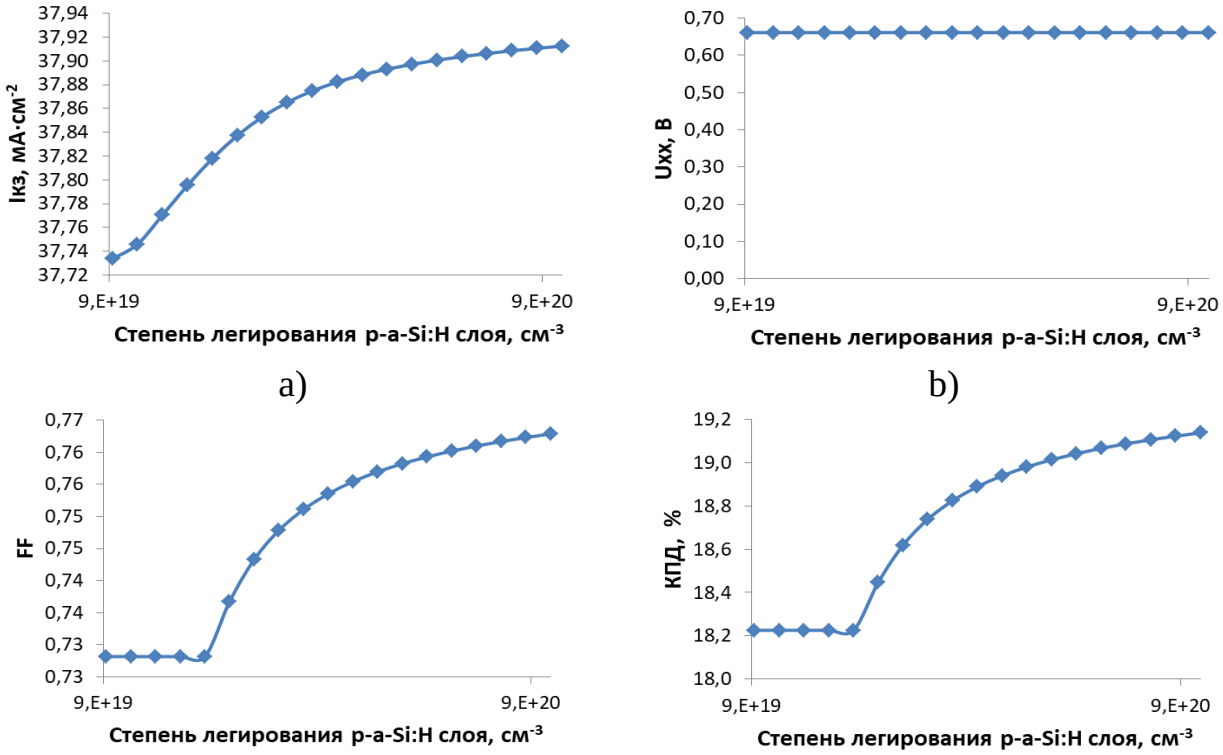
Таблица 3.2 – Параметры модели монокристаллического *n*-Si, использованные в программном пакете AFORS-HET

Название параметра	Значение	Название параметра	Значение
Диэлектрическая проницаемость	11.9	Плотность	2.328 г·см$^{-3}$
Сродство к электрону	4.05 эВ	Концентрация доноров	2.15×10^{17} см$^{-3}$
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости Эффективная плотность состояний в валентной зоне	2.846×10^{19} см$^{-3}$ 2.685×10^{19} см$^{-3}$	Концентрация акцепторов	0 см$^{-3}$
Ширина запрещённой зоны E_g	1.124 эВ	Электронная/дырочная скорость поверхностной рекомбинации	10^7 см/с
Эффективная подвижность электронов	1111 см^2/В с	Эффективная мобильность дырок	421.6 см^2/В с
Коэффициент Оже-рекомбинации электронов	2.2×10^{-32} см^6/с	Коэффициент Оже-рекомбинации дырок	9.9×10^{-33} см^6/с

Таблица 3.3 - Параметры модели аморфного *p*/*n*-Si, использованные в программном пакете AFORS-HET

Название параметра	Значение	Название параметра	Значение
Диэлектрическая проницаемость	11.9	Коэффициент Оже-рекомбинации электронов	20 см^2/В с
Сродство к электрону	3.9 эВ	Коэффициент Оже-рекомбинации дырок	5 см^2/В с
Эффективная плотность состояний	10^{20} см$^{-3}$	Концентрация доноров	10^{20} см$^{-3}$
Ширина запрещённой зоны E_g	1.72 эВ		

Данные оптимизации структуры приведены на рисунках 3.4 – 3.10.



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от степени легирования эмиттера, b) зависимость U_{xx} от степени легирования эмиттера, c) зависимость фактора заполнения от степени легирования эмиттера, d) зависимость эффективности ФЭП от степени легирования эмиттера

Рисунок 3.4 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от степени легирования эмиттера p-типа

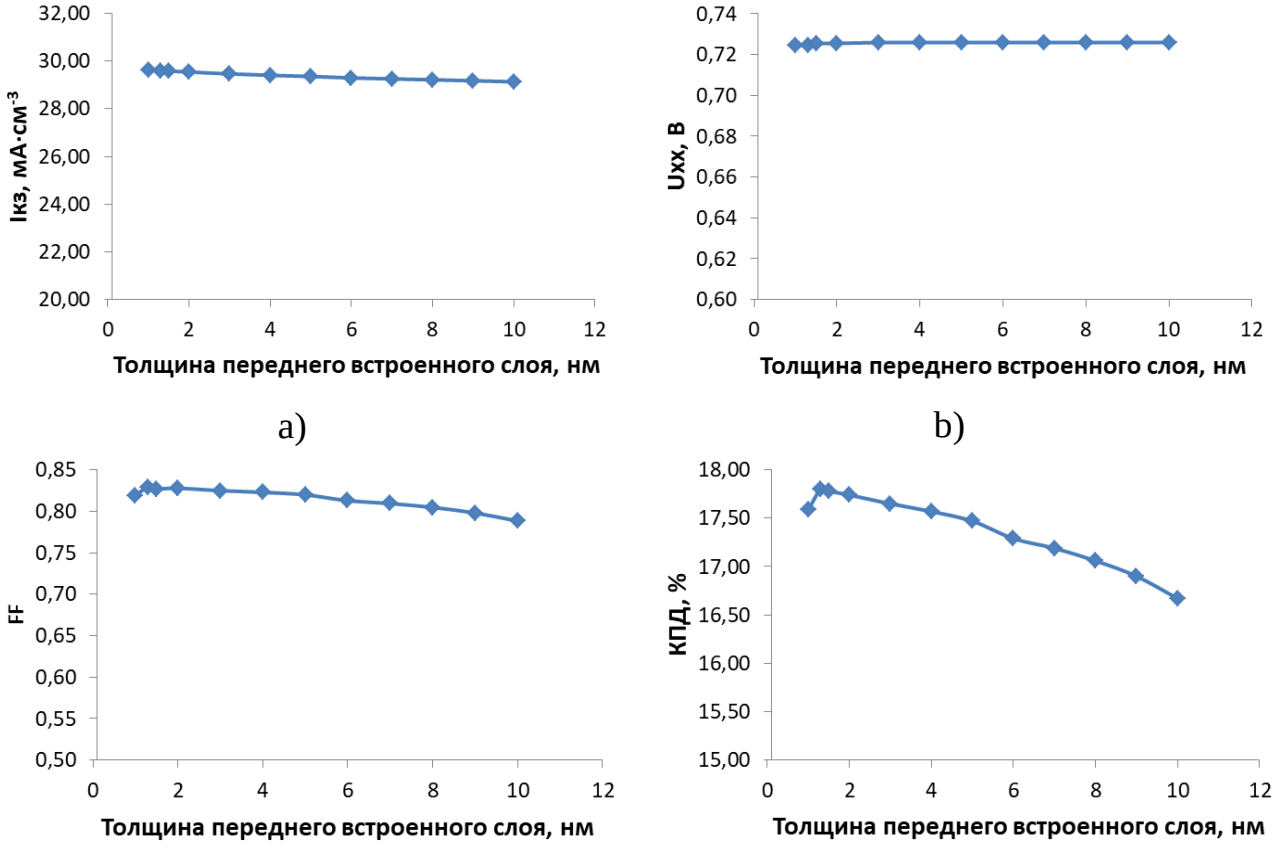
С ростом концентрации основных носителей заряда в эмиттерном слое ток короткого замыкания, фактор заполнения и эффективность фотоэлемента растут, как показано на рисунке 3.4. На значении концентрации носителей заряда в $1{,}5 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$ начинают увеличиваться значения фактора заполнения и КПД (рисунок 3.4 – c,d).

Рост кривой тока короткого замыкания (рисунок 3.4 – a) обусловлен увеличением генерации фототока. Она происходит путём разделения электронно-дырочных пар внутренним электрическим полем p-n–перехода. Это поле сопоставимо с искривлением энергетических зон, а напряжённость электрического поля зависят от степени легирования полупроводников, образующих p-n–переход.

Кривая напряжения холостого хода зависит от процессов рекомбинации носителей заряда в структуре, но так как почти 100% структуры ФЭП составляет монокристаллический кремний, то напряжение холостого хода

зависит от процессов рекомбинации носителей заряда в кристаллическом кремнии. Вследствие этого кривая напряжения холостого хода не изменяет свою зависимость с изменением степени легирования эмиттерного слоя (рисунок 3.4 – b).

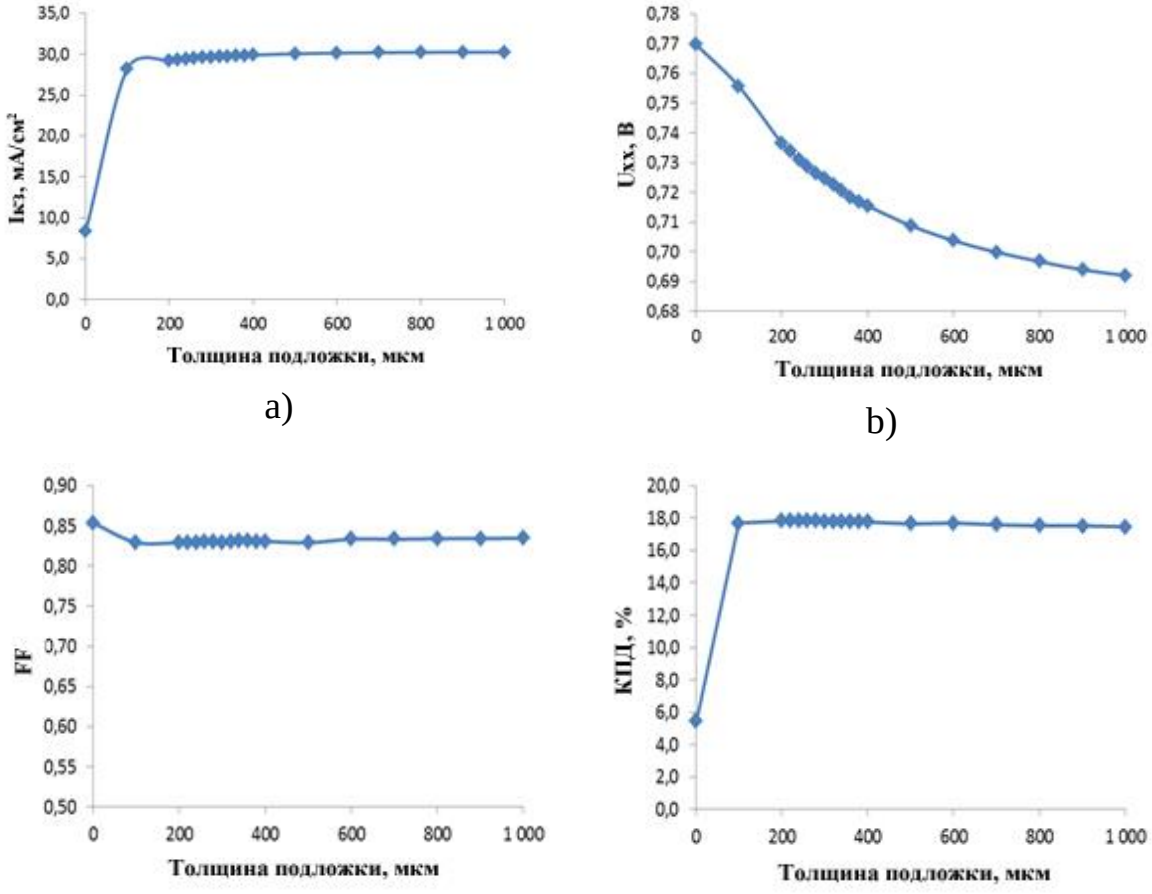
Кривая форм-фактора (рисунок 3.4 – c) зависит от последовательного и параллельного сопротивления структуры. Тем самым влияние на форм-фактор оказывают энергетические барьеры и переходы на зонной диаграмме структуры, вид которой, в свою очередь, зависит от уровня легирования рассматриваемого слоя. Начиная со значения концентрации $1{,}5 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$ кривая форм-фактора начинает расти, что приводит к росту эффективности фотоэлемента (рисунок 3.4 – d).



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от толщины переднего встроенного i-слоя, b) зависимость U_{xx} от толщины переднего встроенного i-слоя, c) зависимость фактора заполнения от толщины переднего встроенного i-слоя, d) зависимость эффективности ФЭП от толщины переднего встроенного i-слоя

Рисунок 3.5 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от толщины переднего встроенного i-слоя

Рост толщины встроенного слоя собственной проводимости не приводит к изменению напряжения холостого хода (рисунок 3.5 – b). Так как встроенный слой собственной проводимости приводит к лучшей пассивации поверхностных состояний кристаллической подложки, то рекомбинация носителей заряда уменьшается. Однако из-за качества материала аморфного кремния растёт сопротивление структуры, что ведёт к снижению значения фактора заполнения (рисунок 3.5 – c) и падению тока короткого замыкания (рисунок 3.5 – a). Общее влияние вышеописанных зависимостей отрицательно отражаются на КПД фотоэлемента. Начиная со значения толщины встроенного слоя 1,3 нм эффективность фотоэлемента структуры HIT падает с увеличением толщины фронтального аморфного встроенного слоя, однако, точка, соответствующая толщине слоя 1.3 нм является точкой максимума КПД (рисунок 3.5 – d).



a) зависимость плотности тока короткого замыкания $I_{кз}$ от толщины монокристаллической подложки, b) зависимость U_{xx} от толщины монокристаллической подложки, c) зависимость фактора заполнения от толщины монокристаллической подложки, d) зависимость эффективности ФЭП от толщины монокристаллической подложки

Рисунок 3.6 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от толщины монокристаллической подложки

Данные оптимизации фотоэлемента в зависимости от роста толщины кремниевой кристаллической подложки представлены на рисунке 3.6. Рост значения эффективности, а также тока короткого замыкания в основном связан с тем, что именно в слое кристаллического кремния происходит поглощение фотонов и образование электронно-дырочных пар в области p-n-перехода (рисунок 3.6 – a,d). В диапазоне, соответсвующем толщине кристаллического кремния равной 100–200 мкм, кривые эффективности и тока короткого замыкания выходят в режим насыщения. Падение напряжения холостого хода с ростом толщины подложки связано с тем, что с толщиной материала увеличивается колличество дефектов в глубине материала, которые служат центрами рекомбинации для носителей заряда (рисунок 3.6 – b).

Помимо данных исследований необходимо учитывать и экономические факторы, влияющие на итоговую стоимость фотоэлемента. В работе [108] показано, что оптимальная толщина кремниевой подложки в ФЭП во многом будет зависеть не только от зависимости, представленной на рисунке 3.6, но и от особенностей локального рынка.

Результаты исследования показали, что более высокая эффективность солнечных элементов может быть достигнута за счёт более дешёвых, но качественных пластин монокристаллического кремния. На рисунке 3.7 показана зависимость стоимости подложки от её толщины (рисунок 3.7).

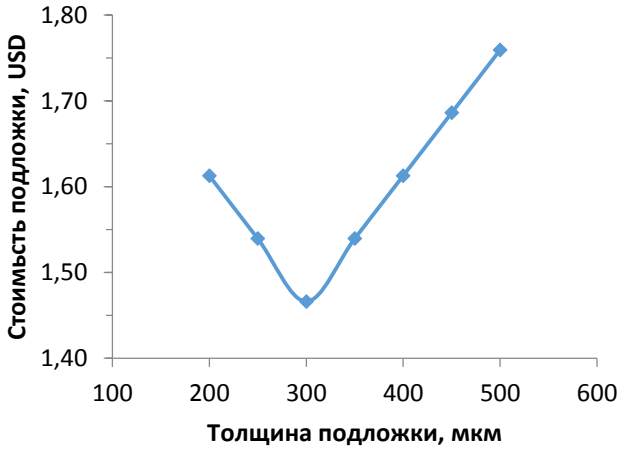
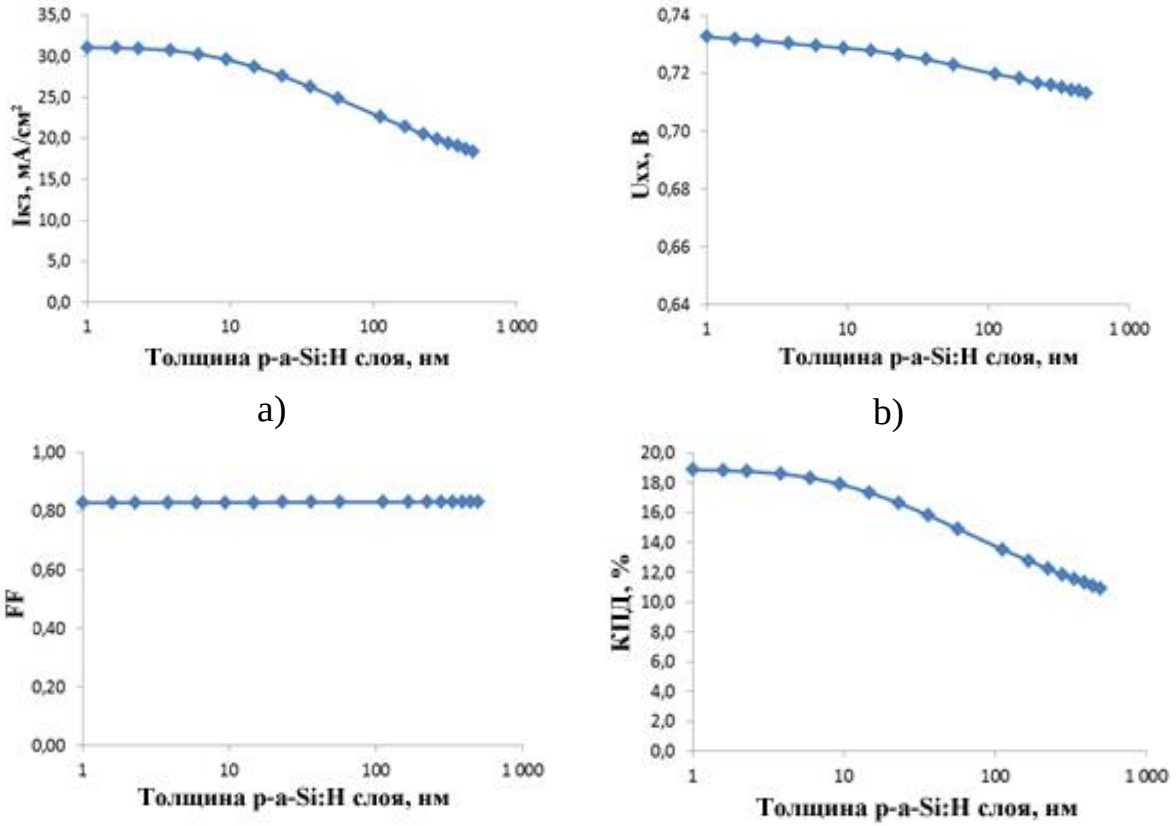


Рисунок 3.7 – Зависимость стоимости подложки от её толщины

Зависимость электрических характеристик ФЭП от толщины слоя аморфного кремния p-типа проводимости показана на рисунке 3.8. Эффективность и другие, приведённые на рисунке, электрические характеристики фотоэлемента падают с увеличением толщины слоя. Падения характеристик связано с ростом последовательного сопротивления структуры. Напряжения холостого хода зависит от светового тока и тока насыщения. Так как ток насыщения связан с сопротивлением структуры и рекомбинацией носителей заряда, то кривая напряжения холостого хода (рисунок 3.8 – b), имеет зависимость, подобную зависимости кривой тока короткого замыкания (рисунок 3.8 – a). А так как эффективность фотоэлемента зависит от тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, то и значение

эффективности падает с увеличением толщины слоя аморфного кремния p-типа проводимости (рисунок 3.8 – d).

