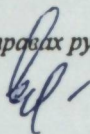


2019 - 121

На правах рукописи



КАДЫРОВ АБДУЛАХАТ ЛАКИМОВИЧ

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
СОЛНЕЧНОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО
ЛИТОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ХУДЖАНД – 2018

Работа выполнена на кафедре электроники ГОУ «Худжандский государственный университет имени академика Бободжона Гафурова».

Официальные
оппоненты:

Непомящих Александр Носифович- доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт геохимии им. А.П.Виноградова» СО РАН, Заслуженный деятель науки РФ;

Лазарук Сергей Константинович- доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники;

Каримов Самаридин Каримович- доктор хим. наук, профессор кафедры общей и теоретической физики Кулябского государственного университета им. А.Рудаки.

Ведущая

организация:

«Научно-исследовательский институт энергетики и экономики» при Госкомитете промышленности, энергетики и недропользования Кыргызской республики.

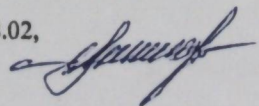
Защита состоится « 25 » июня 2019 г. в 10:00 час на заседании Объединенного диссертационного совета Д 999.188.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Таджикском национальном университете по адресу: 734025 Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Рудаки 17, факс (992-372)214884, e-mail: tgnu@mail.tj. Зал заседаний Ученого совета ТНУ.

Отзывы направлять по адресу: 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17, Таджикский национальный университет, диссертационный совет Д999.188.02, e-mail: tgnu@mail.tj.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Таджикского национального университета www.tnu.tj. (734025, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь объединенного
диссертационного совета Д 999.188.02,
кандидат физ.-мат. наук, СНС



Табаров С.Х.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Глобальный рост мирового энергопотребления сопровождается быстрым истощением традиционных сырьевых энергетических ресурсов, что делает актуальным использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Один из разновидностей ВИЭ-прямое преобразование солнечной энергии в электричество, т.н. фотоэлектрический метод на основе фотовольтаического эффекта в полупроводниковых структурах с р-п-переходом [1], является важнейшим из других известных методов прямого преобразования солнечной энергии. Не меньший интерес проявляется в последнее время и к прямому преобразованию нефотоактивной части солнечного излучения, а также геотермального тепла и тепла нагретых тел термоэлектрическим методом и недавно экспериментально подтвержденным тепловольтаическим методом [2]. К сожалению, конечная себестоимость получаемой таким образом электроэнергии значительно превышает стоимость электроэнергии, вырабатываемой традиционными методами, что и было основной причиной, сдерживающей развитие крупномасштабной солнечной электроэнергетики.

В связи с этим на первый план выходит привлечение и расширение применения солнечных элементов (СЭ) и преобразователей тепловой энергии (ПТЭ) на основе поликристаллического кремния (ПК) из отходов сырьевой и монокристаллического кремния (МК) и технического кремния (ТК) высших сортов с его переделом в моносилан, а также их сочетание, что может значительно сократить конечную себестоимость вырабатываемой энергии.

С другой стороны, неизученность структуры и физических свойств вторичного литого поликристаллического кремния (ВЛПК) из отходов кремниевого производства, как нетрадиционной сырьевой базы для фото- и теплоэнергетики, отсутствие исследований свойств созданных на его основе различных структур, солнечных и тепловых преобразователей энергии, необходимость изучения влияния внешних воздействий на выходные физические параметры ВЛПК и n^+ -р структур на его основе, непосредственное обнаружение тепло-

термо- и термофотовольтаических эффектов на этих структурных образованиях обуславливает актуальность исследований в этом направлении.

Целью настоящей работы является получение и комплексное исследование электрофизических, фото- и термофотовольтаических свойств литого ПК из отходов кремниевого производства, различных изотипных p^+ - n и p^+ - n - p^+ -структур, СЭ и ПТЭ на его основе и предложение научно-обоснованных технологических режимов изготовления ПК, СЭ и ПТЭ.