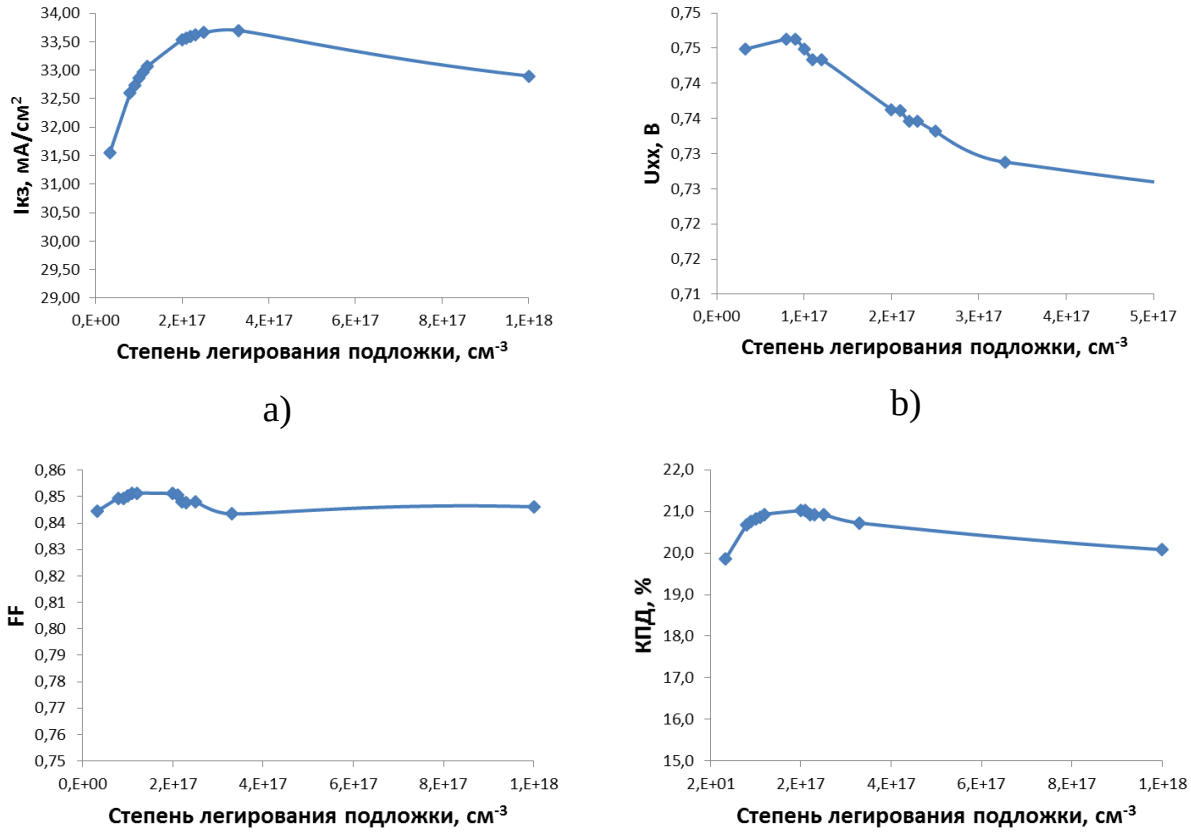


a) зависимость плотности тока короткого замыкания $I_{кз}$ от толщины эмиттерного слоя, b) зависимость U_{xx} от толщины эмиттерного слоя, c) зависимость фактора заполнения от толщины эмиттерного слоя, d) зависимость эффективности ФЭП толщины эмиттерного слоя

Рисунок 3.8 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от толщины эмиттерного слоя

Увеличение концентрации основных носителей заряда в кристаллической подложке кремния сопровождается увеличением эффективности фотоэлемента (рисунок 3.9). Данная зависимость связана с увеличением проводимости структуры. Изменение степени легирования влечёт за собой изменение в искривлении энергетических зон на зонной диаграмме, такое изменение оказывает влияние на ток короткого замыкания и напряжение холостого хода (рисунок 3.9 – a,b). Наблюдается увеличение значений этих характеристик в диапазоне от 0 до 10^{17} $см^{-3}$. Однако на значении порядка 10^{17} $см^{-3}$ наблюдается точка экстремума и затем падение эффективности ФЭП (рисунок 3.9 – d). Такое поведение кривой связано с тем, что при увеличении концентрации основных носителей заряда увеличивается и вероятность Оже–рекомбинации в полупроводнике, что влечёт за собой уменьшение величины тока короткого

замыкания и напряжения холостого хода (рисунок 3.9 – a,b) [109]. В итоге, в точке экстремума влияние Оже–рекомбинации более сильно действует на зависимость эффективности фотоэлемента, что приводит к снижению КПД.

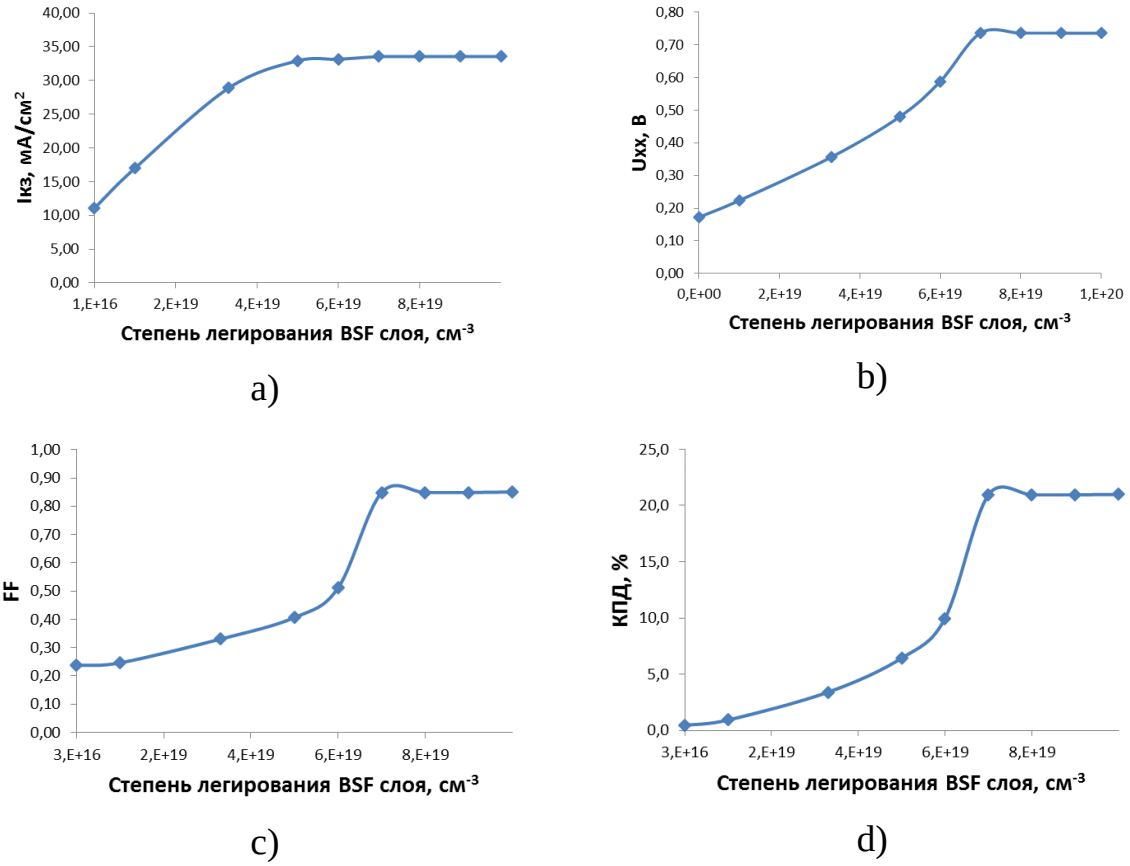


a) зависимость плотности тока короткого замыкания от степени легирования кристаллической подложки n–типа проводимости, b) зависимость напряжения холостого хода от степени легирования кристаллической подложки n–типа проводимости, c) зависимость фактора заполнения степени легирования кристаллической подложки n–типа проводимости, d) зависимость эффективности ФЭП от степени легирования кристаллической подложки n–типа проводимости

Рисунок 3.9 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от степени легирования кристаллической подложки n–типа проводимости

С увеличением степени легирования в BSF–слое увеличиваются значения форм-фактора, напряжения холостого хода и эффективности (рисунок 3.10). Концентрация носителей заряда в слое влияет на формирование изгиба энергетических зон на границе гетероперехода. Как только для электронов создаётся оптимальная возможность прохождения через энергетический барьер, а для дырок образуется непреодолимый энергетический барьер, то кривые зависимостей на графиках перестают расти. На графике напряжения холостого

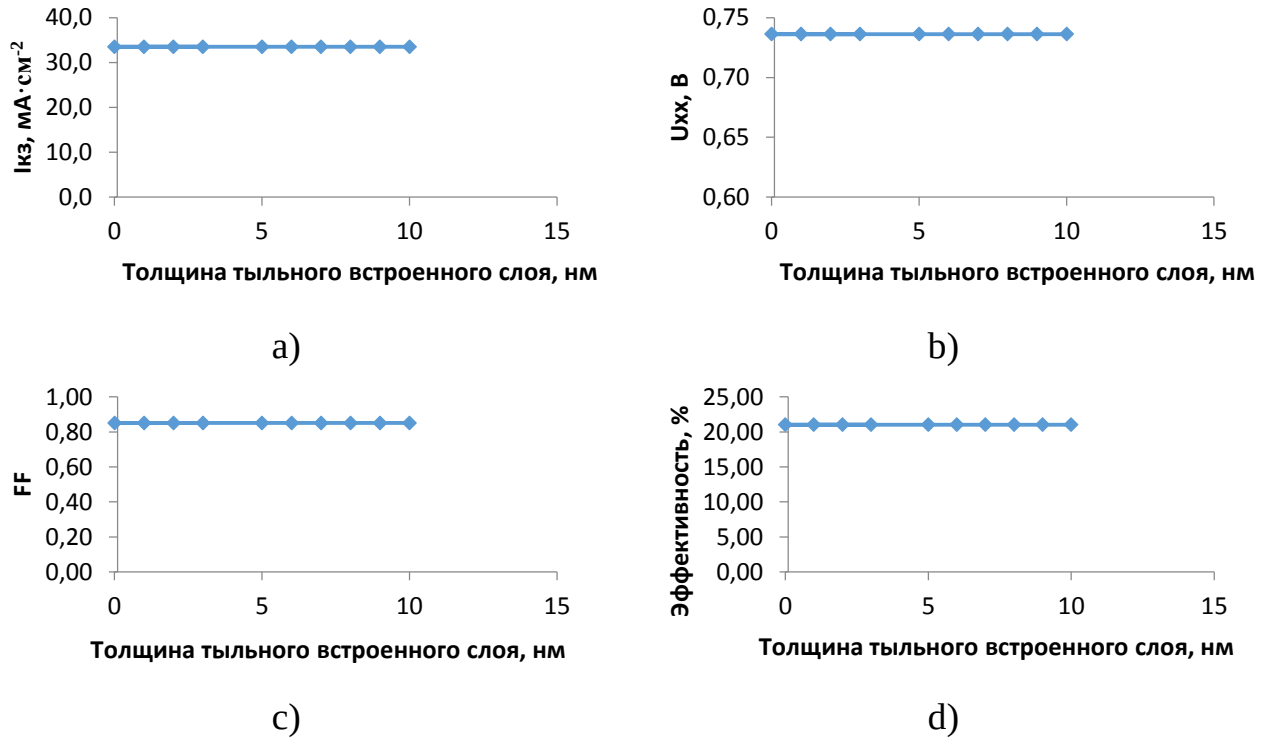
хода, форм-фактора и тока короткого замыкания в точке, соответствующей значению концентрации электронов $7 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$, кривые перестают расти, что говорит о том, что достигнуто оптимальное спрямление зон, как это показано на рисунке 2.12. Вследствие этого график эффективности ФЭП (рисунок 3.10 – d) выходит в режим насыщения.



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от степени легирования запирающего BSF–слоя, b) зависимость напряжения холостого хода от степени легирования запирающего BSF–слоя, c) зависимость фактора заполнения от концентрации легирования запирающего BSF–слоя, d) зависимость эффективности ФЭП от степени легирования BSF–слоя

Рисунок 3.10 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от степени легирования запирающего BSF–слоя

Зависимость электрических характеристик фотоэлемента структуры HIT от толщины тыльного встроенного i–слоя показана на рисунке 3.11. Как можно наблюдать на рисунке, ток короткого замыкания, напряжения холостого хода, фактор заполнения и эффективность фотоэлемента не зависят от изменения толщины встроенного тыльного аморфного слоя собственной проводимости. Главным образом такой встроенный слой предназначен для пассивации поверхностных состояний кристаллической подложки.



a) зависимость плотности тока короткого замыкания от толщины тыльного встроенного i–слоя, b) зависимость U_{xx} от толщины тыльного встроенного i–слоя, c) зависимость фактора заполнения от толщины тыльного встроенного i-слоя, d) зависимость эффективности ФЭП от толщины тыльного i–слоя

Рисунок 3.11 – Данные оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП в зависимости от толщины тыльного встроенного i–слоя

Изменение толщины тыльного слоя a-Si:H n^+–типа проводимости в диапазоне от 1 до 50 нм (и далее) не приводило к каким-либо изменениям выходных характеристик устройства. При этом нужно учитывать, что толщина BSF-слоя должна быть такой, чтобы не допустить туннелирования дырок сквозь создаваемый энергетический барьер.

В результате исследования были определены оптимальные параметры модели фотоэлемента структуры HIT, которые приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Основные параметры оптимизированной структуры

	Название слоя				
Параметры слоёв	p-a-Si	i-a-Si	n-c-Si	i-a-Si	n^+-a-Si
Толщина, мкм	0.001	0.001	200	0.003	0.005
Уровень легирования, $см^{-3}$	0.7×10^{20}-1.0×10^{20}	-	$1.7\cdot10^{17}$	-	10^{20}
Финальные выходные характеристики: V_{OC} = 734 мВ, J_{SC} = 33.6 мА/$см^2$, FF = 85.06%, КПД = 20.98%					

Представленный подход к оптимизации ячейки HIT на основе нисходящей последовательности, приведённой в таблице 3.1, сравнивали с оптимизацией с использованием обратного возрастающего порядка шагов оптимизации и случайного порядка шагов оптимизации. В результате обнаружено, что алгоритм шагов оптимизации, в котором этапы оптимизации выполнялись в порядке убывания параметра R, приводил к более высокой эффективности (20,98%) по сравнению с результатами (20,78%) для возрастающей последовательности и (20,49%) для случайного порядка шагов оптимизации. Хотя разница в эффективности смоделированных устройств несущественна, но выходные параметры ФЭП, в частности, толщина пластины и уровень легирования пластины, а также эксплуатационные характеристики значительно отличаются. При проведении оптимизации в значениях R в порядке убывания обнаружено, что оптимальное значение толщины пластины равно 200 мкм. Это сильно отличается от значения толщины 110 мкм, полученных для восходящего порядка шагов оптимизации и 40 мкм для случайного порядка шагов оптимизации. Разница в производительности оптимизированного фотоэлемента, полученная с помощью различных алгоритмов оптимизации, может быть более различной в структурах, где используются другие значения времени жизни носителей заряда, скорости поверхностной рекомбинации или коэффициентов рекомбинации и Оже-рекомбинации.

Алгоритм оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП (восходящий порядок):

— оптимизация толщины тыльного слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости (результат аналогичен порядку убывания);

— оптимизация толщины тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация степени легирования тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация степени легирования монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости;

— оптимизация толщины аморфного слоя a-Si:H p–типа проводимости;

— оптимизация толщины монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости;

— оптимизация толщины фронтального слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости;

— оптимизация степени легирования p-типа эмиттерного слоя a-Si:H.

Результаты оптимизации компьютерной модели по обратному порядку представлены в таблице 3.5.

Алгоритм оптимизации p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-a-Si:H / i-a-Si:H / n+-a-Si:H ФЭП (случайный порядок):

— оптимизация степени легирования тыльного аморфного слоя a-Si: H n^+–типа проводимости;

— оптимизация толщины монокристаллической подложки c-Si n–типа проводимости;

— оптимизация толщины аморфного слоя a-Si:H p–типа проводимости;

— оптимизация степени легирования монокристаллической подложки c-Si n-типа проводимости;

— оптимизация толщины фронтального слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости;

— оптимизация степени легирования p-типа эмиттерного слоя a-Si:H;

— оптимизация толщины тыльного слоя встроенного слоя a-Si:H собственной проводимости.

Результаты оптимизации компьютерной модели по случайному порядку представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.5 – Основные параметры оптимизированной структуры (обратный порядок).

	Название слоя				
Параметры слоёв	p-a-Si	i-a-Si	n-c-Si	i-a-Si	n+-a-Si
Толщина, мкм	0.001	0.001	110	0.003	0.005
Уровень легирования, $см^{-3}$	10^{20}	-	$0.9 \cdot 10^{17}$	-	10^{20}
Финальные выходные характеристики: V_{OC} = 759.8 мВ, J_{SC} = 32.0 $мА/см^2$, FF = 85.43%, КПД = 20.78%					

Таблица 3.6 – Основные параметры оптимизированной структуры (случайный порядок)

	Название слоя				
Параметры слоёв	p-a-Si	i-a-Si	n-c-Si	i-a-Si	n+-a-Si
Толщина, мкм	0.001	0.001	40	0.003	0.005
Уровень легирования, $см^{-3}$	10^{20}	-	$1.7 \cdot 10^{17}$	-	10^{20}
Финальные выходные характеристики: V_{OC} = 775.4 мВ, J_{SC} = 30.98 $мА/см^2$, FF = 85.31%, КПД = 20.49%					

В результате исследований был оптимизирован стандартный солнечный элемент HIT, используя три различные последовательности шагов оптимизации: порядок возрастания, порядок убывания и случайный порядок. Продемонстрированно, что различные последовательности оптимизации приводят к различным конечным параметрам устройства и их эксплуатационным характеристикам, причём порядок убывания шагов оптимизации демонстрирует более высокую эффективность, чем восходящие и случайные порядки [110]. Представленный подход может найти применение в оптимизации других типов солнечных элементов со многими параметрами оптимизации, например, таких как многопереходные и каскадные солнечные элементы, как в симуляции, так и в лабораторных исследованиях.

3.2 Исследование компьютерной модели фотоэлемента HIT

Для понимания и расчёта процессов, происходящих в твёрдотельных электронных приборах, мощным методом исследования является компьютерное и математическое моделирование. Одним из главных преимуществ такой методики является сравнительно быстрое время численного расчёта при смене начальных и граничных условий задачи. Для проведения настоящего исследования был использован программный пакет AFORS-HET, который позволил смоделировать фотоэлемент со структурой HIT на базе аморфного кремния (рисунок 3.12). На основе данного смоделированного фотоэлемента проводились расчёты для перехода металл-полупроводник [111].

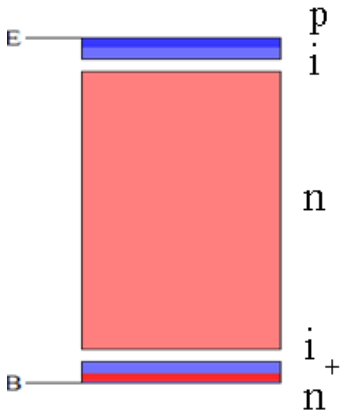
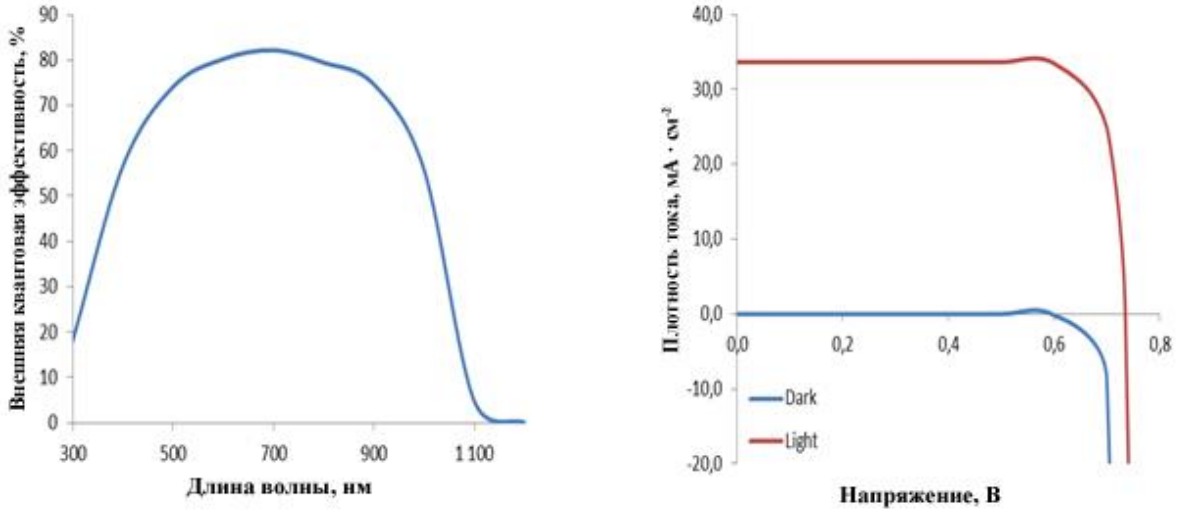


Рисунок 3.12 – Схематическое изображение смоделированного исходного фотоэлемента

Параметры компьютерной оптимизации солнечного элемента со структурой p-i-n-i-n^+ представлены ниже:

— $d_{p\text{-}a\text{-}Si}$ = 0,1 nm;
— $N_{a,p\text{-}a\text{-}Si} = 3{,}59\times10^{20}$ cm^{-3};
— $d_{i\text{-}a\text{-}Si}$ = 2 nm;
— $d_{n\text{-}c\text{-}Si}$ = 200 μm;
— $N_{d,n\text{-}c\text{-}Si} = 2{,}15\times10^{17}$ cm^{-3};
— $d_{i\text{-}a\text{-}Si}$ = 30 nm;
— $d_{n\text{-}a\text{-}Si}$ = 6 nm;
— $N_{d,n\text{-}a\text{-}Si} = 1\times10^{20}$ cm^{-3}.

На рисунке 3.13 представлены спектральная зависимость квантовой эффективности от длины волны падающего излучения, а также темновая и световая вольтамперные характеристики смоделированной структуры. Квантовая эффективность структуры описывает характерную кривую, на которой видно, что основным материалом поглощения фотонов в фотоэлементе является кристаллический кремний. А по кривой световой ВАХ можно определить ток короткого замыкания, равный 33,6 мА·$см^{-2}$ и напряжение холостого хода, равное 0,7754 В.



а) б)

а) спектральная характеристика квантовой эффективности; б) световая (красная линия) и темновая (синяя линия) вольтамперные характеристики

Рисунок 3.13 – Выходные характеристики оптимизированного солнечного элемента со структурой p-i-n-i-n^+

Выходные характеристики финального оптимизированного солнечного элемента представлены ниже:

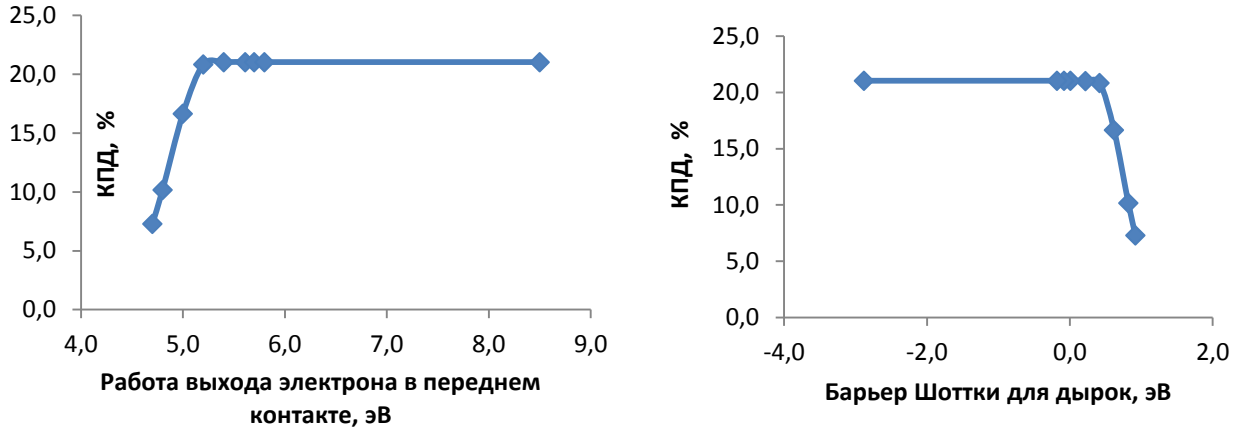
— J_{SC} = 33,6 mA·cm^{-2};
— V_{OC} = 0,7754 V;
— FF = 0,8506;
— PCE = 20,98%.