Для достижения указанной цели в диссертации были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Выборка сырья и отработка режимов литья для получения ПК, пригодного для нужд фото- и термоэнергетики;
2. Комплексный анализ и исследование электрофизических параметров исходных материалов, полуфабрикатов и СЭ в процессе их изготовления из литого ПК, в том числе, на концентрированном солнечном излучении (КСИ);
3. Оценка влияния водородной пассивации, типа токосъемных контактов и просветляющего покрытия, методов получения p - n -перехода и ряда других факторов на выходные параметры СЭ из ВЛПК;
4. Изучение влияния температуры и локальной засветки поверхности образцов на электрофизические свойства изотипных, p^+ - n и p^+ - n - p^+ -структур на основе ВЛПК;
5. Разработка и исследование параметров термофотовольтаических преобразователей энергии на базе микрозернистого ВЛПК и ТК, а также их сочетаний;
6. Теоретическое обоснование получаемых экспериментальных результатов по части возникновения термо-ЭДС при однородном нагреве изотипных структур на основе ВЛПК;
7. Создание и изучение энергетических параметров новых фотоэлектрических и термофотовольтаических приборов на основе полученных данных.

Объекты исследования. В качестве объектов исследования были выбраны слитки, заготовки, пластины, различные разнородные структуры, СЭ и ПТЭ из литого ПК и регионального ТК кристаллической и микропорошковой

модификаций. При повышенных температурах и при локальном освещении исследовались кристаллические изотипные, p^+ - n и p^+ - n - p^+ -структуры на основе литого ПК, микрозернистые порошкообразные изотипные образцы чистого литого ПК и в сочетании с ТК различного происхождения, а также кристаллические преобразователи тепловой энергии на основе ВЛПК.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые:

-получены образцы крупнозернистого вторичного литого поликристаллического кремния с размером зерен $\sim 100+300$ мкм из отходов производства заводов электронной техники и металлургии кремния, пригодный для получения СЭ и ПТЭ на его основе;

-показана возможность достижения на СЭ из ВЛПК КПД ≈ 12 % в лабораторных и ~ 8 % в промышленных условиях по упрощенной технологии с привлечением водородной пассивации зарядовых состояний на границах зерен;

-обнаружен нетривиальный ход зависимости подвижности основных носителей тока в ВЛПК от концентрации легирующей примеси с образованием так называемой «ямы» подвижности, возникновение которой зависит от размеров зерен ВЛПК;

-установлено, что максимум спектральной чувствительности СЭ из ВЛПК сдвинут в коротковолновую область ($\lambda=0,7$ мкм.), что обусловлено спектром энергетических уровней граничных зарядовых состояний. Это обстоятельство делает ВЛПК привлекательным материалом для использования в наземной фотоэнергетике;

-определён диапазон КСИ ($5 \approx 10$ крат, $P_0 = 850$ Вт/м²), в пределах которого на СЭ из ВЛПК обнаруживается эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания с ростом уровня облучения. На полностью пассивированном материале характер изменения тока короткого замыкания в зависимости от уровня засветки не отличается от наблюдаемых у МК СЭ;

-**выявлена** более сильная температурная зависимость коэффициента выпрямления на p-р-структурах из ВЛПК с заведомо высокой концентрацией локальных включений и на этой основе разработан новый полупроводниково-ый прибор-защитное устройство нити ламп накаливания (ЗУЛН) [3];

-**предложена** и осуществлена на практике технология получения ПК из регионального ТК марки Кр1 напрямую, минуя хлорсилановую технологию, методом литья по аналогии с технологией выпуска ВЛПК, когда в процессе плавки и перекристаллизации в изложнице удается очистить ТК за счет выдержки расплава в форвакууме и сегрегации примесей при затвердевании расплава;

-**установлен** примесный тепловольтаический эффект (ТВЭ) на подготовленных нами образцах ВЛПК [4], возникающий путём генерации носителей тока при поглощении субзонных фотонов с участием глубоких энергетических уровней;

-**показано**, что для эффективной работы преобразователей тепловой энергии концентрация глубоких уровней должна быть не ниже $\sim 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что является необходимым и достаточным условием проявления тепловольтаического эффекта;