В процессе работы была исследована зависимость КПД фотоэлемента от величины барьера Шоттки на лицевом контакте и отдельно на тыльном контакте. Облучение солнечным излучением, соответствующем спектральной характеристике и интенсивности согласно стандарту AM1.5, проводилось со стороны лицевого контакта.

3.2.1 Исследование влияния лицевого контакта на эффективность солнечного элемента

Для определения влияния лицевого контакта металл-полупроводник на выходные характеристики фотоэлемента первоначально проводился расчёт характеристик фотоэлемента в зависимости от работы выхода контактного материала. В исследуемой модели исследовался контакт аморфный кремний p–типа проводимости/металл [112]. В полупроводниковом слое предполагалось наличие пренебрежимо малого количества поверхностных состояний.

На рисунке 3.14 представлены результаты расчётов смоделированной структуры применительно к зависимости КПД солнечного элемента от работы выхода контактного материала и величины барьера Шоттки. Более детальные значения рассматриваемых параметров указаны в таблице 3.7.



a) b)

a) зависимость КПД фотоэлемента от работы выхода электрона из металла (ось абсцисс); b) зависимость КПД фотоэлемента от разницы между работой выхода электрона из металла и сродства электрона в полупроводнике

Рисунок 3.14 – Изменение выходных параметров солнечного элемента в зависимости от выбора материала для лицевого контакта

На рисунке 3.14 - a показано влияние работы выхода лицевого контакта в гетеропереходном кремниевом солнечном элементе со структурой лицевой контакт/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/i-a-Si/n-a-Si:H/тыльный контакт на его эффективность. Кроме того, на рисунке 3.13 – b продемонстрировано влияние на эффективность солнечного элемента величины барьера Шоттки, создаваемого на границе между слоем аморфного кремния p-типа проводимости и лицевым металлическим контактом. Очевидно, что вследствие линейной зависимости между величиной барьера Шоттки и работой выхода лицевого контакта, между графиками наблюдается корреляция. Из представленных результатов видно, что при наличии барьера Шоттки свыше 0,5 эВ происходит резкое уменьшение эффективности солнечного элемента.

Таблица 3.7 – Зависимость КПД солнечного элемента от параметров перехода металл-полупроводник на лицевом контакте (величина E_g-(-С.Э.+$A_{вых}$) представляет собой величину барьера Шоттки)

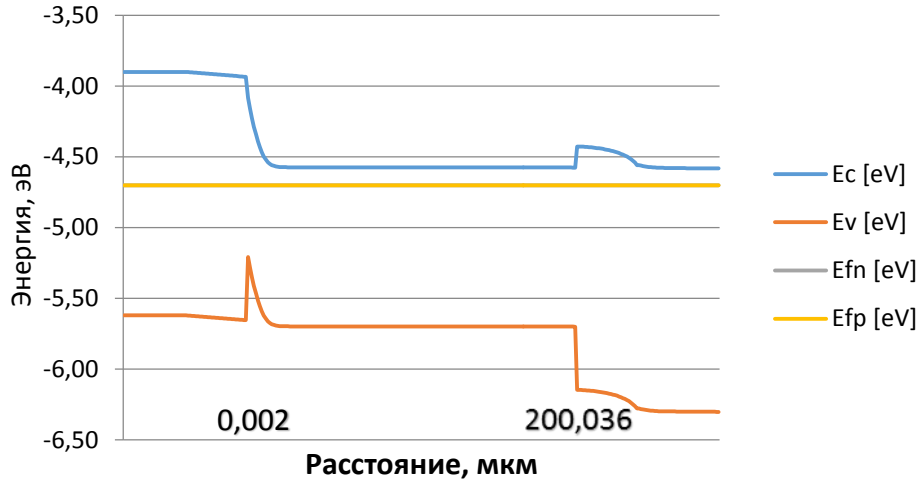
$A_{вых}$, эВ	E_g-(-С.Э.+$A_{вых}$), эВ	КПД, %
4,700	0,920	7,296
4,800	0,820	10,180
5,000	0,620	16,660
5,200	0,420	20,840
5,400	0,220	21,030
5,612	0,008	21,040
5,700	-0,080	21,040
5,800	-0,180	21,040
8,500	-2,880	21,040

В таблице 3.7 представлена зависимость КПД солнечного элемента от параметров перехода металл-полупроводник на лицевом контакте. В расчётах принято значение сродства электрона 3,900 эВ, а значение ширины запрещённой зоны аморфного кремния — E_g = 1,72 эВ. Из представленных расчётов можно сделать вывод, что при работе выхода электрона из металла свыше 5,2 эВ в структуре металл-аморфный кремний значение КПД достигает значений свыше 21%, далее меняясь незначительно. Максимальное значение КПД в 21,04 % достигается при работе выхода лицевого контактного материала свыше 5,6 эВ. Дальнейшее увеличение работы выхода не приводит к росту выходных характеристик солнечного элемента. Это объясняется формированием оптимального омического контакта, который не может быть более улучшен при дальнейшем увеличении работы выхода лицевого контакта.

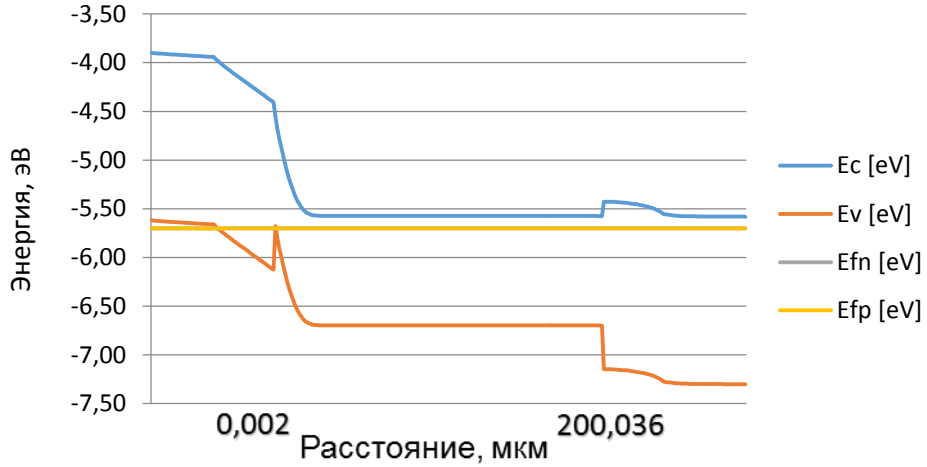
Для более детального рассмотрения причины изменения выходных характеристик солнечного элемента рассмотрим ситуации с различными значениями работы выхода лицевого контакта. На рисунке 3.15 представлены зонные диаграммы гетеропереходного кремниевого солнечного элемента при работах выхода лицевого контакта 4,7 эВ, 5,7 эВ и 8,5 эВ.

Заметим, что данные величины работы выхода соответствуют использованию таких металлических электродных материалов, как серебро (Ag) (4,26–4,74 эВ) и платина (Pt) (5,12–5,93 эВ). Крайне высокая работа выхода 8,5 эВ соответствует виртуальному контактному материалу, используемому в данном случае только с целью визуализации зависимости выходных характеристик солнечного элемента от выбора контактного материала.

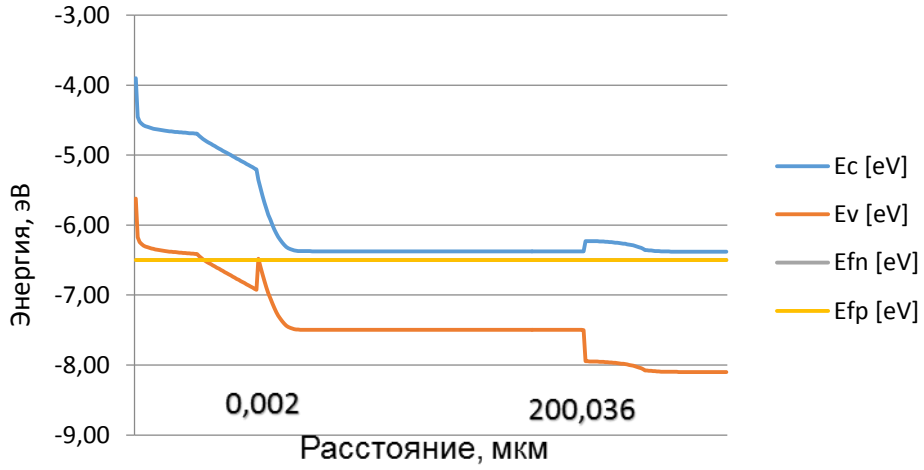
В диапазоне от 0 до 0,002 мкм показано искривление линий, соответствующих энергетическим уровням потолка валентной зоны, дна зоны проводимости и уровня Ферми (рисунок 3.15). Это связано с тем, что область кристаллического кремния искривлена вверх по оси энергий относительно слоя аморфного кремния p-типа проводимости. Это объясняется перераспределением зарядов у границ раздела гетероперехода и стремлением системы прийти к равновесию. В таком случае искривление зон идёт вверх от n-типа полупроводника к p-типу. Искривление зон отсутствует в диапазоне диаграммы от 0,002 до 200 мкм, так как слой кристаллического кремния составляет сотни микрон, в то время как влияние электрического поля гетероперехода распространяется на единицы микрометров. В части зонной диаграммы, соответствующей диапазону от 200 мкм и выше, показан участок BSF-слоя. Можно заметить, что для неосновных носителей заряда в кристаллической подложке – дырок, образован энергетический барьер. Основное различие между зонными диаграммами заключается в том, что при больших значениях работы выхода возникает большее искривление зон в области перехода между кристаллической кремниевой пластиной и лицевым электродом. Это соответствует большей величине встроенного поля, вытягивающего положительно заряженные носители из солнечного элемента.



a)



b)

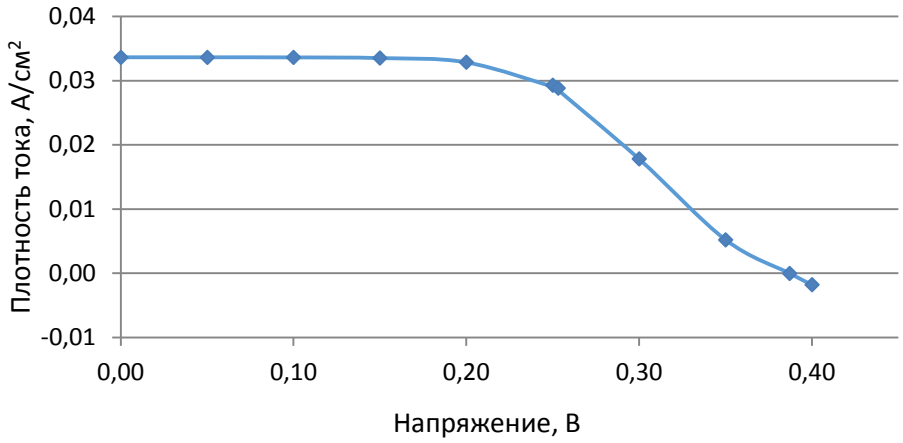


c)

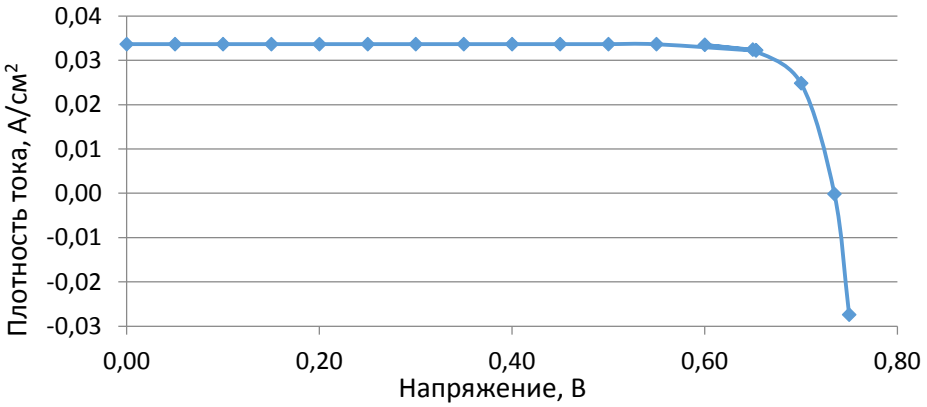
a) зонные диаграммы гетеропереходного кремниевого солнечного элемента с работой выхода лицевого контакта равной 4,7 эВ, b) 5,7 эВ, c) 8,5 эВ

Рисунок 3.15 – Зонные диаграммы гетеропереходного кремниевого солнечного элемента при различных работах выхода лицевого контакта

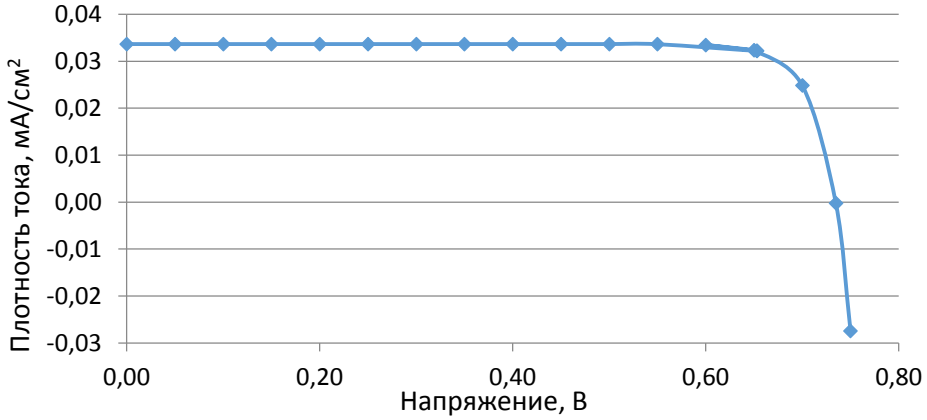
На рисунке 3.16 приведены вольтамперные характеристики, соответствующие зонным диаграммам, рассматриваемым на рисунке 3.15.



a)



b)



c)

a) 4,7 эВ (КПД = 7,296 %); b) 5,7 эВ (КПД = 21,04 %); c) 8,5 эВ (КПД = 21,04 %)

Рисунок 3.16 – Вольтамперные характеристики гетеропереходных кремниевых солнечных элементов с различными работами выхода лицевого контакта

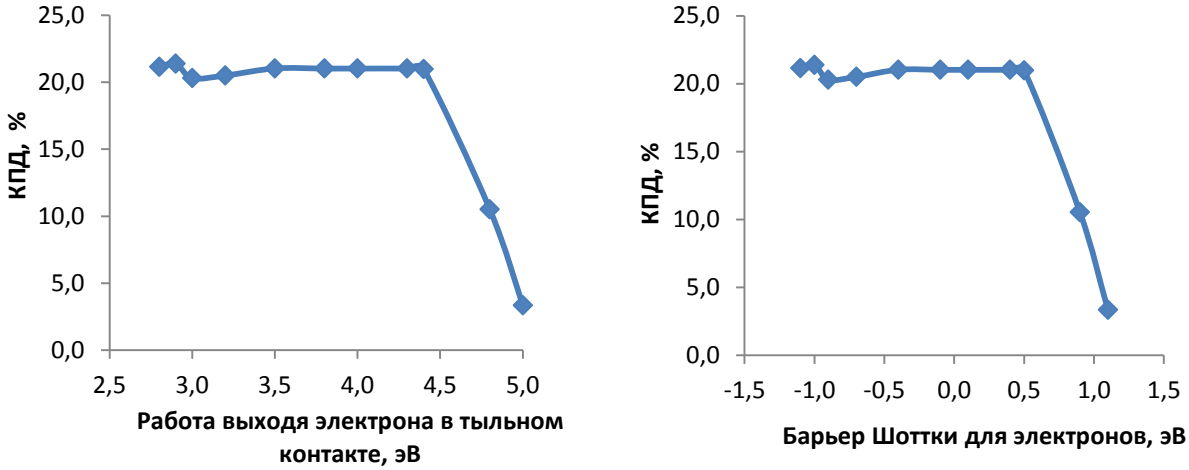
Очевидно, что вольт-амперные характеристики солнечных элементов с работами выхода лицевого контакта 5,7 эВ (рисунок 3.16 – b) и 8,5 эВ (рисунок

3.16 – c) оптимальны и идентичны. Главным отличием от них солнечного элемента с работой выхода лицевого контакта 4,7 эВ (рисунок 3.16 – a) является значительно меньшее значение напряжения холостого хода, на что также влияет падение тока при достижения напряжения 0,20 эВ. Данный эффект может быть связан с повышенной рекомбинацией носителей на лицевом контакте солнечного элемента вследствие более слабого встроенного поля. Электрическое поле создаёт дополнительный энергетический барьер для носителей заряда, что приводит к большему сопротивлению структуры. Как только достигается необходимый вид зонной диаграммы, соответствующий омическому контакту, то вольт-амперная характеристика исследуемых структур соответствует характеристикам, показанным на рисунках 3.16 – a,b.

3.2.2 Исследование влияния тыльного контакта на эффективность солнечного элемента

Для определения влияния тыльного контакта металл-полупроводник на выходные характеристики фотоэлемента первоначально проводился расчёт характеристик фотоэлемента в зависимости от работы выхода контактного материала. В исследуемой модели исследовался контакт аморфный кремний n-типа проводимости/металл. В полупроводниковом слое предполагалось наличие пренебрежимо малого количества поверхностных состояний.

На рисунке 3.17 представлены результаты расчётов смоделированной структуры применительно к зависимости КПД солнечного элемента от работы выхода контактного материала и величины барьера Шоттки. Более детальные значения рассматриваемых параметров указаны в таблице 3.8.



a) b)

a) зависимость КПД фотоэлемента от работы выхода электрона из металла (ось абсцисс); b) зависимость КПД фотоэлемента от разницы между работой выхода электрона из металла и сродства электрона в полупроводнике

Рисунок 3.17 – Изменение выходных параметров солнечного элемента в зависимости от выбора материала для тыльного контакта

Таблица 3.8 – Зависимость КПД солнечного элемента от параметров перехода металл-полупроводник на тыльном контакте (величина -С.Э.+$А_{вых}$ представляет собой величину барьера Шоттки)

$А_{вых}$, эВ	-Э.С. + $А_{вых}$	КПД, %
2,8	-1,1	21,15
2,9	-1,0	21,39
3,0	-0,9	20,31
3,2	-0,7	20,50
3,5	-0,4	21,03
3,8	-0,1	21,02
4,0	0,1	21,02
4,3	0,4	21,02
4,4	0,5	20,98
4,8	0,9	10,53
5,0	1,1	3,356

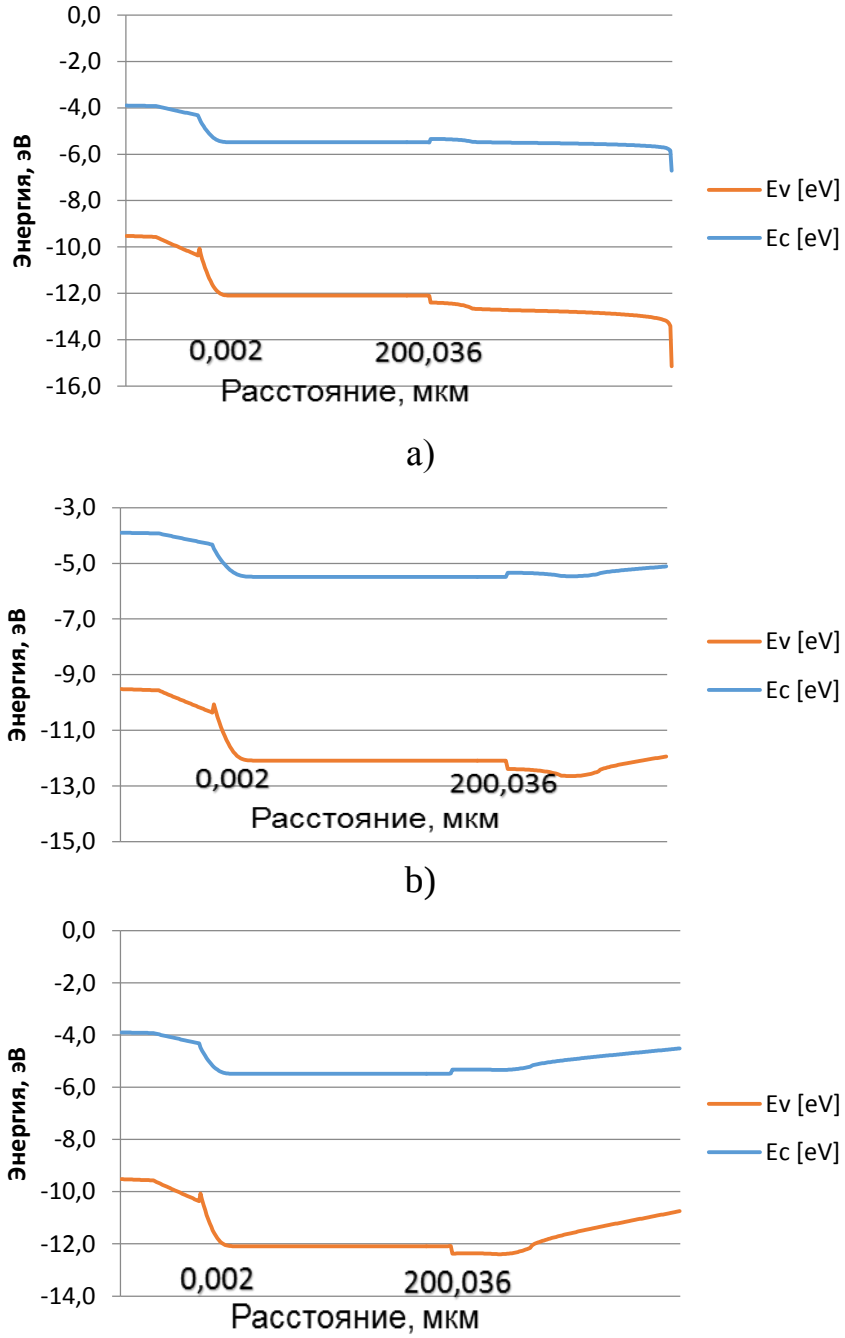
На рисунке 3.17 – a показано влияние работы выхода тыльного контакта в гетеропереходном кремниевом солнечном элементе со структурой лицевой контакт/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/i-a-Si/n-a-Si:H/тыльный контакт на его эффективность. На рисунке 3.17 – b продемонстрировано влияние на эффективность солнечного элемента величины барьера Шоттки, создаваемого на границе между слоем аморфного кремния n-типа проводимости и тыльным металлическим контактом. Аналогично случаю для лицевого контакта, рассмотренному выше, можно сделать вывод, что при наличии барьера Шоттки свыше 0,5 эВ происходит резкое уменьшение эффективности солнечного элемента.