-**обнаружен** эффект температурного переключения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода в изотипных образцах ВЛПК, заключающийся в изменении полярности указанных параметров, что может быть положено в основу бесконтактных тепловольтаических генераторов переменного тока;

-**разработан** метод обработки изотипных пластин ВЛПК ионами К, Na и Cs, позволяющий регулировать как низкотемпературное (350 К), так и высокотемпературное (525 К) переключение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода;

-**установлено** влияние размеров зерен ВЛПК на температурные зависимости темновых тока и напряжения короткого замыкания в p⁺-р структурах при однородном нагреве и p⁺-р-p⁺- структурах при намеренно градиентном нагреве;

использование микропорошкового ВЛПК, в котором генерация носителей тока с участием глубоких уровней растёт с уменьшением размеров зёрен, либо создание градиента температуры улучшают энергетические параметры образцов при невысоких температурах нагрева.

-**создан** фотоэлектрический топливный генератор водорода (ФТГВ) оригинальной конструкции на принципе электролиза и фотолиза в условиях засветки водородного электрода КСИ с участием химической реакции кислотного или щелочного электролита с расходным кремниевым электродом, позволяющий получать сверхсуммарный эффект по выработке водорода в практически любых светопогодных условиях без привлечения внешних источников питания.

-**разработан** преобразователь тепловой энергии на основе сплава ВЛПК р-типа проводимости с удельным сопротивлением $\sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и размером зерен $\sim 300 \text{ мкм}$ и технического кремния с примесью железа, позволяющий получать рекордно высокие значения тока короткого замыкания (3 мА) и напряжения холостого хода (60 мВ) при температуре 200 °С.

-**предложен** новый вариант исполнения рабочего тела ПТЭ в виде куба из ВЛПК размером 10x10x10 мм, разрезанного во взаимно-перпендикулярных направлениях на глубину $\sim 8 \div 9 \text{ мм}$ с шагом в 1 мм, то есть с образованием поля «выступов» с площадью единичного торца 1x1 мм² и высотой 8÷9 мм, причём «выступы» выполнены изотипными, а свободное между ними пространство заполнено либо мультиспорошком высокоэффективного термоэлектрического материала, либо микро- и наночастицами кремния.

Научно-практическая значимость работы заключается в том, что:

-**выданы** научно обоснованные режимы изготовления ВЛПК, а также СЭ и ПТЭ на его основе, сформулированные в виде технологических рекомендаций для внедрения на существующих в регионе производствах;

-**предложен** вполне реализуемый стандарт выбора исходного сырья для получения слитков ВЛПК для производства высокоэффективных СЭ;

-**внедрена** технология изготовления полуфабрикатов и СЭ из слитков

ВЛПК в мелкосерийном производстве ОАО «Алмос» и Производственно-коммерческой фирмы «Ховар»;

-показана возможность изготовления солнечных поликристаллических элементов с КПД до 8+12 % с применением диффузии, ионной имплантации и созданием МДП-структур, пригодных для применения в бытовых приборах, для создания переносных источников электропитания мощностью $0,5 \pm 3$ Вт и солнечных станций мощностью до 250 Вт.

-установленный эффект переключения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода может быть положен в основу бесконтактных тепловольтаических генераторов переменного тока с возможностью регулирования исходных параметров;

-применение порошковой микрозернистой модификации ВЛПК, ТК, а также их сочетания, исключаящие разрушение слоя естественного окисла на поверхности отдельных зерен при формировании рабочего тела образцов, позволяют резко увеличить энергетические параметры ПТЭ;

-примесный ТВЭ и предлагаемые варианты ПТЭ, изготавливаемые на основе изотипного, микрозернистого ВЛПК, р-п структур на основе ВЛПК, а также на основе смесей ВЛПК и ТК, могут быть использованы в качестве основы для создания преобразователей световой и тепловой энергии.