При работе выхода тыльного контакта ниже 4,4 эВ в структуре металл-аморфный кремний эффективность достигает значений свыше 21%, далее меняясь незначительно. Замедление роста выходных характеристик солнечного элемента при значениях работы выхода ниже 4,4 эВ объясняется формированием оптимального омического контакта, который более не может быть сильно улучшен. В диапазоне значений работы выхода от 3,0 эВ до 3,2 эВ наблюдается незначительный спад, который далее сменяется ростом для значений 2,8 эВ и 2,9 эВ. Максимальное значение эффективности 21,15% наблюдается для работы выхода тыльного контакта 2,8 эВ.

Как и в случае с лицевым контактом, для детального рассмотрения причины изменения выходных характеристик солнечного элемента, на рисунке 3.18 представлены зонные диаграммы гетеропереходного кремниевого солнечного элемента при работах выхода тыльного контакта 2,8 эВ, 4,4 эВ и 5,0 эВ.

Заметим, что данные величины работы выхода соответствуют использованию таких металлических электродных материалов как кальций (Ca) (2,87 эВ), серебро (Ag) (4,26–4,74 эВ) и никель (Ni) (5,04–5,35 эВ) или

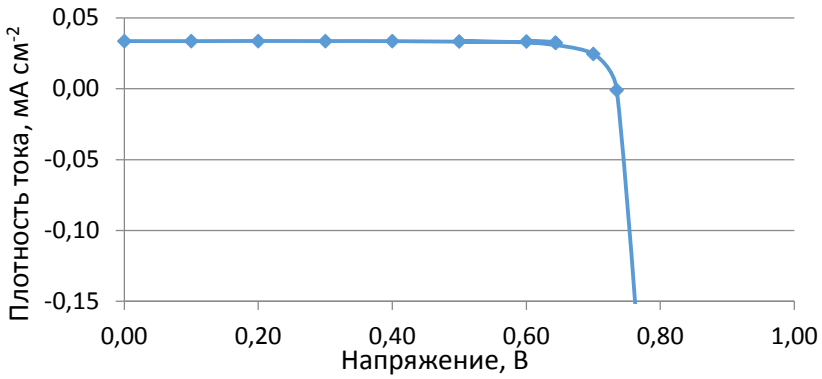
вольфрам (W) (4,32–5,22 эВ). Главным отличием солнечного элемента, имеющего тыльный контакт с работой выхода 2,8 эВ, является направление искривления зон в аморфном кремнии n-типа проводимости, а соответственно и направление встроенного электрического поля через этот слой.



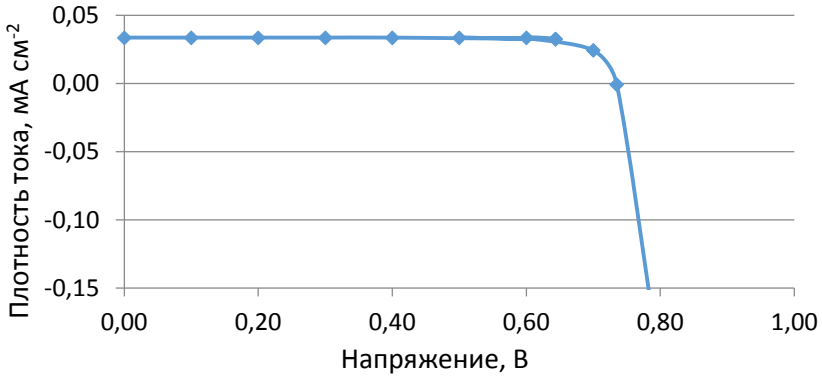
a) 2,8 эВ; b) 4,4 эВ; c) 5,0 эВ

Рисунок 3.18 – Зонные диаграммы гетеропереходного кремниевого солнечного элемента при различных работах выхода тыльного контакта

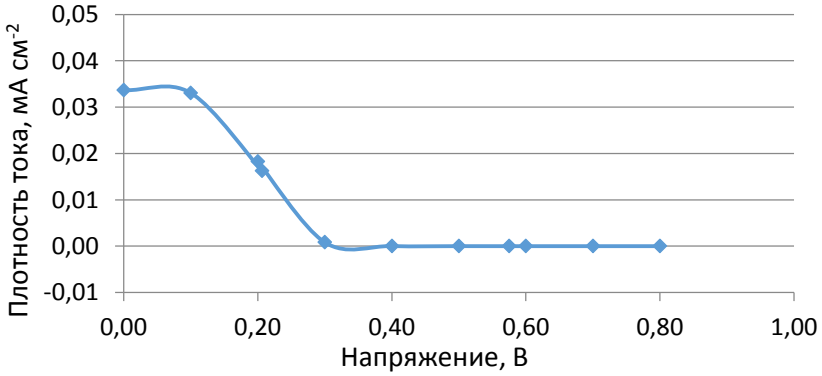
На рисунке 3.19 приведены вольтамперные характеристики, соответствующие рассматриваемым на рисунке 3.18 зонным диаграммам.



a)



b)



c)

a) 2,8 эВ (КПД = 21,15 %); b) 4,4 эВ (КПД = 20,98 %), c) 5,0 эВ (КПД = 3,36 %)

Рисунок 3.19 – Вольтамперные характеристики гетеропереходных кремниевых солнечных элементов с различными работами выхода тыльного контакта

Одним из интересных наблюдений является то, что при относительно высоком значении работы выхода 4,4 эВ КПД солнечного элемента остаётся на уровне 21%, хотя направление встроенного электрического поля в слое аморфного кремния n–типа проводимости в данном случае противоположно оптимальному. Данная ситуация, однако, резко изменяется при достижении значения работы выхода тыльного контакта 5,0 эВ. В этом случае обратно направленное встроенное электрическое поле становится настолько сильным, что КПД солнечного элемента испытывает значительное падение. В основном,

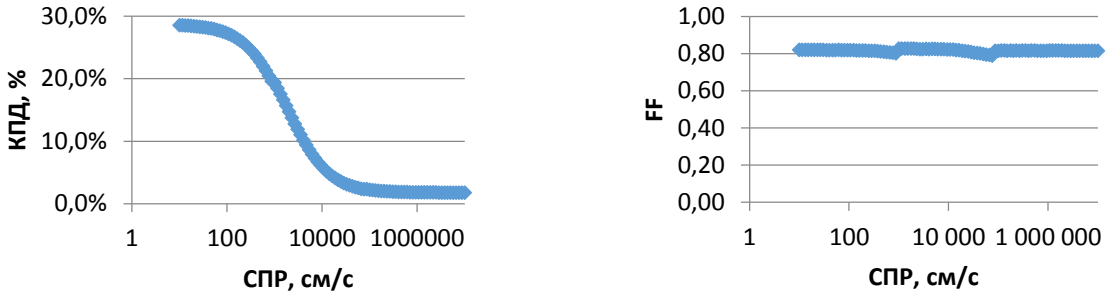
аналогично случаю для лицевого контакта, падение КПД связано с уменьшением напряжения холостого хода с 0,735 В до 0,300 В. Данный эффект может быть связан с повышенной рекомбинацией носителей на тыльном контакте солнечного элемента.

Таким образом, исследованы оптимальные зонные характеристики контакта «металл–полупроводник», построена компьютерная модель фотоэлемента с омическим контактом и контактом Шоттки. Представленные результаты свидетельствуют о значительном влиянии контактных материалов на выходные характеристики гетеропереходных кремниевых солнечных элементов. Основным параметром, оказывающим влияние на эффективность солнечных элементов, является работа выхода контактного материала [112, стр. 33].

3.2.3 Моделирование поверхностной рекомбинации на фронтальном и тыльном контактах гетеропереходных кремниевых фотоэлементов

В результате исследований ФЭП были смоделированы и рассмотрены случаи пассивации поверхностных состояний с тыльной и внешней стороны для структур p-n–переход на кристаллическом кремнии и HIT–структуры ФЭП. Скорость поверхностной рекомбинации основных носителей заряда была принята равной 10^7 см/с.

Результаты расчётов для p-n–перехода представлены на рисунках 3.20 – 3.23.



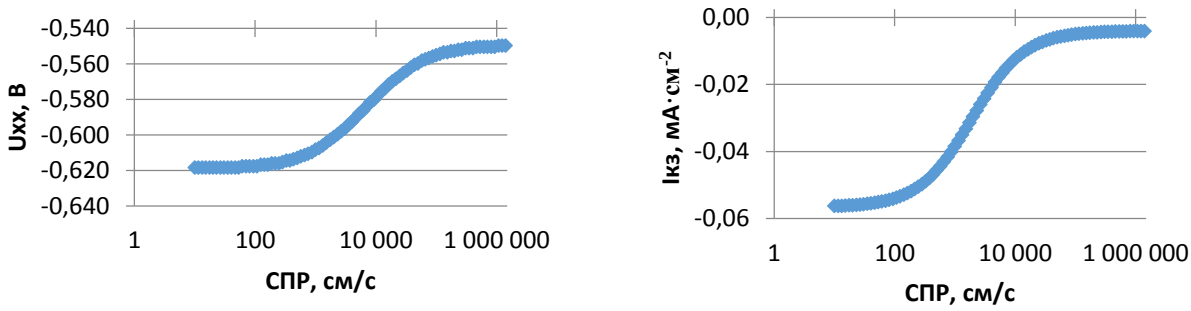
a) b)

a) зависимость КПД фотоэлемента от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) неосновных носителей заряда, b) зависимость коэффициента заполнения (FF) фотоэлемента от скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда

Рисунок 3.20 – Зависимость выходных электрических характеристик p-n – структуры от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) на фронтальной стороне

На рисунке 3.20 – a показано падение эффективности фотоэлемента с ростом скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Численные расчёты вполне соответствуют теоретическим предположениям о том, что увеличение количества заряженных дефектов, которые создают

дополнительные центры рекомбинации, приводит к увеличению скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Зависимости, представленные на рисунке 3.20, согласуются с данными, приведёнными на рисунке 3.21, где показано падение абсолютных значений, как напряжения холостого хода (рисунок 3.21 - a), так и тока короткого замыкания (рисунок 3.21) с ростом скорости поверхностной рекомбинации.

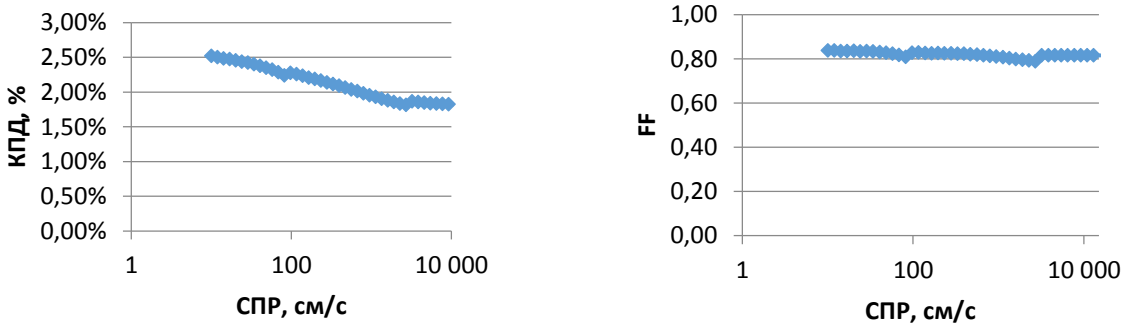


a) b)

a) зависимость напряжения холостого хода (V_{OC}) фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда, b) зависимость тока короткого замыкания (J_{SC}) фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда

Рисунок 3.21 – Зависимость выходных электрических характеристик p-n – структуры от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) на фронтальной стороне

На рисунках 3.22–3.23 представлены результаты исследований для случая, когда скорость поверхностной рекомбинации варьируется на тыльной поверхности кремниевой пластины в рассматриваемой p-n – структуре.

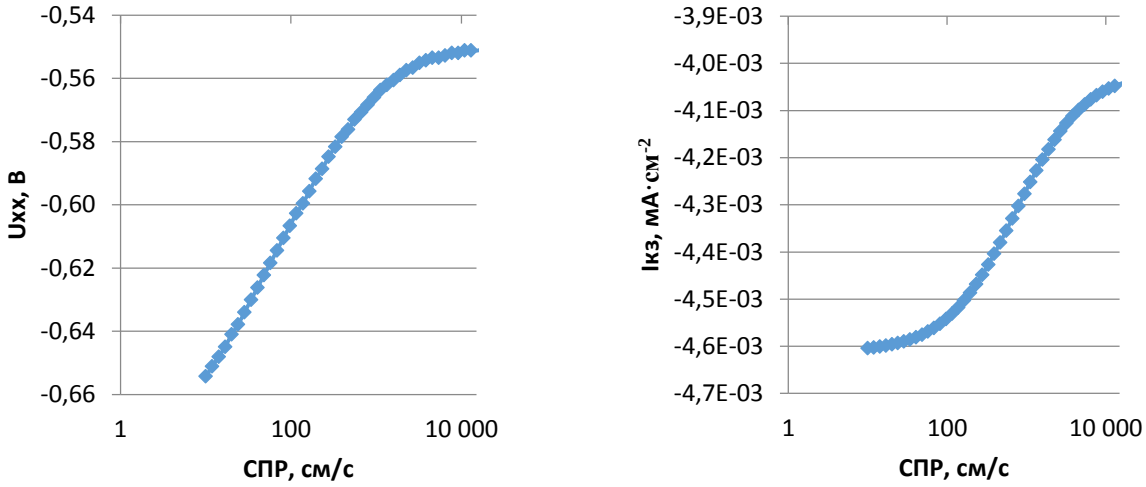


a) b)

a) зависимость КПД фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда, b) зависимость коэффициента заполнения (FF) фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда

Рисунок 3.22 – Зависимость выходных электрических характеристик p-n–структуры от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) на тыльной стороне

На рисунке 3.22 – a показано падение эффективности фотоэлемента с ростом скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Такая зависимость объясняется тем, что увеличение количества заряженных дефектов, которые создают дополнительные центры рекомбинации, приводит к увеличению скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда.



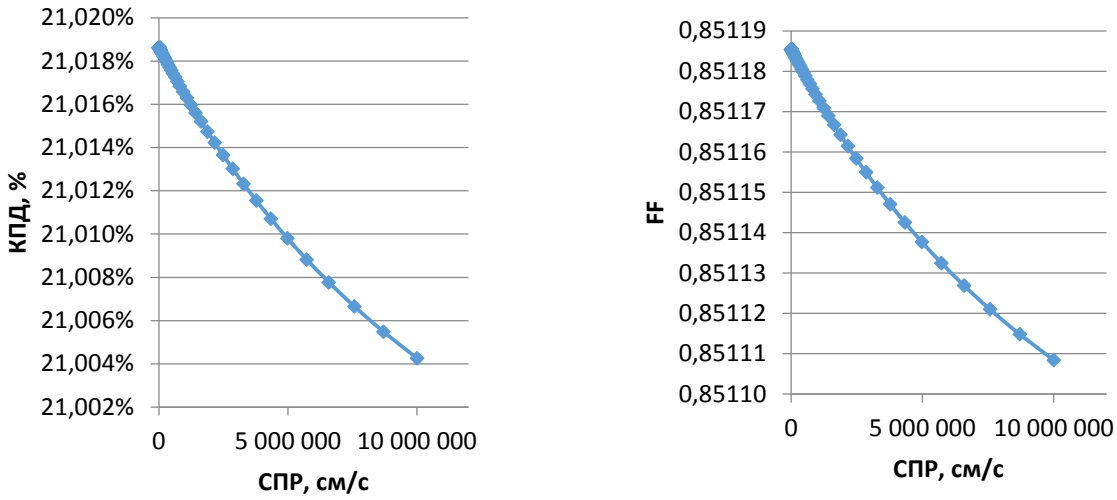
a) b)

a) зависимость напряжения холостого хода (V_{OC}) фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда, b) зависимость тока короткого замыкания (J_{SC}) фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда

Рисунок 3.23 – Зависимость выходных электрических характеристик p-n – структуры от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) на тыльной стороне

На рисунке 3.23 показаны зависимости напряжения холостого хода (рисунок 3.23 – a) и тока короткого замыкания (рисунок 3.23 – b) от скорости поверхностной рекомбинации. Рост скорости поверхностной рекомбинации сопровождается падением абсолютных значений как тока короткого замыкания, так и напряжения холостого хода.

Результаты расчётов зависимости выходных характеристик солнечного элемента от скорости поверхностной пассивации для HIT–структуры представлены на рисунках 3.24–3.25. В этом случае увеличение скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда слабо влияет на эффективность фотоэлемента со структурой HIT. Это заметно отличается от ситуации со стандартным p-n–переходом. Однако, при этом качественная характеристика зависимости выходных характеристик от скорости поверхностной рекомбинации остаётся такой же и рассмотрение аналогично случаю с p-n–переходом.



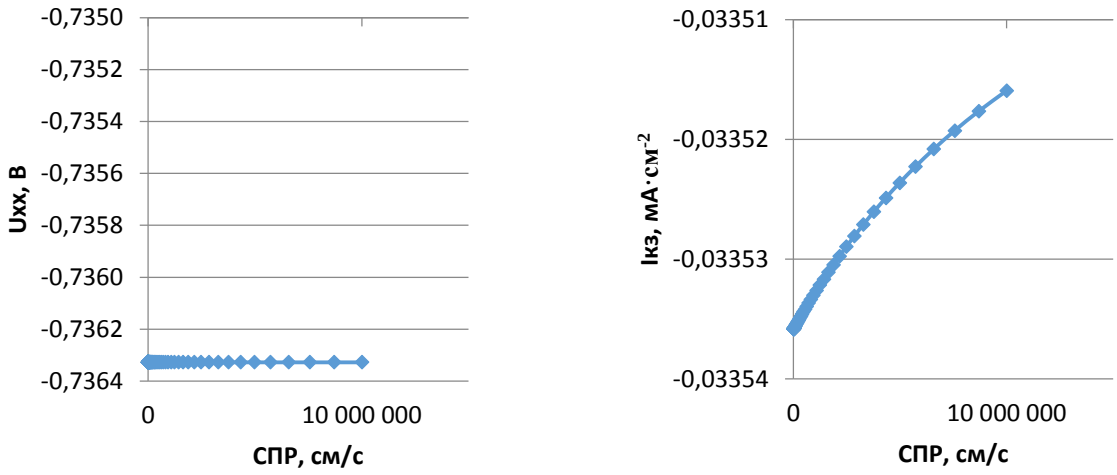
a) b)

a) зависимость КПД фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда, b) зависимость коэффициента заполнения (FF) фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда

Рисунок 3.24 – Зависимость выходных электрических характеристик HIT–структуры от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) на фронтальной стороне

На рисунке 3.24 – a показано падение эффективности фотоэлемента с ростом скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Такая зависимость объясняется тем, что увеличение количества заряженных дефектов, которые создают дополнительные центры рекомбинации, приводит к увеличению скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. На рисунке 3.25 показаны зависимости напряжения холостого хода (рисунок 3.25 – a) и тока короткого замыкания (рисунок 3.25 – b). Рост скорости поверхностной рекомбинации сопровождается падением значения тока короткого замыкания. Значение напряжения холостого хода с ростом скорости поверхностной рекомбинации остаётся неизменным. Такую зависимость можно объяснить тем, что в исследуемой структуре напряжение холостого хода в основном зависит от внутренней рекомбинации носителей зарядов.

Результаты исследований показали, что для p-n-перехода при увеличении скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда ведёт к падению всех выходных характеристик фотоэлемента и эффективность снижается почти до нуля. Для структуры HIT падение эффективности наблюдалось лишь на сотые доли процента. Этот результат может быть связан с тем, что в случае с солнечным элементом, имеющим структуру HIT, кристаллическая кремниевая пластина с обеих сторон покрыта (пассивирована) слоем аморфного кремния собственной проводимости, который, является одним из наиболее эффективных пассивирующих материалов для применения в солнечной энергетике.



a) b)

a) зависимость напряжения холостого хода фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда, b) зависимость тока короткого замыкания фотоэлемента от СПР неосновных носителей заряда

Рисунок 3.25 – Зависимость выходных электрических характеристик HIT–структуры от скорости поверхностной рекомбинации (СПР) на фронтальной стороне

3.2.4 Влияние ITO слоя n типа проводимости на p-i-n–гетеропереход

В результате исследований были произведены расчёты зонных диаграмм гетеропереходов в исследуемой структуре. Далее будут представлены вычисления, сделанные для фотоэлемента структуры HIT. Расчёты были сделаны по методу, описанному в разделе 2. Основные параметры и начальные данные материалов, которые были использованы в расчётах, приведены в таблицах 3.9 и 3.10.

Результаты расчётов, выполненных по методу, описанному в разделе 2, показали, что минимальная допустимая толщина аморфного кремния в гетеропереходе ITO / p-a-Si:H должна составлять 3,42 нм (округляем до целых 4 нм), а ITO слоя – 0,53 нм. Тем не менее необходимо учесть влияние электрических полей и от других гетеропереходов структуры.

Для этого был исследован анизотипный гетеропереход p-a-Si:H / n-c-Si при комнатной температуре (T=300 K). Так как слой аморфного кремния собственной проводимости достаточно тонок и не создаёт наклона зон, то им можно пренебречь и рассматривать только p-n-переход структуры «сильнолегированный аморфный кремний p-типа проводимости – монокристаллический кремний n-типа проводимости» p-a-Si:H / n-c-Si. Основные параметры и начальные данные, используемые в расчётах, приведены в таблице 3.11. Концентрация дырок в исследуемой структуре равна $p = 7.47 \times 10^{19}\text{см}^{-3}$, концентрация электронов равна $n = 1.6 \times 10^{16}\text{см}^{-3}$.

Таблица 3.9 – Параметры материалов гетероперехода

Параметр	p-a-Si	ITO
$m_{\|\|}$ / m_0 (эффективная масса)	0,537	0,3
$m_{\|}$ / m_0	0,153	
M	1	
m_d / m_0	0,59	0,073
ΔE, эВ (ширина запрещённой зоны)	1,6	4
X_0, эВ (сродство к электрону)	3,9	4,5
E, эВ (диэлектрическая проницаемость)	11,9	2,2
m_c / m_0	0,41	
U_n , $см^2$/В с (подвижность носителей заряда)	элек. 20 дыр. 5	элек. 180 дыр. 110
τ, с (время жизни носителей заряда)	элек. 1,5 10^{-13} дыр. 1,6 10^{-15}	элек. 1 10^{-7} дыр. 5 10^{-4}
Э, эВ (Электроотрицательность)	4,6	3,9 6,9
n, $м^{-3}$ (концентрация)	7,47 10^{25}	2 10^{26}

Таблица 3.10 – Константы, используемые в расчётах гетероперехода

Название или обозначение константы	Значение
q, Кл	1.60 10^{-19}
масса электрона в вакууме, кг	9.10 10^{-31}
постоянная Больцмана, эВ/К	8.60 10^{-05}
число Пи	3.14
диэлектрическая постоянная	8.85 10^{-12}
постоянная Планка, Дж*с	6.63 10^{-34}
постоянная Больцмана, Дж/К	1.38 10^{-23}
температура, К	300
- q, Кл	-1.60 10^{-19}
kT	4.14 10^{-21}

Таблица 3.11 – Параметры материалов гетероперехода при температуре 300 К

Параметр	c-Si n-тип	a-Si p-тип
1	2	3
$m_{\|\|}$ / m_0	0,537	0,537
$m_{\|}$ / m_0	0,153	0,153
M	1	1
m_d / m_0	0,59	0,59
ΔE, эВ	1,12	1,6
X_0, эВ 1	4,01 2	3,9 3
E, эВ	12	11,9
m_c / m_0	0,41	0,41
U_n , $см^2$/В с	элек. 1350 дыр. 480	элек. 20 дыр. 5
$Д_n$, $см^2$/с	элек. 34,9 дыр. 12,42	элек. 34,9 дыр. 12,42
τ, с	элек. 2 10^{-5} дыр. 1 10^{-5}	элек. 1,5 10^{-13} дыр. 1,6 10^{-15}
Э, эВ	4,6	4,6

Исследования показали, что минимальная допустимая толщина аморфного кремния должна составлять 2,53 нм (округляем до целых 3 нм), а c-Si слоя – 289 нм. С учётом всех исследований с использованием метода расчёта гетероперехода можно констатировать, что минимальная толщина аморфного эмиттера p-типа проводимости в структуре HIT должна составлять 7 нм [101, стр. 103; 113].

3.2.5 Влияние тонкой плёнки аморфного гидрогенизированного кремния на пассивацию поверхностных состояний подложки кристаллического кремния

Как было показано во введении данной работы, одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность фотоэлемента структуры HIT, является пассивация поверхностных состояний на пластине кристаллической подложки.

Для исследования влияния пассивации кристаллического кремния плёнкой аморфного кремния методом PECVD на монокристаллической коммерческой подложке кремния с обоих сторон были выращены плёнки аморфного кремния толщиной 7, 30 и 50 нм. Затем на изготовленных образцах для определения

значений времени жизни неосновных носителей заряда использовался бесконтактный метод измерения Синтона. Результаты измерения характеристик образцов представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты измерений времени жизни ННЗ бесконтактным методом пластин монокристаллического кремния с сопротивлением R = 1,5 Ом·см, покрытых аморфной плёнкой толщиной 7 нм (для образцов kz_12 – kz_15), 30 нм (для образцов kz_02 – kz_05) и 50 нм (для образцов kz_06 – kz_11)

Наименование образца	Время жизни ННЗ (τ), мкс
kz_02	1063
kz_03	1020
kz_04	1278
kz_05	1070
kz_06	2295
kz_07	1890
kz_08	1621
kz_09	2016
kz_10	2461
kz_11	2009
kz_12	924
kz_13	630
kz_14	1053
kz_15	655

Как видно из таблицы, чем больше толщина нанесённой на кристаллическую подложку аморфной плёнки, тем больше значение времени жизни неосновных носителей заряда. Результаты исследования подтвердили качественную зависимость результатов работы других авторов [114].

На рисунке 3.26 показана зависимость времени жизни ННЗ от их концентрации при освещении светом, во время измерения. Очевидно, что наилучшее значение времени жизни показывают функционалы, соответствующие большей толщине аморфного пассивирующего слоя, равной 50 нм.

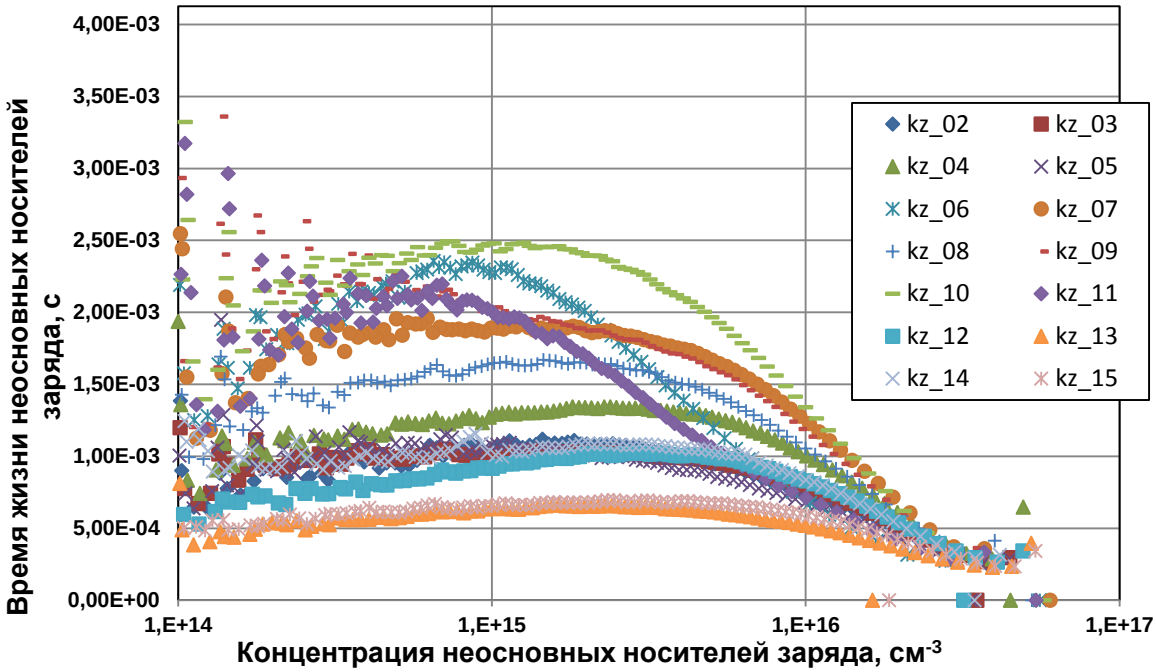


Рисунок 3.26 – Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от их концентрации

Далее образцы были исследованы методом фотолюминесценции при комнатной температуре (рисунок 3.27–3.29). На рисунках 3.27–3.29 изображения с большей яркостью соответсвуют большей концентрации неравновесных носителей заряда. С помощью данного метода удалось получить зависимость концентрации неравновесных носителей заряда от интенсивности излучения фотолюминесценции. Данные зависимости показали, что на образцах с меньшей толщиной аморфного кремния интенсивность меньше, нежели в образцах с большей толщиной аморфного слоя. Распередление по интенсивности излучения согласуются с данными измерения времени жизни неосновных носителей заряда у исследуемых структур.

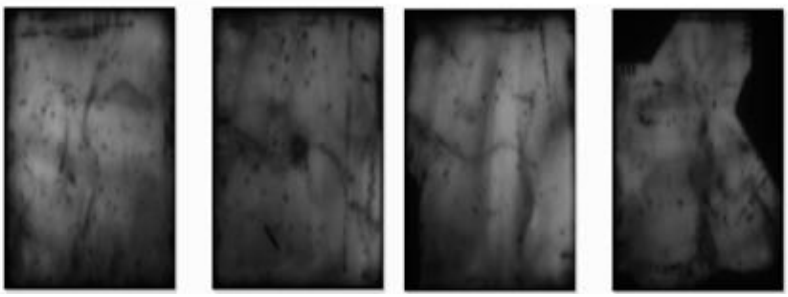


Рисунок 3.27 – Фотолюминесценция образцов кремниевых пластин с нанесённой на них плёнкой аморфного кремния толщиной 7 нм при комнатной температуре

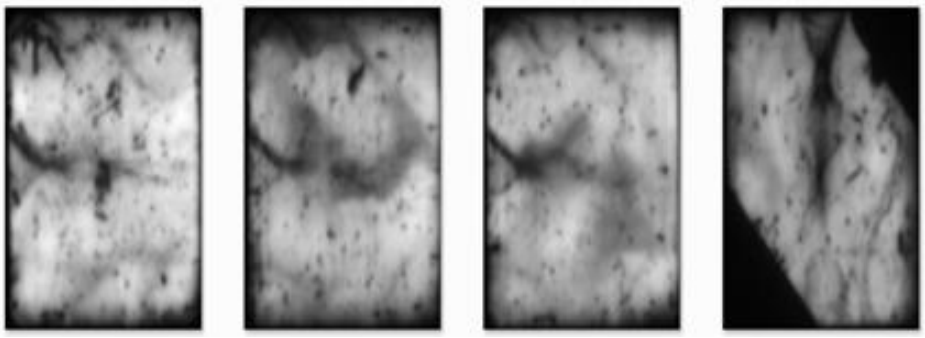


Рисунок 3.28 – Фотолюминесценция образцов кремниевых пластин с нанесённой на них плёнкой аморфного кремния толщиной 30 нм при комнатной температуре

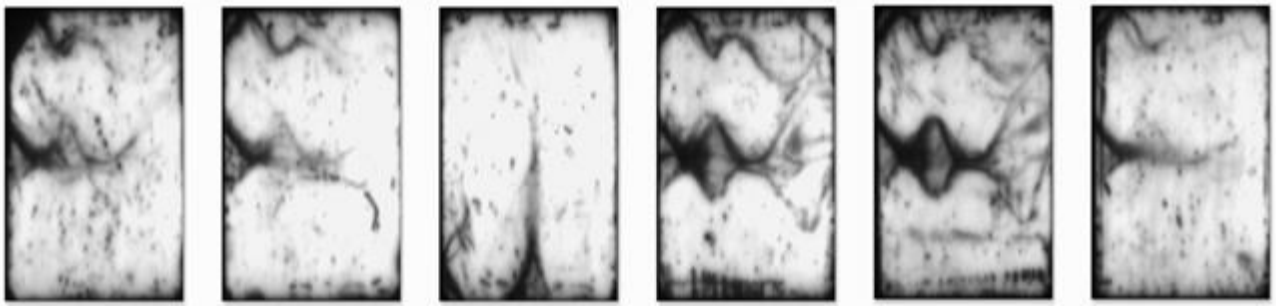


Рисунок 3.29 – Фотолюминесценция образцов кремниевых пластин с нанесённой на них плёнкой аморфного кремния толщиной 50 нм при комнатной температуре

В результате экспериментов было показано, что в фотоэлементах структуры HIT с увеличением толщины встроенного собственного слоя растёт эффективность фотоэлемента, но до определённой точки максимума. Рост характеристик обусловлен увеличением времени жизни неосновных носителей заряда в подложке кристаллического кремния. Это можно объяснить лучшей пассивацией поверхностных состояний на подложке кремния. Падение эффективности фотоэлемента после достижения точки экстремума объясняется тем, что с увеличением толщины растёт последовательное сопротивление структуры, которая с определённого момента вносит больший вклад в характеристики фотоэлемента, чем вклад от пассивации поверхностных состояний [115].

Также в работе [116] было показана зависимость времени жизни ННЗ от стадий влажной химической обработки. В ходе выполнения работ были проведены эксперименты по влажной химической обработке монокристаллических кремниевых пластин. Были получены образцы монокристаллических кремниевых пластин после различных этапов влажной химической обработки и измерены времена жизни неосновных носителей в данных образцах.

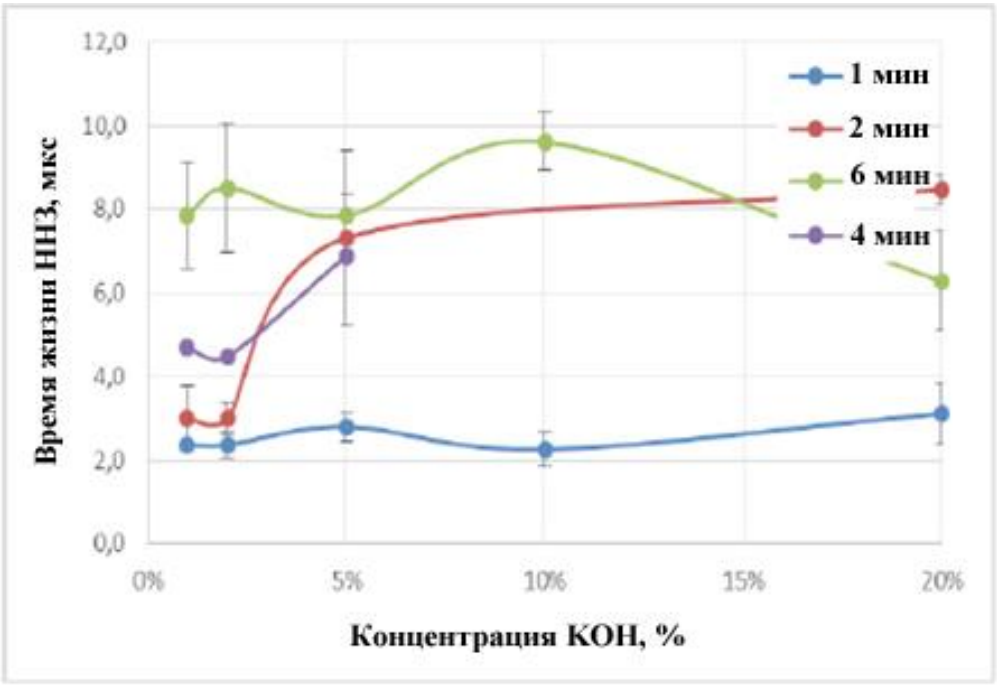


Рисунок 3.30 – Зависимость времени жизни ННЗ от концентрации травящего раствора [116, стр 111]

Эксперименты показали, что ощутимой разницы в приросте времени жизни ННЗ увеличение концентрации кислот в растворах не даёт (рисунок 3.30). Однако с увеличением времени травления кремниевых пластин растёт и время жизни неосновных носителей заряда в пластинах (рисунок 3.31) [116, стр. 111]. Рост времени жизни ННЗ объясняется тем, что при травлении пластин монокристаллического кремния стравливается нарушенный слой, тем самым уменьшается количество центров поверхностной рекомбинации носителей заряда. А из этого следует рост времени жизни неосновных носителей заряда в исследуемой структуре.

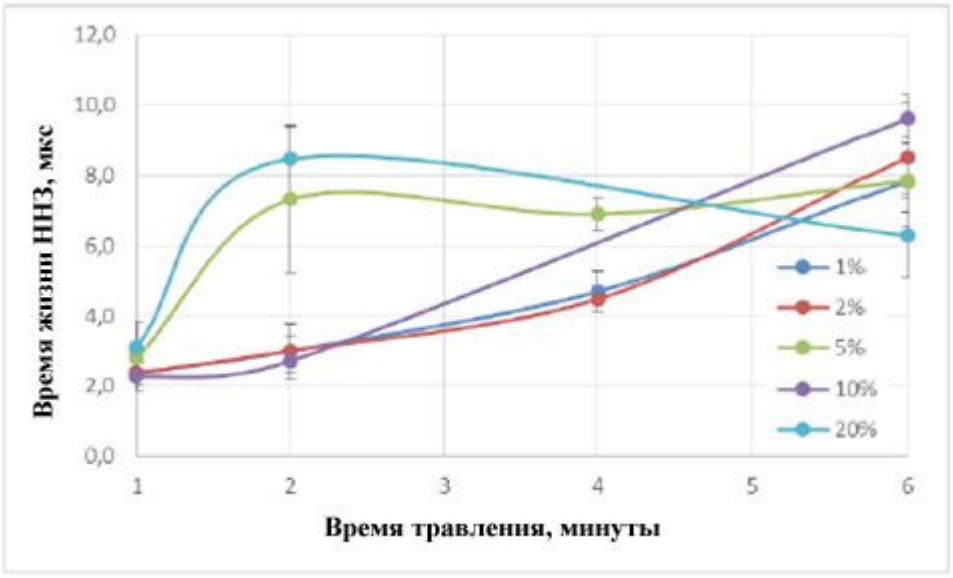
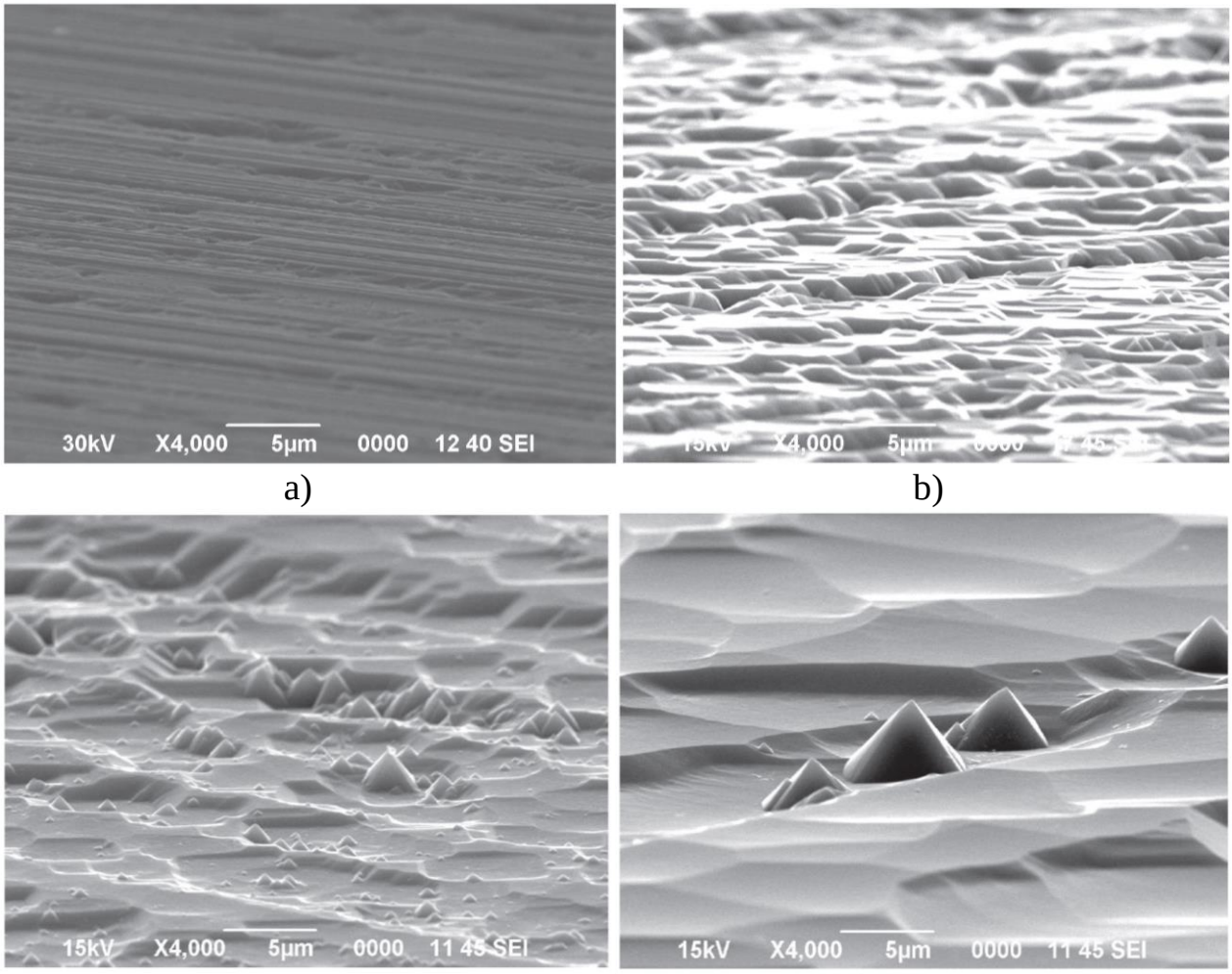


Рисунок 3.31 – Зависимость времени жизни ННЗ от времени травления в КОН

Процесс стравливания нарушенного слоя в щелочной среде представлен на рисунке 3.32. Изменение топологии поверхности пластины при травлении были измерены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).



a) b)

c) d)

a) исходный образец, b) травление в 10% растворе в течение 1-ой минуты, c) травление в 10% растворе в течение 2-х минут, d) травление в 10% растворе в течение 6-ти минут

Рисунок 3.32 – Изображения поверхности кремниевых пластин после травления, полученные при помощи СЭМ [116, стр. 113]

Исследований оптимизации структуры HIT показали, что:

— оптимальная толщина аморфного слоя p–типа проводимости должна быть как можно меньшей (как показало компьютерное моделирование), но не менее 7 нм (как показали исследования слоёв Шоттки);

— оптимальный уровень легирования примесями аморфного слоя p-типа проводимости должен быть порядка 10^{20} $см^{-3}$;

— оптимальная толщина фронтального слоя собственной проводимости должна быть как можно меньше (как показало компьютерное моделирование),

но не менее 5–7 нм (так как при такой толщине аморфной плёнки обеспечивается хорошая пассивация);

— оптимальная толщина подложки кристаллического кремния n–типа проводимости составляет 200 мкм;

— оптимальная степень легирования примесями в подложке кристаллического кремния зависит от параметров самой кристаллической пластины, в исследуемых образцах значение порядка 10^{17} $см^{-3}$;

— оптимальная толщина тыльного слоя собственной проводимости может принимать любые значения (как показало компьютерное моделирование), но как показали эксперименты не более 7–11 нм (так как при больших значений толщины аморфной плёнки прирост в качестве пассивации незначителен);

— оптимальный уровень легирования примесями аморфного слоя n-типа проводимости должен быть порядка 10^{20} $см^{-3}$;

— оптимальная толщина аморфного слоя n-типа проводимости может принимать любое значение, обеспечивающее необходимый энергетический барьер для неосновных носителей заряда (как показало компьютерное моделирование).