Защищаемые положения:

1. Состав лигатуры, температура, давление и время выдержки расплава в литейной форме и изложнице для получения крупнозернистого ВЛПК из отходов кремниевого производства;
2. Температура и длительность диффузионных процессов на операциях создания р-п- переходов на ВЛПК выбирается ниже, чем на аналогичных операциях, проводимых на МК, вследствие более высоких скоростей диффузии мелких примесей в поликристаллических материалах.
3. Концентрации легирующей примеси в базе и фронтальном слое СЭ из ВЛПК вне «ям» подвижности, значения которых зависят от размеров зерен.
4. Режимы водородной пассивации граничных зарядовых состояний (ЗС) у СЭ

на основе ВЛПК, позволяющие заметно приблизить их энергетические параметры к таковым у СЭ из моно-Si, а именно обеспечить получение КПД у лабораторных образцов на уровне 12 % без просветления.

5. Диапазон концентраций солнечного излучения, в пределах которого проявляется эффект сверхлинейности роста тока короткого замыкания, составляет у СЭ на основе ВЛПК 5 ± 10 крат. и зависит от размера зерен и степени их пассивации.

6. Прямое использование регионального ТК высших марок для нужд фотоэнергетики путём получения методом литья ПК и СЭ на его основе с КПД 5+7 %.

7. Температуры, при которых происходит эффект переключения – изменение полярности напряжения холостого хода и направления тока короткого замыкания у изотипных образцов ВЛПК. Возможность регулирования температуры переключения и в некоторых пределах пороговой температуры посредством обработки пластин ВЛПК ионами щелочных металлов (K, Na, Cs).

8. Примесный тепловольтаический эффект границ зёрен ВЛПК, влияние уменьшения размеров зёрен и создания градиента температуры на температурные зависимости темнового напряжения и темнового тока короткого замыкания в сторону улучшения энергетических параметров.

9. Необходимое и достаточное условие проявления примесного тепловольтаического эффекта на образцах ВЛПК - это обеспечение пороговой концентрации глубоких уровней $> 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ или просто получение слитков ВЛПК с размером зерен порядка 10 мкм, то есть обеспечение искомой критической концентрации глубоких уровней за счет дефектов на межзеренных границах.

10. Сверхсуммарный эффект выделения водорода на ФТГВ при облучении КСИ расходоуемого электрода и рабочей поверхности СБ достигается тем, что к водороду, получаемому, в процессе электролиза, добавляется водород, образующийся в результате химической реакции между электролитом и кремнием, содержащимся в расходоуемом электроде, а также водород, образующийся при фотолитизе за счет упомянутого облучения его поверхности КСИ.

11. Термоэлектрический преобразователь, созданный на основе пластин р-типа или полученного прессованием с отжигом из микропорошкового ВЛПК в форме параллелепипеда и кубической формы.

12. Преобразователь тепловой энергии по п.11 изготавливается на основе нетрадиционных для термоэлектричества материалах, таких как ВЛПК, ТК и их сочетания, которые базируются на практически неистощимый сырьевой источник.

13. Участки ВЛПК с заведомо высокой концентрацией локальных включений из красной области слитка, где коэффициент выпрямления зависит от температуры значительно сильнее, чем у других видов ПК СЭ.

Достоверность результатов базируется на детальном характере, тщательности проведенных экспериментов, хорошей воспроизводимости результатов в широком диапазоне внешних условий, их согласии с результатами других авторов по широкому кругу вопросов и тем, что в ходе исследований использовались типовые, многократно проверенные методы и методологии на сертифицированном оборудовании с обоснованными калибровками.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на: Международной научно-технической конференции «Проблемы использования солнечной энергии в странах СНГ», (Сочи, 1993 г.); международной конференции, посвященной 60-летию Таджикско-Памирской экспедиции «История и перспективы развития горнорудной промышленности Средней Азии» (Худжанд, 1994 г.); международной научно-технической конференции «Проблемы производства моно- и поликремния для солнечной энергетики и микроэлектроники» (Наманган, 1998 г.); международной конференции по физике конденсированного состояния и экологических систем, посвященной 40-летию ФТИ им. С.У.Умарова АН РТ (Душанбе, 2004 г.); 3 международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке» (Душанбе, 2008 г.); научно-практической конференции «Использование возобновляемых источников энергии в Центральной Азии» (Душанбе, 2009 г.); научно-теоретической конференции «Проблемы физики кон-