Можно сделать вывод, что оптимальные основные параметры фотоэлемента структуры HIT имеют значения, как показано в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Оптимизированные параметры компьютерной модели фотоэлемента структуры HIT

Название параметра	Значение параметра	Название параметра	Значение параметра
$d_{p\text{-a-Si}}$	7 нм	$N_{\text{a},p\text{-a-Si}}$	1×10^{20} $см^{-3}$
$d_{n\text{-c-Si}}$	200 мкм	$N_{\text{d},n\text{-c-Si}}$	2×10^{17} $см^{-3}$
$d_{n\text{-a-Si}}$	20 нм (любое, исключающее туннельный эффект)	$N_{\text{d},n\text{-a-Si}}$	1×10^{20} $см^{-3}$
$d_{i\text{-a-Si, front}}$	5-7 нм	$d_{i\text{-a-Si, rear}}$	7-11 нм

Выбор оптимальной величины фронтального и тыльного встроенного слоя собственной проводимости обусловлен приведёнными выше литературными и экспериментальными данными. На рисунке 3.33 из работы [114, p. 69] изображена зависимость времени жизни ННЗ от толщины аморфного кремния, нанесённого на кристаллическую кремниевую подложку.

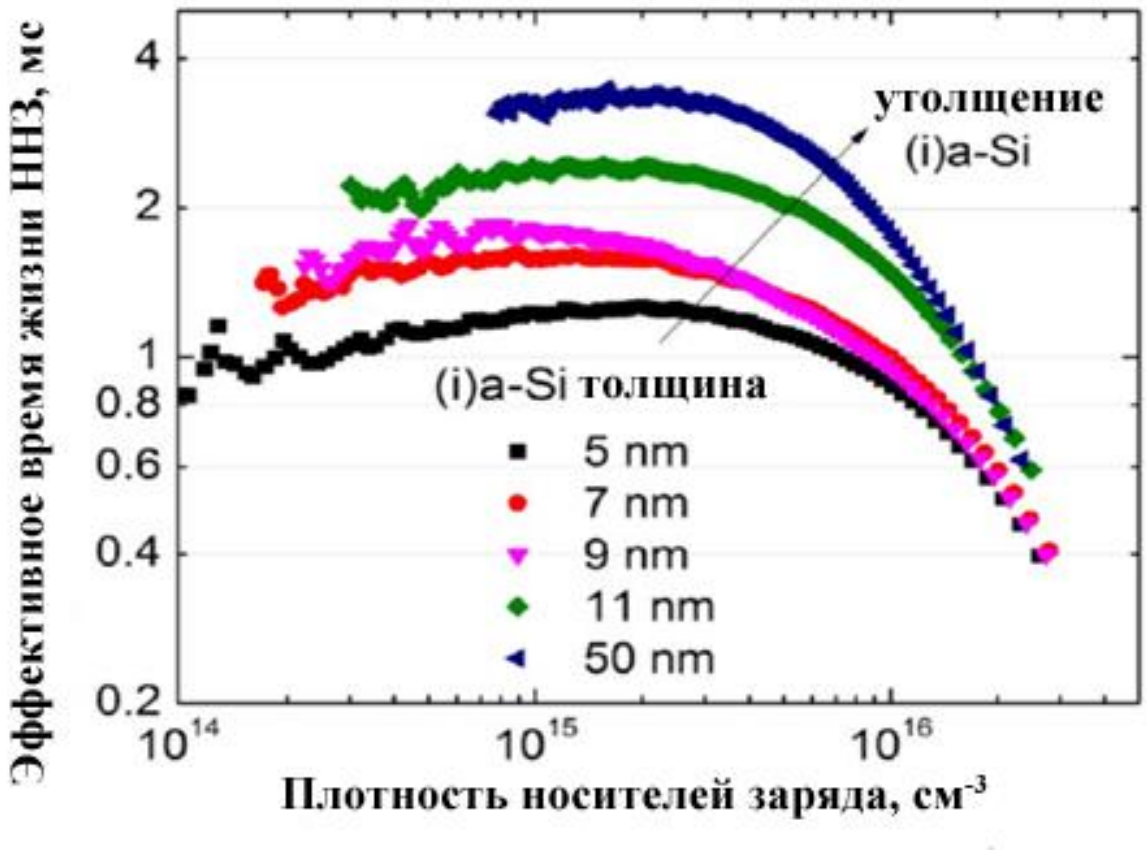
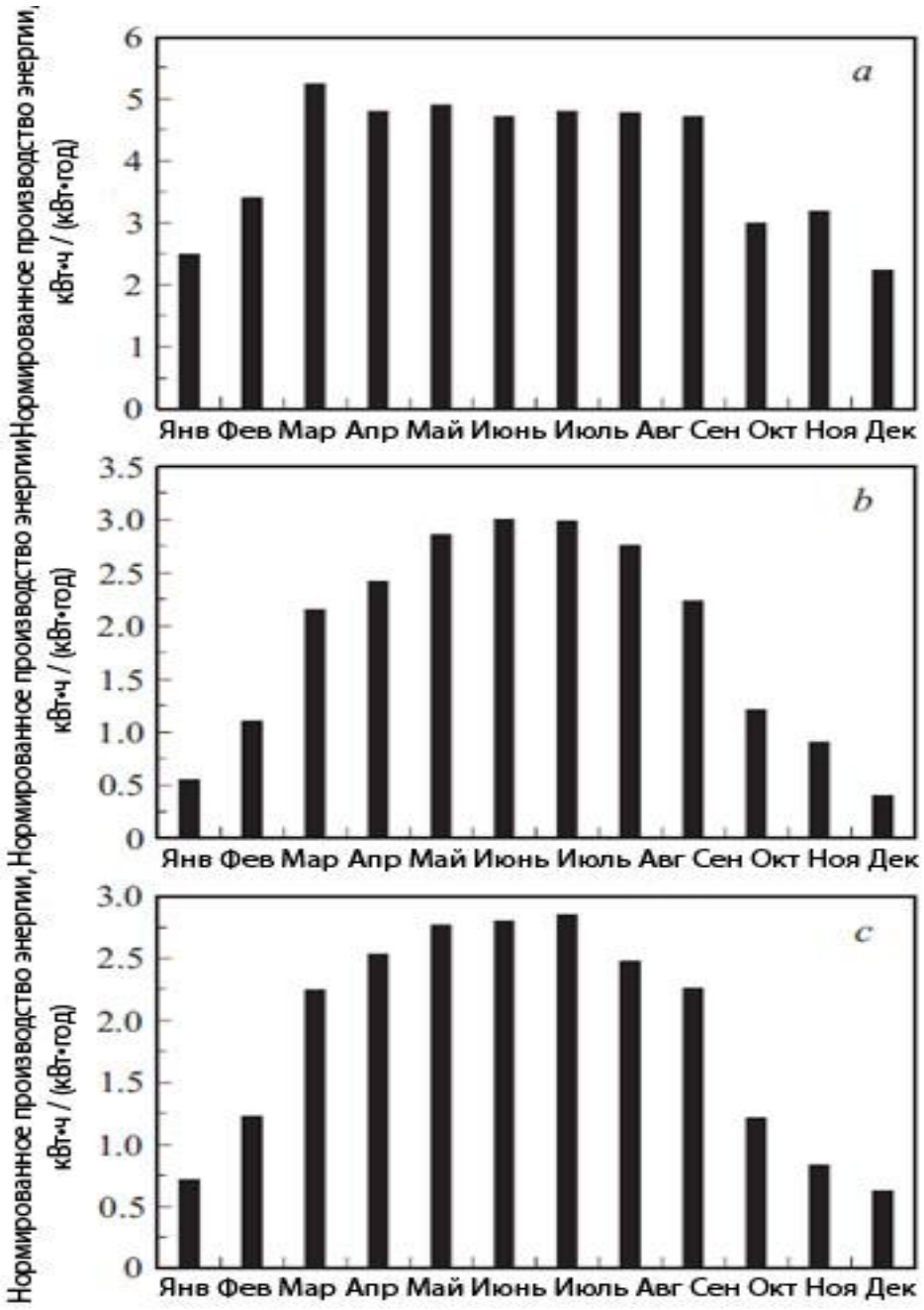


Рисунок 3.33 – Зависимость времени жизни НН3 от плотности носителей заряда и толщины нанесённой на кристаллическую подложку аморфной плёнки [114, p. 69]

Из графиков на рисунке 3.33 видно, что между толщиной аморфной плёнки 7 и 9 нм нет большой разницы, поэтому для фронтального встроенного слоя были выбраны значения 5–7 нм, так как компьютерная оптимизация требует минимальной толщины данного слоя. Однако, так как при компьютерной оптимизации для тыльного встроенного слоя нет таких требований к толщине, то для тыльного слоя были приняты значения 7–11 нм, так как они соответствуют более высоким временам жизни НН3. Далее, как видно из графика на рисунке 3.33, более высокое значение по толщине плёнки приводит к незначительному скачку в значении времени жизни НН3, а также в соотношении прироста время жизни к приросту толщины слоя.

Компьютерное моделирование — это современный метод исследования, позволяющий в короткие сроки сделать какие-либо прогнозы или расчёты относительно того или иного явления. Результаты компьютерного моделирования позволили применить модель оптимизированного фотоэлемента структуры HIT исследованиям, посвящённым использованию гетеропереходных солнечных элементов структуры HIT в условиях Казахстана [117,118].



а) конфигурация №1, b) конфигурация №2 для стороны солнечного элемента по направлению на восток, c) конфигурация №2 для стороны солнечного элемента по направлению на запад

Рисунок 3.34 – Производство электроэнергии в течение года солнечными элементами [117, p. 1879]

Для анализа характеристик солнечных элементов с двусторонней контактной сеткой была проведена оценка выходных характеристик подобных элементов в программном пакете AFORS-HET при освещении их с лицевой и тыльной сторон излучением с интенсивностью 1000 Вт/м^2, соответствующим условиям AM1.5. Для оценки перспективности изготовления солнечных модулей, использующих элементы с контактной сеткой, нанесённой на лицевой и тыльной поверхностях, были проведены модельные эксперименты по оценке

генерации электроэнергии солнечными модулями, состоящими из подобных элементов. Выбрано два способа расположения солнечных модулей. В конфигурации №1 солнечные модули располагались под углом 45°, направлены на юг. В конфигурации №2 модули располагались вертикально (под углом 90° относительно поверхности земли) так, чтобы фронтальная сторона была направлена на восток, а тыльная на запад.

Было обнаружено, что система двусторонних солнечных модулей, расположенных в конфигурации №1, способна производить ежегодно 33,73 кВт·ч электроэнергии, что соответствует эффективности выработки 1481 кВт·ч/(кВтр·год). Данный показатель демонстрирует перспективность солнечной электрогенерации в рассматриваемой локации при сравнении с соответствующими значениями для Германии (1000 кВт·ч/(кВт·год)) и Японии (1400 кВт·ч/(кВт·год)). Нормализованные значения произведённой электроэнергии в единицах [кВт·ч/(кВт·год)] по месяцам в течение одного года приведены на рисунке 3.34 - a. При рассмотрении двусторонних солнечных модулей, использующих солнечные элементы с контактной сеткой, нанесённой на лицевой и тыльной поверхностях, и расположенных в конфигурации №2 (рисунки 3.34 - b,c), наблюдалось уменьшение суммарной выработки по сравнению с конфигурацией №1 с величины 1481 кВт·ч/(кВт·год) до величины 1382 кВт·ч/(кВт·год). Однако преимущества конфигурации №2 по сравнению с конфигурацией №1 становятся очевидными при рассмотрении почасовой выработки электроэнергии в течение дня (рисунок 3.35) [117, p. 1880]. На рисунке 3.35 показано сравнение почасового производства электроэнергии солнечными элементами в конфигурациях №1 и №2 в один из солнечных дней, выпадающих на каждый из двенадцати месяцев в течение года. Условно, производство электроэнергии в конфигурации №2 имеет два пика, приходящихся на 11 и 16 часов в зимнее время, и на 8 и 18 часов в летнее время. Очевидно, что суммарная генерация для конфигурации №2 в летнее время превосходит суммарную генерацию для конфигурации №2 и приходится на наиболее энергоёмкие периоды суток — утро и вечер, что идеально соответствует потребностям потребителей. В зимние периоды, однако, конфигурация №1 имеет неоспоримое преимущество перед конфигурацией №2, генерируя в любое время суток аналогичное, либо превосходящее количество электроэнергии. Таким образом, можно предположить, что наиболее оптимальным вариантом использования двусторонних солнечных элементов и модулей с контактной сеткой, нанесённой на лицевой и тыльной поверхностях, является поочерёдное применение комбинации №1 в зимнее время и комбинации №2 в летнее время.

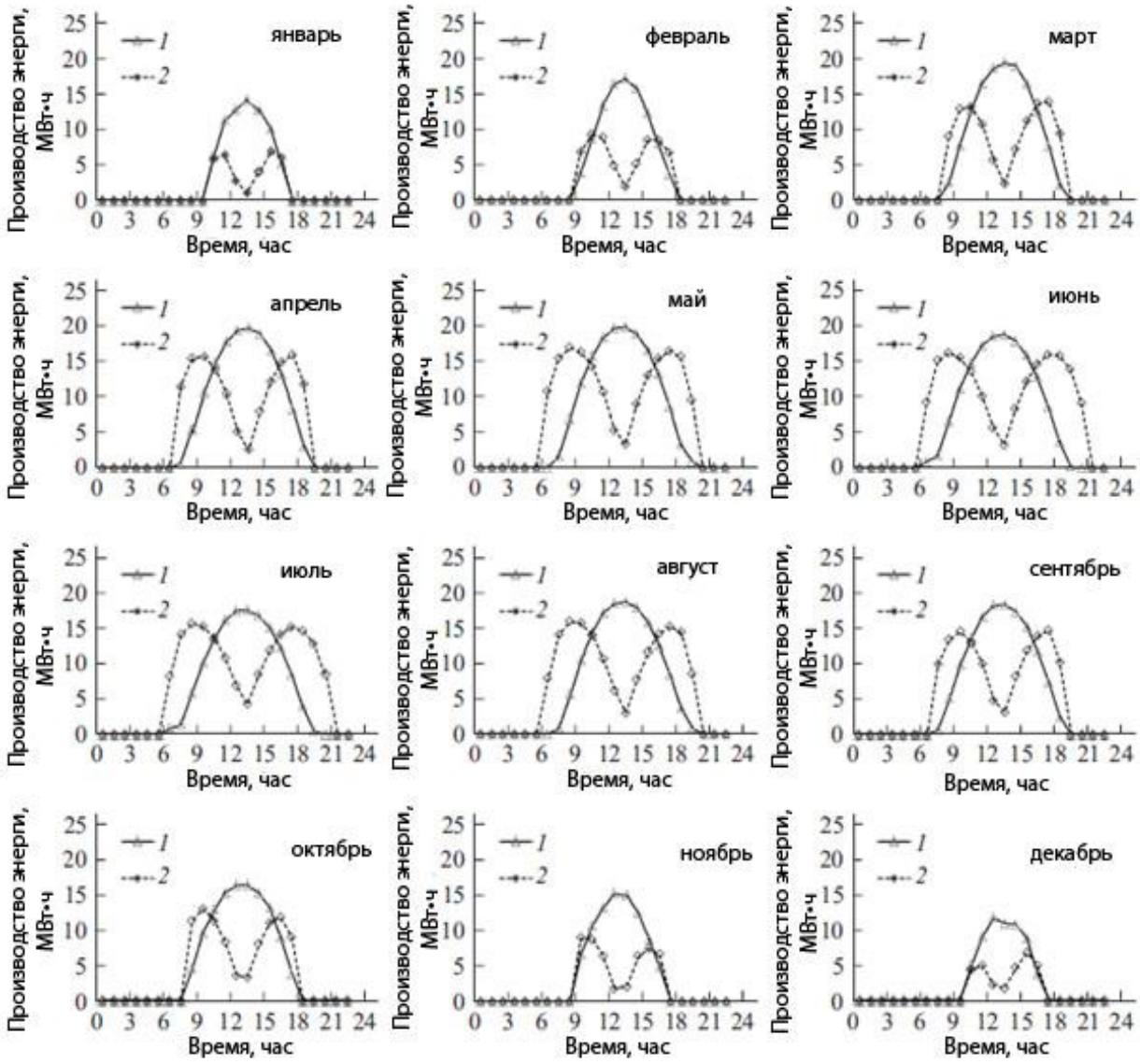


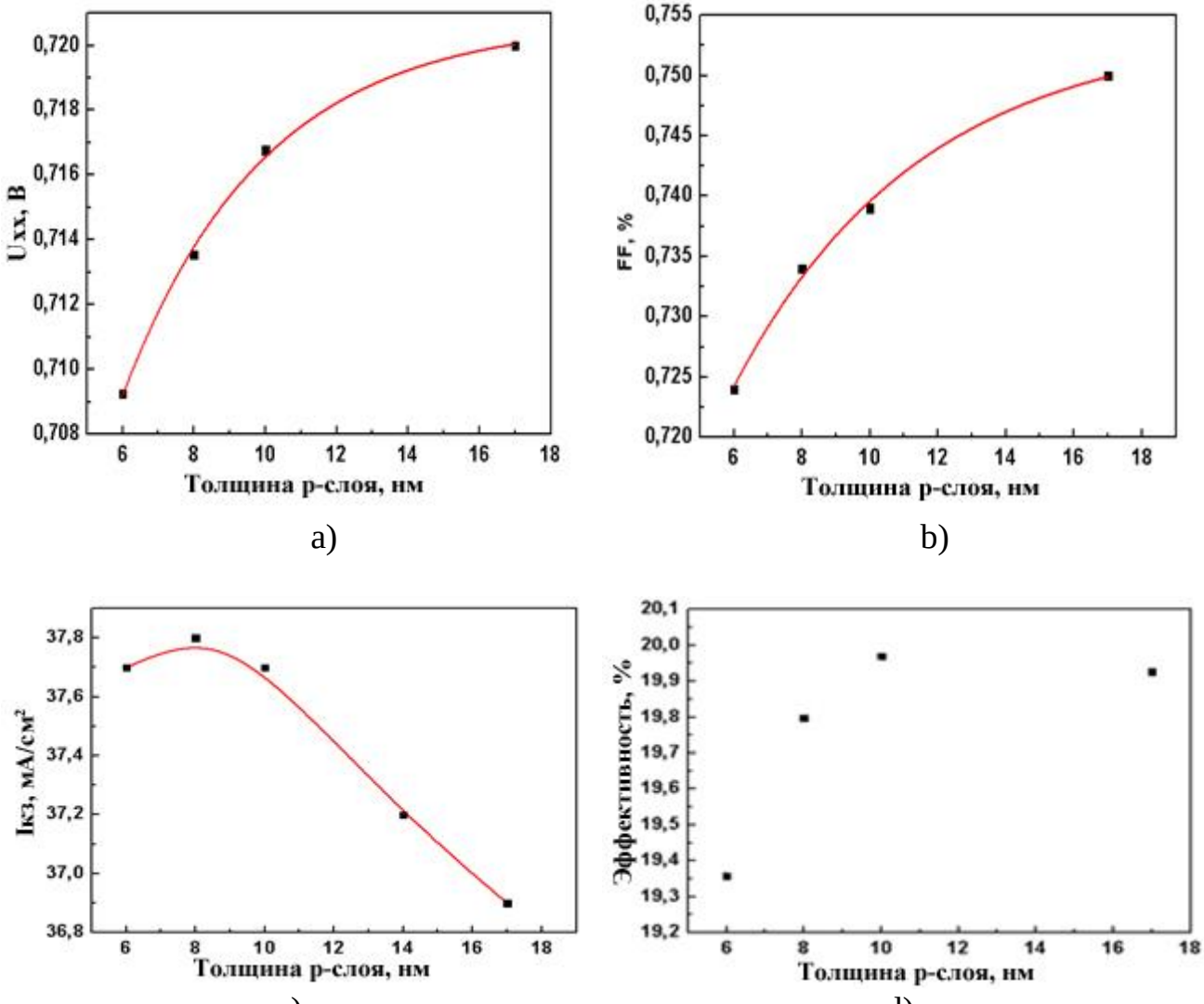
Рисунок 3.35 – Производство электроэнергии в течение суток солнечными элементами в один из солнечных дней, выпадающих на каждый из двенадцати месяцев в течение года [117, стр. 1880]

3.3 Исследования солнечного элемента структуры HIT

3.3.1 Оптимизация эмиттерного слоя p-типа проводимости

Легированный аморфный кремний является нефотоактивным материалом, это значит, что в солнечном элементе HIT фронтальный p–слой является, по сути, светофильтром, снижающим интенсивность света, проходящего в кремниевую пластину. Очевидно, что для увеличения фототока необходимо использовать p–слой с минимальной толщиной, обеспечивающей формирование полупроводникового перехода. Но при этом необходимо заметить, что на оптимальную величину толщины аморфной плёнки может влиять как ограничения технологического процесса, так и иные физические явления, связанные с областью гетероперехода или пассивацией поверхности монокристаллической кремниевой подложки.

Исследование эффекта уменьшения толщины p–слоя на ФЭП было проведено на лабораторных элементах размером 100x100 мм. Для каждого уровня легирования была изготовлена серия из 5 образцов. Для изготовления образцов были использованы коммерческие пластины Nexolon n-типа проводимости толщиной 200 мкм, текстурированные в «НТЦ тонкоплёночных технологий в энергетике» (при ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). Полученные результаты приведены на рисунке 3.36.



a) Зависимость напряжения холостого хода от толщины эмиттерного слоя p–типа проводимости, b) зависимость фактора заполнения от толщины p–слоя, c) зависимость тока короткого замыкания от толщины эмиттерного слоя, d) зависимость эффективности ФЭП от толщины эмиттерного слоя

Рисунок 3.36 – Параметры ФЭП с различной толщиной p–слоя

Наиболее ярко выраженным эффектом уменьшения толщины p–слоя является увеличения тока короткого замыкания ячейки вследствие уменьшения поглощения света в коротковолновой области спектра (рисунок 3.36 – c).

Увеличение тока продолжается вплоть до толщины p–слоя 8 нм. При меньших толщинах p–слоя величина тока начинает уменьшаться, что, по-видимому, связано с деградацией p-n–перехода в связи с уменьшением толщины p–слоя до величины, меньшей толщины области объёмного заряда. Это так же может быть связано с недостаточной пассивацией поверхностных состояний на подложке кристаллического кремния. Помимо увеличения тока короткого замыкания, уменьшение толщины p–слоя приводит к некоторому уменьшению напряжения холостого хода и форм-фактора (рисунок 3.36 – a,b). Уменьшение значения напряжения холостого хода связано с рекомбинацией носителей заряда в структуре. Исходя из этого, можно сказать, что при уменьшении толщины слоя аморфного кремния увеличивается рекомбинация носителей заряда. Совместное влияние этих всех факторов приводит к тому, что в зависимости эффективности ФЭП от толщины p–слоя наблюдается максимум при толщине p–слоя 10 нм (рисунок 3.36 – d) [100, стр. 103; 113, p. 4].

3.3.2 Оптимизация толщины BSF–слоя

В отличие от фронтального p–слоя, играющего роль светофильтра, n–слой находится на тыльной поверхности ФЭП, поэтому эффект его толщины на параметры солнечных элементов не столь велик. В тоже время очевидно, что, с одной стороны, n–слой должен иметь толщину, достаточную для формирования полупроводникового перехода, а, с другой стороны, снижение производственных затрат требует использования n–слоя с минимальной толщиной.

Влияние толщины n-a-Si:H слоя на параметры HIT ФЭП приведено в таблицах 3.14 и 3.15, в которых собраны усреднённые значения по 7-ми образцам. Как видно из таблицы 3.14, оптимальное значение толщины n-a-Si:H слоя = 20 нм. В исследуемых образцах толщина фронтального и тыльного слоя собственного проводимости составляла 7 нм.

Таблица 3.14 – Средние значения параметров HIT ФЭП, изготовленных с использованием пластин Ferrotec n–типа проводимости толщиной 200 мкм, в зависимости от толщины a-Si:H n–слоя

Толщина n-слоя	Тип пластин	ρ (Ω cm)	VOC (V)	ISC_corr (A)	FF (%)	Eff. Abs. (%)
25 нм	Ferrotec	2.08	0.711	3.411	73.83	18.64
20 нм	Ferrotec	2.04	0.713	3.465	74.37	19.14
15 нм	Ferrotec	2.13	0.706	3.467	74.17	18.99
10 нм	Ferrotec	2.07	0.703	3.48	73.71	18.77

Так же была изготовлена серия образцов с различной толщиной n–слоя на пластинах кристаллических подложек другого производителя (таблица 3.15).

Таблица 3.15 – Средние значения параметров HJT ФЭП, изготовленных с использованием пластин Norsun n–типа проводимости толщиной 200 мкм, в зависимости от толщины a-Si:H n–слоя

Толщина n-слоя	Тип пластин	ρ (Ω cm)	VOC (V)	ISC_corr (A)	FF (%)	Eff. Abs. (%)
20 нм	Norsun	2.33	0.719	3.416	73.95	18.91
30 нм	Norsun	2.35	0.720	3.403	74.36	18.97
40 нм	Norsun	2.43	0.718	3.430	73.91	18.94

Как видно из таблицы 3.15, при использовании пластин Norsun n–слой толщиной 30 нм приводит к более высокому значению фактора заполнения по сравнению с n–слоем толщиной 20 нм. Таким образом, оптимальная толщина n-слоя может отличаться для различных пластин, что согласуется с исследованиями компьютерной модели. Такая зависимость может быть связана с тем, что генерация и разделение электронно-дырочных пар в приборе происходит в другой области ФЭП. Запирающий слой n–типа проводимости отвечает за создание барьера неосновных носителей заряда.

3.3.3 Оптимизация толщины встроенного i–слоя собственного типа проводимости

Аморфный гидронезированный слой собственной проводимости (i-a-Si:H), в HIT–структуре, встроенный между слоем кристаллического кремния и эмиттера, а также запирающим слоем, играет важную роль для повышения эффективности ФЭП. Главной задачей встроенного слоя является пассивация поверхностных состояний на кристаллической подложке, что позволяет увеличить время жизни неосновных носителей заряда до 1500–3000 микросекунд. Для определения влияния толщины слоя собственного аморфного кремния, а также удельного сопротивления пластин на параметры HIT ФЭП использовались кремниевые пластины Atecom n–типа проводимости толщиной 200 мкм. Удельное сопротивление пластин варьировалось от 1.3 до 1.4 Ом·см. Толщина i-a-Si:H слоя варьировалась как с лицевой, так и с тыльной стороны. Толщина фронтального слоя варьировалась от 5 до 7 нм, при этом толщина тыльного слоя оставалась постоянной (7 нм). Поскольку поглощение света слоем аморфного кремния является критическим только с фронтальной стороны, а толщина i-a-Si:H слоя определяет значение напряжения холостого хода V_{OC}, было решено варьировать толщину (от 7 до 11 нм, при постоянной толщине фронтального слоя 7 нм) i-a-Si:H слоя с тыльной стороны, то есть со стороны n-слоя. Как видно из рисунка 3.37, оптимальным значением толщины фронтального i-a-Si:H слоя является 7 нм, так как напряжение холостого хода имеет наибольшее значение именно в точке, соответствующей 7 нм, что согласуется с исследованиями компьютерной модели.

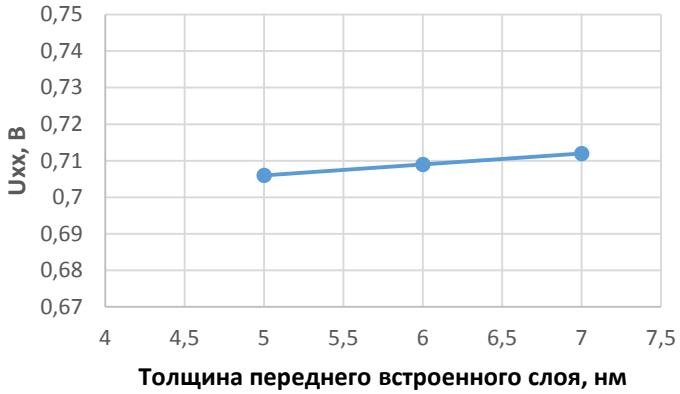
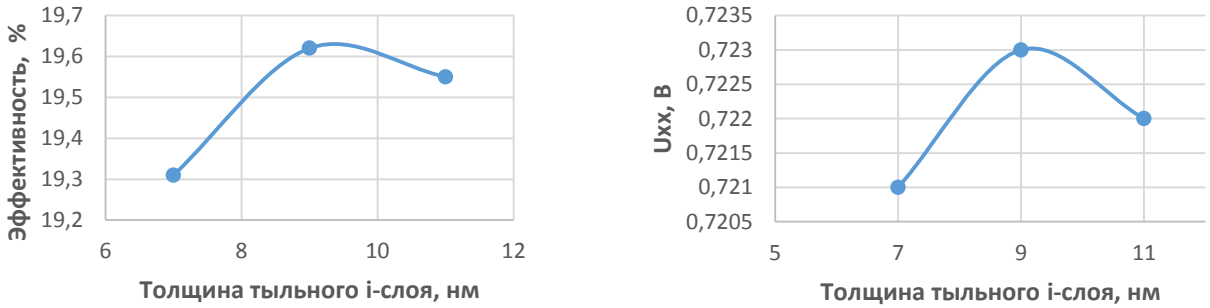


Рисунок 3.37 – Зависимость напряжения холостого хода фотоэлемента структуры HIT от изменения толщины фронтального встроенного аморфного слоя собственной проводимости

Исследования показали, что для тыльного слоя i-a-Si:H оптимальным значением является 9 нм (рисунок 3.38), что согласуется с исследованиями компьютерной модели. Большее значение напряжения холостого хода в точке 9 нм по сравнению со значением в точке 7 нм можно объяснить уменьшением рекомбинации носителей заряда вследствие увеличения пассивации поверхностных состояний кристаллической подложки плёнкой аморфного кремния. На отрезке графика от 9 до 11 нм оказывает сильное влияние увеличение последовательного сопротивления структуры и напряжение холостого хода падает (рисунок 3.38 – b). Такая зависимость напряжения холостого хода согласуется с зависимостью эффективности фотоэлемента от изменения толщины встроенного тыльного слоя (рисунок 3.38 – a).



a) b)

a) Зависимость коэффициента полезного действия фотоэлемента структуры HIT от изменения толщины тыльного встроенного аморфного слоя собственной проводимости, b) зависимость напряжения холостого хода фотоэлемента структуры HIT (ось ординат) от изменения толщины тыльного встроенного аморфного слоя собственной проводимости

Рисунок 3.38 – Зависимость выходных электрических параметров фотоэлемента структуры HIT от изменения толщины тыльного встроенного аморфного слоя собственной проводимости

Наличие точки максимума в зависимостях, изображённых на рисунке 3.38, можно объяснить тем, что при нанесении плёнки аморфного кремния собственной проводимости на кристаллическую кремниевую подложку происходит пассивация поверхностных состояний подложки. Пассивация поверхности кремниевой подложки приводит к увеличению времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводнике. Чем толще слой аморфной плёнки, тем выше время жизни неосновных носителей заряда. Такая зависимость приводит к росту эффективности фотоэлемента с ростом толщины аморфного слоя. Однако, аморфный кремний является материалом с низкими значения подвижности зарядов. Это приводит к тому, что увеличение толщины аморфного слоя приводит к увеличению сопротивления структуры и эффективность элемента падает с ростом толщины аморфного слоя. Такая зависимость эффективности согласуется с зависимостью, показанной на рисунке 3.38 – b, где изображена кривая напряжения холостого хода. А напряжение холостого хода в основном зависит от рекомбинации носителей заряда в структуре ФЭП. То есть меньшее количество поверхностных состояний на границе раздела полупроводников приводит к меньшей рекомбинации носителей заряда, однако увеличение толщины аморфного слоя увеличивает возможность рекомбинации зарядов. На графике точка максимума указывает на такую толщину аморфного слоя, при которой оба эффекта от встроенного слоя равнозначны. Но с увеличением толщины падение эффективности становится более быстрым, чем её рост.

3.3.4 Характеристики оптимизированных фотоэлементов

Следуя оптимизированным параметрам, показанным в разделе 3, были изготовлены фотоэлементы и измерены их характеристики. Измерение ВАХ проводилось на установке PV–Measurements. Методика измерения заключается в снятии зависимости тока, проходящего через образец от подаваемого напряжения, а также расчёта сопротивления. Измерения проводятся при условиях темноты и при условиях имитации солнечного излучения на ФЭП.

Как показано в таблице 3.16, изготовленные оптимизированные элементы имеют эффективность более 20%, что совпадает с расчётами, представленными в третьем разделе настоящей работы. Дизайн изготовленных и смоделированного фотоэлементов аналогичен, но в реальном образце могут быть иная степень уровня легирования слоёв, различные качества металлических контактов и, также, качество кристаллического слоя в кремнии и реальном образце может быть различным. Эти различия могут повлиять на выходные характеристики фотоэлемента. Например, большее значение тока короткого замыкания в реальном образце можно объяснить различиями в параметрах, отвечающими за рекомбинацию носителей заряда в образце, а также параметров, отвечающих за отражение, пропускание и поглощение света в структуре HIT. Различия в значениях форм-фактора модели и изготовленного ФЭП объясняется тем, что при менее качественных или неидеальных контактах последовательное и параллельное сопротивление структуры отличаются от

идеального случая, что отражается на форм-факторе исследуемых фотоэлементов HIT.

Таблица 3.16 – ВАХ характеристики изготовленных HIT–фотоэлементов

Образец	$I_{кз}$, мА/см^2	$U_{хх}$, мВ	FF, %	Эффективность, %
FE_SW_1	37,7	713	77,18	20,64
Компьютерная оптимизация	33,6	734	85,06	20,98

Измерение квантовой эффективности проводилось при помощи установки PV Measurements QEX10. Результаты измерений изображены на рисунке 3.39. Результаты исследования показали, что основное поглощение фотонов происходит в видимой и красной области спектра (рисунок 3.39).

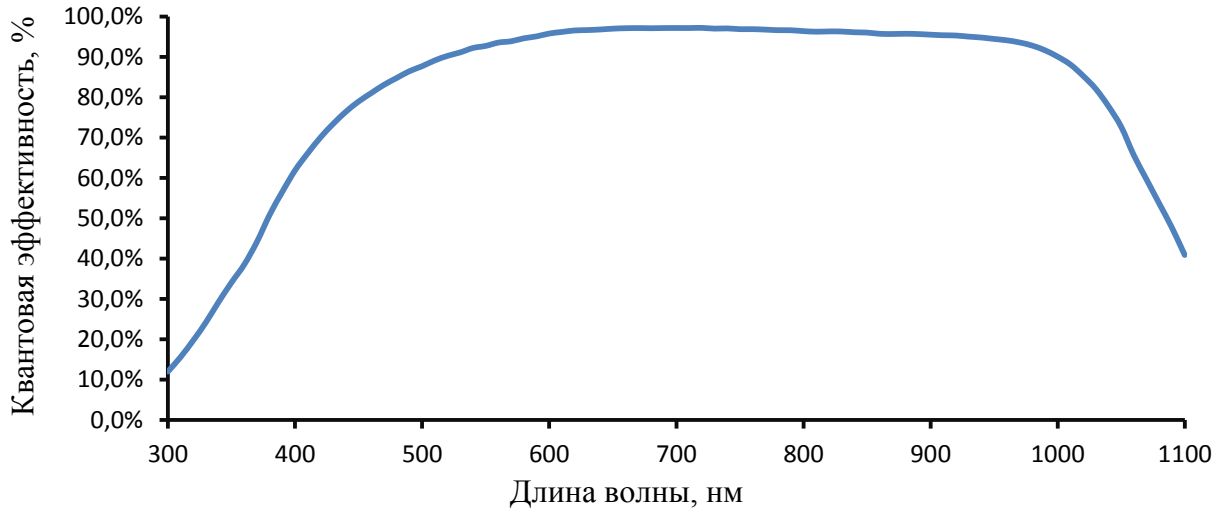


Рисунок 3.39 – Квантовая эффективность одного из изготовленных солнечных элементов

Выводы по разделу

В результате исследований предложен метод оптимизации компьютерной модели фотоэлемента структуры HIT. Для сравнения были опробованы разные варианты оптимизации, где лучшим вариантом оказался способ, соответствующий предложенной методике.

В ходе исследовательских работ смоделирован фотоэлемент структуры HIT в программе AFORS-HET, а затем оптимизирован по авторской методике.

Так же в метод оптимизации были включены дополнительные расчёты гетероперехода между слоями ФЭП по модели гетероперехода Андерсона. Помимо этого, в ходе оптимизации структуры учтены экспериментальные результаты по пассивации дефектов на поверхности кремниевых монокристаллических пластин нанесением слоя тонкого аморфного гидрогенизированного кремния собственного типа проводимости. В совокупности данных компьютерной оптимизации и дополнительных расчётов, а также учёта экспериментальных данных по пассивации кремния, была показана компьютерная оптимизированная модель фотоэлемента.

В ходе оптимизации фотоэлемента HIT были получены следующие результаты:

— Методом компьютерного моделирования и теоретическим исследованием слоёв Шоттки установлено, что оптимальная толщина аморфного слоя p–типа проводимости составляет 7 нм;

— оптимальный уровень легирования примесями аморфного слоя p–типа проводимости имеет значение порядка 10^{20} $см^{-3}$;

— Методом компьютерного моделирования, а также анализом экспериментальных и литературных данных установлено, что оптимальная толщина фронтального слоя собственной проводимости находится в диапазоне 5–7 нм, так как при такой толщине аморфной плёнки обеспечивается хорошая пассивация;

— оптимальная толщина подложки кристаллического кремния n–типа проводимости составляет 200 мкм;

— оптимальная степень легирования примесями в подложке кристаллического кремния зависит от параметров самой кристаллической пластины, в исследуемых образцах значение порядка 10^{17} $см^{-3}$;

— Методом компьютерного моделирования и анализом экспериментальных данных установлено, что оптимальная толщина тыльного слоя собственной проводимости находится в диапазоне 7–11 нм, так как при больших значений толщины аморфной плёнки прирост в качестве пассивации не значителен;

— оптимальный уровень легирования примесями аморфного слоя n-типа проводимости должен быть порядка 10^{20} $см^{-3}$;

— Методом компьютерного моделирования определено, что оптимальная толщина аморфного слоя n–типа проводимости может принимать любое значение, обеспечивающее необходимый энергетический барьер для неосновных носителей заряда.

Исследованы оптимальные зонные характеристики контакта «металл-полупроводник», построена компьютерная модель фотоэлемента с омическим контактом и контактом Шоттки. Представленные результаты свидетельствуют о значительном влиянии контактных материалов на выходные характеристики гетеропереходных кремниевых солнечных элементов. Основным параметром, оказывающим влияние на эффективность солнечных элементов, является работа выхода контактного материала.

Результаты компьютерного моделирования показали, что для p-n-перехода увеличении скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда ведёт к падению всех выходных характеристик фотоэлемента и эффективность снижается почти до нуля. Для структуры HIT падение эффективности наблюдалось лишь на сотые доли процента. При этом, экспериментальные исследования показали, что при увеличении толщины аморфного кремния собственной проводимости увеличивается время жизни неосновных носителей заряда монокристаллической кремниевой подложки.

В результате исследований были найдены основные оптимальные параметры компьютерной модели фотоэлемента HIT. Проведены исследования с использованием компьютерной модели, которые показали возможности использования двусторонних фотоэлементов HIT на территории Казахстана.

Были исследованы гетеропереходные солнечные элементы структуры HIT с различными параметрами. Произведён анализ таких характеристик изготовленных фотоэлементов, как напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, форм-фактор и эффективность. Результаты экспериментов показали, что максимум эффективности ФЭП наблюдается при толщине p-слоя 10 нм. В ходе эксперимента показано, что оптимальная толщина n-слоя может отличаться для различных пластин. Показано, что оптимальным значением толщины фронтального i-a-Si:H слоя является 7 нм, в то время как для тыльного слоя i-a-Si:H оптимальным значением является 9 нм. Результаты экспериментальных исследований сравнивались с результатами раздела компьютерного моделирования.

На территории ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН во время зарубежной стажировки была освоена технология производства ФЭП структуры HIT и изготовлены фотоэлементы описанной выше структуры. Лучшие оптимизированные фотоэлементы имели эффективность порядка 21% [113, стр. 65].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы проведённых исследований состоят в следующем:

1) Отработан метод улучшения стандартной технологии путём оптимизации технологических параметров формирования структуры гетеропереходных солнечных элементов, влияющих на их выходные характеристики.

2) Методом компьютерного моделирования определены параметры, влияющие на эффективность гетеропереходных кремниевых солнечных элементов. Был разработан алгоритм оптимизации компьютерной модели.

3) Проведена оптимизация компьютерной модели фотоэлемента структуры HIT, с использованием комплексного подхода, включающего в себя компьютерное моделирование на базе программного пакета AFORS-HET, теоретическое исследование слоёв Шоттки, а также анализ экспериментальных данных. Установлено, что оптимальные параметры функциональных слоёв фотоэлемента структуры HIT:

— толщина аморфного слоя p–типа проводимости составляет 7 нм, а уровень легирования примесями имеет значение порядка 10^{20} $см^{-3}$;

— толщина подложки кристаллического кремния n–типа проводимости составляет 200 мкм, степень легирования примесями зависит от параметров самой кристаллической пластины, в исследуемых образцах значение порядка 10^{17} $см^{-3}$;

— толщина аморфного слоя n–типа проводимости может принимать любое значение, обеспечивающее необходимый энергетический барьер для неосновных носителей заряда, оптимальный уровень легирования примесями должен быть порядка 10^{20} $см^{-3}$.

4) Показано, что с увеличением толщины встроенного слоя аморфного кремния собственной проводимости уменьшается количество поверхностных дефектов, но при этом увеличивается сопротивление структуры. Оптимальная толщина для фронтального слоя собственной проводимости составляет 5–7 нм. Для тыльного слоя собственной проводимости оптимальная толщина находится в диапазоне 7–11 нм.

5) Методами измерения оптических и ВАХ характеристик, установлено, что эффектом уменьшение толщины p–слоя является увеличение значения тока короткого замыкания фотоэлемента, которое происходит вплоть до толщины p–слоя 8 нм, а затем уменьшается. Помимо повышения тока короткого замыкания, происходит снижение напряжения холостого хода и форм-фактора, что связано с рекомбинацией носителей заряда в структуре.

6) Показано, что максимум эффективности ФЭП наблюдается при толщине p–слоя 10 нм, оптимальная толщина n-слоя может отличаться для различных пластин, оптимальным значением толщины фронтального i-a-Si:H слоя является 7 нм, в то время как для тыльного слоя i-a-Si:H оптимальным значением является 9 нм. Такая зависимость обусловлена влиянием аморфной

плёнки на напряжение холостого хода, что может быть связано с изменением вероятности рекомбинации носителей заряда в структуре.

7) Показана возможность оптимизации технологических параметров структуры солнечных элементов посредством компьютерного моделирования, установлены оптимальные значения характеристик HIT ФЭП, которые можно использовать в промышленном производстве фотоэлементов, а также изготовлены оптимизированные экспериментальные HIT прототипы с эффективностью более 20 % и исследованы их характеристики.

Таким образом, проведённые исследования показывают, что PECVD методом можно получать гетеропереходные фотоэлементы HIT физическими свойствами которых можно эффективно управлять путём легирования и изменением толщины функциональных слоёв. А также установлены оптимальные значения характеристик HIT ФЭП, которые можно использовать в промышленном производстве фотоэлементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Chadha M. China Withdraws Support For 75% Of Solar Equipment Manufacturers. – 2014. https://cleantechnica.com 20.11.2014.

2 Protest over factory pollution in E China enters third day. – 2011. http://www.chinadaily.com.cn 20.11.2014.

3 Kryuchenko Y. V., Sachenko A. V., Bobyl A. V., Kostylyov V. P., Sokolovskyi I. O., Terukov E. I., Tokmoldin N., Tokmoldin S. Z., Smirnov A. V. Evaluation of the annual electric energy output of an a-Si:H solar cell in various regions of the CIS countries // Energy Policy. – 2014. – Vol. 68. – P. 116–122.