денсированных сред», посвященной 80-летию академика Адхамова А.А. (Душанбе, 2008 г.); международном научном симпозиуме «Возобновляемые источники энергии: проблемы и перспективы» (Худжанд, 20011 г.); 2 международном научном симпозиуме «Возобновляемая энергия и энергосберегающие технологии» (Худжанд, 2012 г.); X конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур на его основе «Кремний - 2014» (Иркутск, 2014 г.); республиканской научно-практической конференции «Экономика и перспективы развития возобновляемых источников энергии» (Худжанд, 2015 г.); международном симпозиуме по применению вычислительных методов в материаловедении и биологии KSCMBBS-2016 (Худжанд, 26-28 сентября 2016 г.); международном конгрессе REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность» (Москва, Сколково, 13-14 октября 2016 г.); на расширенных научно-методических семинарах физико-технического факультета и факультета телекоммуникаций и информационных технологий ХГУ имени академика Б.Гафурова.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 54 научных трудах, из которых 24 статей в журналах из Перечня ВАК РФ, 1 Малый патент Республики Таджикистан, 28 тезисов докладов на международных и региональных научных конференциях и симпозиумах, 2 монографии общим объемом более 50 п.л.

Личный вклад автора заключается в постановке задач научных исследований, проведении экспериментов и расчётов, обсуждении и анализе результатов, формулировании основных выводов и подготовке публикаций к печати.

В работе использованы результаты НИОКР «Нодир», где соискатель был научным руководителем, отчетов «Целевой комплексной программы по широкому использованию возобновляемых источников энергии, таких как энергия малых рек, солнца, ветра, биомассы, энергия подземных источников на 2007-2015 годы» под эгидой АН РТ (автор-научный руководитель группы по Согдийской области), Программы «Анализ состояния и перспективы использова-

ния возобновляемых источников энергии в Согдийской области», 2014 год, (Заказчик-Германское агентство по сотрудничеству, исполнитель-диссертант как старший научный сотрудник), а также в следующих проектах, где автор был исполнителем в должности старшего научного сотрудника: НИОКР по освоению промышленного производства ТК НПЦ «МЭЛМА» (под эгидой ГКНТ РУз) в 1999-2000 гг., проект П-18.32 ЦНИТ РУз в 2003-2005 гг.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, семи глав основного текста, общих выводов по работе и 3 приложений. Общий объем работы составляет 274 страниц, включая 81 рисунков, 22 таблицы и список цитированной литературы из 207 наименований.

Ключевые слова: полупроводник, кристалл, межзеренные границы, солнечный элемент, тепло-, термо- и фотовольтаика, энергия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая посвящена обзору литературы по проблеме фотоэлектрического преобразования солнечной энергии, краткой предыстории возникновения идеи использования вторичного ПК для этих целей. Дается анализ разработок ведущих мировых производителей в области повышения КПД ПК СЭ, связанных с водородной пассивацией граничных зарядовых состояний. Показано, что рекордные значения КПД лабораторных СЭ из кремния и арсенида галлия очень близки к теоретически возможным и что разработка высокоэффективных термофотовольтаических (ТФВ) систем для преобразования тепла и теплового излучения в электрическую энергию представляется одним из перспективных направлений энергетики. Далее обсуждаются условия использования ПТВ и примесных термофотовольтаических (ПТФВ) элементов в ТФВ системах, рассматриваются несколько вариантов ТФВ систем, перечисляется ряд существенных преимуществ ПТЭ по сравнению с СЭ.

В своих фундаментальных трудах [4,5] академик АН РУз М.С. Сандов пишет, что в ТФВ приборах и СЭ преобразование излучения в электричество происходит одинаково в результате поглощения фотонов полупроводником и раз-

деления образованных избыточных электронов и дырок р-п-переходом. Основное отличие СЭ и ТФВ преобразователя обусловлено температурой излучателя. В первом случае излучатель – Солнце, с температурой ~ 6000 К, находящиеся на расстоянии ~ $15 \cdot 10^7$ км. ТФВ приборы принимают излучение источников температурой 1300+1800 К, расположенных на расстоянии в несколько сантиметров. Следствием этого является высокое значение плотности мощности $5+30 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, принимаемой ТФВ преобразователем, по сравнению с ~ $0,1 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ неконцентрированного солнечного излучения, падающего на СЭ.