4 Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 41) // Progress in Photovoltaics. – 2013. – Vol. 21, № 1. – P. 1–11.

5 Street R. A. (ed.). Technology and applications of amorphous silicon. – Springer Science & Business Media, 2013. – Vol. 37.

6 Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 43) // Progress in Photovoltaics. – 2014. – Vol. 22, № 1. – P. 1–9.

7 Tanaka M., Taguchi M., Matsuyama T., Sawada T., Tsuda S., Nakano S., Hanafusa H., Kuwano Y. Development of new a-si c-si heterojunction solar-cells - acj-hit (artificially constructed junction-heterojunction with intrinsic thin-layer) // Japanese Journal of Applied Physics Part 1–Regular Papers Short Notes & Review Papers. – 1992. – Vol. 31, № 11. – P. 3518–3522.

8 Tanaka M., Okamoto S., Tsuge S., Kiyama S. Development of hit solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance hit modules // Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vols a–C. – 2003. – P. 955–958.

9 Tsunomura Y., Yoshimine Y., Taguchi M., Baba T., Kinoshita T., Kanno H., Sakata H., Maruyama E., Tanaka M. Twenty-two percent efficiency HIT solar cell // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2009. – Vol. 93, № 6–7. – P. 670–673.

10 Kawai M. Sanyo Claims 98 Micron-thick HIT Solar Cell With 22.8% Efficiency. – 2009. https://tech.nikkeibp.co.jp 10.03.2015.

11 Masuko K. et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell //IEEE Journal of Photovoltaics. – 2014. – Vol. 4. – №. 6. – P. 1433–1435.

12 Schiermeier Q. et al. Energy alternatives: Electricity without carbon. //Nature. 2008. Vol. 454. P. 816–823.

13 Swanson R.M. Applied physics. Photovoltaics power up. // Science. – 2009. – Vol. 324. – P. 891–892.

14 Swanson R.M. A vision for crystalline silicon photovoltaics // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2006. – Vol. 14. – P. 443–453.

15 Luque A., Hegedus S. Photovoltaic science and engineering. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – P. 1168.

16 D. M. Chapin C.S.F. and G.L.P. A New Silicon pn Junction Photocell for ... Radiation into Electrical Power Davis // J. Appl. Phys. – 1954. – Vol. 25. – P. 676–677.

17 Yoshikawa K. et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back

contacts for a photoconversion efficiency over 26% //Nature Energy. – 2017. – Vol. 2. – №. 5. – P. 17032.

18 Benick J. et al. High-efficiency n-type HP mc silicon solar cells //IEEE journal of photovoltaics. – 2017. – Vol. 7. – №. 5. – P. 1171–1175.

19 Андреев В.М. Концентраторная солнечная фотоэнергетика // Материалы Первого Международного форума «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR-2013». 22–23 октября 2013 г. / Под ред. Д.т.н. О.С. Попеля – М.:ОИВТ РАН. 2013. – С. 56.

20 Carnie M. J. et al. Performance enhancement of solution processed perovskite solar cells incorporating functionalized silica nanoparticles //Journal of Materials Chemistry A. – 2014. – Т. 2. – №. 40. – P. 17077–17084.

21 AI Kingon, JP Maria S.S. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications // Nature. – 2000. – Vol. 406, № 6799. – P. 1032–1038.

22 Aberle A. G., Hezel R. Progress in low- temperature surface passivation of silicon solar cells using remote- plasma silicon nitride //Progress in photovoltaics: research and applications. – 1997. – Vol. 5. – №. 1. – P. 29–50.

23 Deal B. E., Grove A. S. General relationship for the thermal oxidation of silicon //Journal of Applied Physics. – 1965. – Vol. 36. – №. 12. – P. 3770–3778.

24 Schultz O., Glunz S. W., Willeke G. P. ACCELERATED PUBLICATION: Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency //Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2004. – Vol. 12. – №. 7. – P. 553–558.

25 Benick J. et al. Rear side passivation of PERC- type solar cells by wet oxides grown from purified steam //Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2011. – Vol. 19. – №. 3. – P. 361–365.

26 Lanford W. A., Rand M. J. The hydrogen content of plasma- deposited silicon nitride //Journal of applied physics. – 1978. – Т. 49. – №. 4. – С. 2473–2477.

27 Lauinger T. et al. Record low surface recombination velocities on 1 Ω cm p-silicon using remote plasma silicon nitride passivation //Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68. – №. 9. – P. 1232–1234.

28 CHAN Z. et al. ‘A Novel and effective PECVD SiO2/SiN antireflection coatings for solar cells //IEEE Trans. Elec. Devi. – 1993. – Vol. 40. – №. 6. – P. 1161–1165.

29 Hezel R., Jaeger K. Low- temperature surface passivation of silicon for solar cells //Journal of the Electrochemical Society. – 1989. – Vol. 136. – №. 2. – P. 518–523.

30 Vitanov P. et al. Low cost surface passivation for p-type mc-Si based on pseudobinary alloys (Al2O3) x (TiO2) 1− x //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2006. – Vol. 90. – №. 15. – P. 2489–2495.

31 Hoex B. et al. Ultralow surface recombination of c-Si substrates passivated by plasma-assisted atomic layer deposited Al 2 O 3 //Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89. – №. 4. – P. 042112.

32 Szlufcik J. et al. High-efficiency low-cost integral screen-printing multicrystalline silicon solar cells //Solar energy materials and solar cells. – 2002. – Vol. 74. – №. 1-4. – P. 155–163.

33 Ballif C. et al. Silver thick-film contacts on highly doped n-type silicon emitters: structural and electronic properties of the interface //Applied physics letters. – 2003. – Vol. 82. – №. 12. – P. 1878–1880.

34 Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production //npg asia materials. – 2010. – Vol. 2. – №. 3. – P. 96.

35 Yablonovitch E. et al. A 720 mV open circuit voltage SiO x: c- Si: SiO x double heterostructure solar cell //Applied Physics Letters. – 1985. – Vol. 47. – №. 11. – P. 1211–1213.

36 Würfel P. Physics of Solar Cells : From Principles to New Concepts // Physics of Solar Cells. – John Wiley & Sons, 2005. – P. 186.

37 Green M. A., King F. D., Shewchun J. Minority carrier MIS tunnel diodes and their application to electron-and photo-voltaic energy conversion—I. Theory //Solid-State Electronics. – 1974. – Vol. 17. – №. 6. – P. 551–561.

38 Taguchi M., Maruyama E., Tanaka M. Temperature dependence of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells //Japanese Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 47. – №. 2R. – P. 814.

39 Spear W. E., Le Comber P. G. Substitutional doping of amorphous silicon //Solid state communications. – 1993. – Vol. 88. – №. 11-12. – P. 1015–1018.

40 Fuhs W., Niemann K., Stuke J. Heterojunctions of amorphous silicon and silicon single crystals //AIP Conference Proceedings. – AIP, 1974. – Vol. 20. – №. 1. – P. 345–350.

41 Pankove J. I., Tarng M. L. Amorphous silicon as a passivant for crystalline silicon //Applied Physics Letters. – 1979. – Vol. 34. – №. 2. – P. 156–157.

42 Hamakawa Y. et al. New types of high efficiency solar cells based on a- Si //Applied Physics Letters. – 1983. – Vol. 43. – №. 7. – P. 644–646.

43 Taguchi M. Improvement of the conversion efficiency of polycrystalline silicon thin film solar cell //proc. of Fifth PVSEC, 1990, Florida. – 1990. – P. 689–692.

44 Korte L., Schmidt M. Investigation of gap states in phosphorous-doped ultra-thin a-Si: H by near-UV photoelectron spectroscopy //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2008. – Vol. 354. – №. 19–25. – P. 2138–2143.

45 Schulze T. et al. Impact of a-si: h structural properties on annealing behavior and voc of a-si: h/c-si heterojunction solar cells //25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. – 2010. – P. 6–10.

46 Schmidt M. et al. Density distribution of gap states in extremely thin a-Si: H layers on crystalline silicon wafers //Journal of non-crystalline solids. – 2004. – Vol. 338. – P. 211–214.

47 Pierz K., Fuhs W., Mell H. On the mechanism of doping and defect formation in a-Si: H //Philosophical Magazine B. – 1991. – Vol. 63. – №. 1. – P. 123–141.

48 Mandelkorn J. et al. Fabrication and Characteristics of Phosphorous- Diffused Silicon Solar Cells //Journal of the Electrochemical Society. – 1962. – Vol. 109. – №. 4. – P. 313–318.

49 Schmidt J., Cuevas A. Electronic properties of light-induced recombination centers in boron-doped Czochralski silicon //Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 86. – №. 6. – P. 3175–3180.

50 Myers S. M., Seibt M., Schröter W. Mechanisms of transition-metal gettering in silicon //Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 88. – №. 7. – P. 3795–3819.

51 Duerinckx F., Szlufcik J. Defect passivation of industrial multicrystalline solar cells based on PECVD silicon nitride //Solar energy materials and solar cells. – 2002. – Vol. 72. – №. 1–4. – P. 231–246.

52 Seidel H. et al. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions II. Influence of dopants //Journal of the Electrochemical Society. – 1990. – Vol. 137. – №.

11. – P. 3626–3632.

53 Campbell P., Green M. A. Light trapping properties of pyramidally textured surfaces //Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 62. – №. 1. – P. 243–249.

54 Olibet S. et al. Properties of interfaces in amorphous/crystalline silicon heterojunctions //physica status solidi (a). – 2010. – Vol. 207. – №. 3. – P. 651–656.

55 Froitzheim A. et al. Interface recombination in heterojunctions of amorphous and crystalline silicon //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2002. – Vol. 299. – P. 663–667.

56 Kern W. Overview and Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology // Handbook of silicon wafer cleaning technology. – William Andrew Publishing, 2008. P. 3–92.

57 Reinhardt K., Kern W. (ed.). Handbook of silicon wafer cleaning technology. – William Andrew, 2008. – P. 396.

58 Das U. K. et al. Surface passivation and heterojunction cells on Si (100) and (111) wafers using dc and rf plasma deposited Si: H thin films //Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 92. – №. 6. – P. 063504.

59 Olibet S., Vallat-Sauvain E., Ballif C. Model for a-Si: H/c-Si interface recombination based on the amphoteric nature of silicon dangling bonds //Physical Review B. – 2007. – Vol. 76. – №. 3. – P. 035326.

60 Holman Z. C. et al. Current losses at the front of silicon heterojunction solar cells //IEEE Journal of Photovoltaics. – 2012. – Vol. 2. – №. 1. – P. 7–15.

61 Carlson D. E., Wronski C. R. Amorphous silicon solar cell //Applied Physics Letters. – 1976. – Vol. 28. – №. 11. – P. 671–673.

62 Balestrieri M. et al. Characterization and optimization of indium tin oxide films for heterojunction solar cells //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2011. – Vol. 95. – №. 8. – P. 2390–2399.

63 Bel Hadj Tahar R. et al. Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties //Journal of Applied Physics. – 1998. – Vol. 83. – №. 5. – P. 2631–2645.

64 Ruske F. et al. Improved electrical transport in Al-doped zinc oxide by thermal treatment //Journal of applied physics. – 2010. – Vol. 107. – №. 1. – P. 013708.

65 Favier A. et al. Boron-doped zinc oxide layers grown by metal-organic CVD for silicon heterojunction solar cells applications //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2011. – Т. 95. – №. 4. – С. 1057–1061.

66 Choong G. et al. Transparent conductive oxides for silicon heterojunction solar cells //Proc. 25th EU PVSEC. – 2010. – P. 2505–2510.

67 Centurioni E., Iencinella D. Role of front contact work function on amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cell performance //IEEE Electron Device Letters. – 2003. – Vol. 24. – №. 3. – P. 177–179.

68 Kanevce A., Metzger W. K. The role of amorphous silicon and tunneling in heterojunction with intrinsic thin layer (HIT) solar cells //Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol. 105. – №. 9. – P. 094507.

69 Tokuhisa H. et al. Glass-fritless Cu alloy pastes for silicon solar cells recquiring low temperature sintering //2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – IEEE, 2011. – P. 001140-001143.

70 Hernández J. L. et al. High efficiency copper electroplated heterojunction solar cells //Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany. – 2012. – P. 24–28.

71 Faes A. et al. SmartWire solar cell interconnection technology //Proc. of 29th

European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – 2014. – P. 2555–2561.

72 Lammert M. D., Schwartz R. J. The interdigitated back contact solar cell: a silicon solar cell for use in concentrated sunlight //IEEE Transactions on Electron Devices. – 1977. – Vol. 24. – №. 4. – P. 337–342.

73 Tucci M. et al. Comparison of amorphous/crystalline heterojunction solar cells based on n-and p-type crystalline silicon //Thin Solid Films. – 2004. – Vol. 451. – P. 355–360.

74 Voz C. et al. Bifacial heterojunction silicon solar cells by hot-wire CVD with open-circuit voltages exceeding 600 mV //Thin solid films. – 2006. – Vol. 511. – P. 415–419.

75 Xu Y. et al. Heterojunction solar cells with n-type nanocrystalline silicon emitters on p-type c-Si wafers //Journal of Non-Crystalline Solids. – 2006. – Vol. 352. – №. 9–20. – P. 1972–1975.

76 Kleider J. P. et al. Electronic and structural properties of the amorphous/crystalline silicon interface //Thin Solid Films. – 2009. – Vol. 517. – №. 23. – P. 6386–6391.

77 Green M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 33) //Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2009. – Vol. 17. – №. 1. – P. 85–94.

78 Green M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 37) //Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2011. – Vol. 19. – №. 1. – P. 84–92.

79 Green M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 45) //Progress in photovoltaics: research and applications. – 2015. – Vol. 23. – №. 1. – P. 1–9.

80 Zhao L. et al. Optimized resistivity of p-type Si substrate for HIT solar cell with Al back surface field by computer simulation //Solar Energy. – 2009. – Vol. 83. – №. 6. – P. 812–816.

81 Lisheng W., Fengxiang C., Yu A. Simulation of high efficiency heterojunction solar cells with AFORS-HET //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2011. – Vol. 276. – №. 1. – P. 012177.

82 Wen X. et al. An approach for improving the carriers transport properties of a-Si: H/c-Si heterojunction solar cells with efficiency of more than 27% //Solar Energy. – 2013. – Vol. 96. – P. 168–176.

83 Dwivedi N. et al. Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve∼ 27% efficiency //Solar Energy. – 2013. – Vol. 88. – P. 31–41.

84 Liu Q. et al. Performance of bifacial HIT solar cells on n-type silicon substrates //Optoelectronics Letters. – 2010. – Vol. 6. – P. 108–111.

85 Chen A., Zhu K. Computer simulation of a-Si/c-Si heterojunction solar cell with high conversion efficiency //Solar Energy. – 2012. – Vol. 86. – №. 1. – P. 393–397.

86 Bivour M., Schröer S., Hermle M. Numerical analysis of electrical TCO/a-Si: H (p) contact properties for silicon heterojunction solar cells //Energy Procedia. – 2013. – Vol. 38. – P. 658–669.

87 Шонгалова А.К., Чучвага Н.А. и др. Интеграция казахстанских технологий получения кремния и моносилана с лучшими мировыми практиками производства солнечных элементов и модулей // Тезисы доклада конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – Т. 1. – С. 117–118.

88 М.А. Омаров, Н.А. Чучвага, В.В. Клименов, Н.С. Токмолдин, С.Ж.

Токмолдин «Способ получения тонкопленочных структур на основе кремния», Инновационный патент РК №30246. Опубл. 20.07.2015, бюл. №8.

89 Mukhamedshina D., Chuchvaga N. et al. Fabrication and study of sol-gel ZnO films for use in Si-based heterojunction photovoltaic devices //Modern Electronic Materials. – 2017. – Vol. 3. – №. 4. – P. 158–161.

90 Mukhamedshina D., Chuchvaga N. et al. Fabrication, characterization and modelling of n-ZnO /p-Si solar cells // Science and Applications of Thin Films, Conference & Exhibition (SATF 2016) – Izmir: Izmir Institute of Technology, 2016. – Vol. 1. – P. 144.

91 Stangl R., Leendertz C. General principles of solar cell simulation and introduction to AFORS-HET //Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. – P. 445–458.

92 Jiang C. et al. Simulation of silicon solar cell using PC1D //Advanced Materials Research. – Trans Tech Publications, 2011. – Vol. 383. – P. 7032–7036.

93 Ghannam M., Abdulraheem Y., Shehada G. Interpretation of the degradation of silicon HIT solar cells due to inadequate front contact TCO work function //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2016. – Vol. 145. – P. 423–431.

94 Kirner S. et al. The influence of ITO dopant density on JV characteristics of silicon heterojunction solar cells: experiments and simulations //Energy Procedia. – 2015. – Vol. 77. – P. 725–732.

95 Ghannam M. et al. On the possible role of the interfacial inversion layer in the improvement of the performance of hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon heterojunction solar cells [HIT] //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2015. – Vol. 132. – P. 320–328.

96 Shen L., Meng F., Liu Z. Roles of the Fermi level of doped a-Si: H and band offsets at a-Si: H/c-Si interfaces in n-type HIT solar cells //Solar Energy. – 2013. – Vol. 97. – P. 168–175.

97 Жантуаров С.Р., Чучвага Н.А. и др. Моделирование солнечных элементов на основе перовскитных материалов // Тезисы доклада кругого стола «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, аддитивные технологии и робототехника» – Алматы: РГП «НЦТП», 2017. – Т. 1. – С. 51–54.

98 Жантуаров С.Р., Чучвага Н.А. и др. Перовскитные солнечные элементы и изучение их характеристик // Тезисы доклада международная научной конференции студентов и молодых учёных «ФАРАБИ ӘЛЕМІ», – Алматы: Издательский дом «Казахский университет» Казахского национального университета им. Аль-Фараби, 2018. – Т. 1. – С. 196.

99 J.A. Abushama, J. Wax, T. Berens, J. Tuttle, 4th World conference on photovoltaic Energy Conversion, p. 487 (2006).

100 Чучвага Н.А. и др. Исследование и оптимизация гетеропереходных кремниевых солнечных элементов со структурой HIT // Тезисы доклада всероссийской конференции «19 Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, опто- и наноэлектронике» – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – Т. 19. – С. 103.

101 Minemoto T. et al. Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2001. – Vol. 67. – №. 1–4. – P. 83–88.

102 Lien S. Y., Wuu D. S. Simulation and fabrication of heterojunction silicon solar cells from numerical computer and hot-wire CVD //Progress in Photovoltaics. – 2009. – Vol. 17. – №. 7. – P. 489–501.

103 Neuhaus D. H. et al. The density of states in heavily doped regions of silicon solar cells //Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE. – IEEE, 2000. – P. 104–107.

104 Alpuim P., Chu V., Conde J. P. Electronic and structural properties of doped amorphous and nanocrystalline silicon deposited at low substrate temperatures by radio-frequency plasma-enhanced chemical vapor deposition //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2003. – Vol. 21. – №. 4. – P. 1048–1054.

105 Larbi F. et al. Density of states in intrinsic and n/p-doped hydrogenated amorphous and microcrystalline silicon //Journal of Modern Physics. – 2011. – Vol. 2. – №. 09. – P. 1030.

106 Ильин В. И., Мусихин С. Ф., Шик А. Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры. – СПб.: Наука, 2000. – С. 21–44.

107 Froitzheim A. et al. AFORS-HET: a computer-program for the simulation of heterojunction solar cells to be distributed for public use //Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on. – IEEE, 2003. – Vol. 1. – P. 279–282.

108 Аймағанбетов К.П., Чучвага Н.А., Жантуаров С.Р., Шонғалова А.К., Тоқмолдин Н.С. Гетероөткелді кремнийлі күн элементтерінің баға факторлары мен операциондық шығыс сипаттамасының өтелу мерзіміне байланысты әсерін зерттеу // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2018. – Т. 64. – №. 1. – С. 19–24.

109 Саченко А. В. и др. Метод оптимизации параметров гетеропереходных фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния //Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – №. 2. – С. 259.

110 Чучвага Н.А., Токмолдин Н.С. Оптимизация фотоэлементов структуры HIT методом компьютерного моделирования // Тезисы доклада международной конференции «Международная научно-практическая конференция «Глобальная наука и инновации 2018» – Астана: Общенациональное движение «Бобек», 2018. –Т. 1. –С. 32.

111 Чучвага Н.А. и. др. Отечественные исследования высокоэффективных гетеропереходных кремниевых солнечных элементов // Тезисы доклада круглого стола «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, аддитивные технологии и робототехника» – Алматы: РГП «НЦТП», 2017. – Т. 1. – С. 59–65.

112 Токмолдин Н.С., Чучвага Н.А., Токмолдин С.Ж. Моделирование влияния контактов в гетеропереходных кремниевых солнечных элементах// Вестник казахстанской национальной академии естественных наук. – 2016. - №3. – С. 28-33.

113 Chuchvaga N. A. et al. Study and optimization of heterojunction silicon solar cells //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 993. – №. 1. – P. 012039.

114 Herasimenka S. Y. Large Area Ultrapassivated Silicon Solar Cells Using Heterojunction Carrier Collectors. – Arizona State University, 2013.– P. 66–71.

115 Чучвага Н.А. и др. Исследование пассивации поверхностных состояний монокристаллического кремния в гетероструктурах со встроенным тонким аморфным слоем // Тезисы доклада международная научная конференция студентов

и молодых учёных «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» – Алматы: Издательский дом «Казахский университет» Казахского национального университета им. Аль-Фараби 2018. – Т. 1. –С. 233.

116 Чучвага Н.А., Кислякова Н.М., Аймаганбетов К.П., Ракыметов Б.А., Токмолдин Н.С. Исследование влияния влажной химической обработки на поверхность кремниевых монокристаллических пластин // Вестник КазНУ. Серия физическая. – 2018. – Т. 67. – №. 4. – С. 108–114.

117 Tokmoldin N. S., Chuchvaga N. A. et al. The Use of Solar Cells with a Bifacial Contact Grid under the Conditions of Kazakhstan //Technical Physics. – 2017. – Vol. 62. – №. 12. – P. 1877–1881.

118 Токмолдин Н.С., Чучвага Н.А. и др. Использование двусторонних солнечных элементов и модулей в условиях Казахстана // Тезисы доклада международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – Т. 1. – С. 261–262.