Рассматривается несколько вариантов ТФВ систем в зависимости от температуры источника тепла (излучения) и комбинации ПТВ и ПТФВ элементов (рис.1). Если источник тепла нагревается до температур 200+400 °С, тогда ПТВ элемент 2 следует прикреплять к источнику 1 (рис.1 а). При температуре источника ~ 200 °С целесообразно использовать ПТВ элемент на основе кремния, а при ~ 400 °С – на основе широкозонных полупроводников,

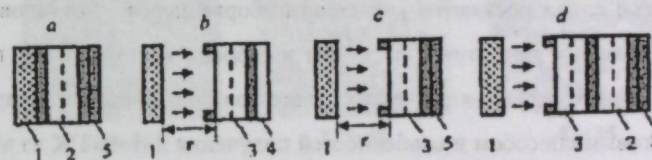


Рис.1.Схемы тепловольтаической (а), термофотовольтаической (b) и термофототепловольтаической (с, d) систем:1- источник тепла и теплового излучения; 2-ПТВ элемент; 3-ПТФВ элемент; 4-охладитель; 5-теплоизоляционный слой [5].

в частности, β -SiC. Этот вариант представляет собой альтернативу термоэлектрическому преобразователю тепловой энергии в электричество. Когда температура источника высокая и достигает 1200+1500 К, целесообразно применение охлаждаемого ПТФВ элемента, который можно располагать на различных расстояниях r от источника в зависимости от температуры источника и скорости теплоотвода от ПТФВ элемента с помощью охладителя 4 (рис.1, b), или каскадирования его с ПТВ элементом (рис.1, d). Следует подчеркнуть [5], что дей-

ствии ПТФВ элемента (рис.1, с, d) окажется наиболее эффективным, если ПТВ и ПТФВ эффекты, происходящие в нем, дополняют друг друга.

Во второй главе дается методология и техника экспериментов по исследованию электрофизических, оптических и тепловольтаических свойств различных структур, а также солнечных и тепловых преобразователей энергии на основе ВЛПК. В основном использовались типовые методы и установки исследования полупроводниковых приборов и устройств. Впервые подробно описывается установка марки С-3179, приспособленная нами для получения ПК методом литья. Более подробно излагаются разработанные и созданные с нашим участием прибор автоматического снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) со скоростью записи не более 3 с и установка ОСШ-150, предназначенная для создания сферических шлифов с диаметром шлифовальника 150 мм с целью измерения толщины тонких ~ 5 мкм и сверхтонких ~ 1 мкм эпитаксиальных и диффузионных слоев.

Третья глава посвящена изучению выборке сырья из отходов кремнивого производства, подготовке лигатуры и разработке технологий получения ВЛПК, описанию физико-химических процессов получения регионального ТК электродуговым способом и особенностей получения литого ПК из этого ТК, а также обсуждаются пути дальнейшего использования полученного ТК в фото- и теплоэнергетике в кристаллической и микропорошковой модификациях. Кремниевые блоки из указанного сырья производились методом литья с последующей направленной кристаллизацией снизу вверх залитого объема на установке С-3179 в вакууме или в вакууме с протоком инертного газа. Направленная кристаллизация обеспечивает получение столбчатой структуры получаемых блоков с крупностью зерна не менее 2×2 мм и без газовых раковин. Гарантией воспроизводства зернистости слитков ВЛПК от плавки к плавке является выдержка расплава в изложнице в течение 1,5 часов.

Основные электрофизические параметры- удельное сопротивление около $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, поверхностное сопротивление растекания $28 \pm 30 \text{ Ом}/\square$, подвижность $25 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, концентрация свободных носителей заряда $2,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концен-

трация акцепторов 10^{18} см^{-3} , время жизни $3 \pm 10 \text{ мкс}$ свидетельствуют о целесообразности использования ВЛПК в качестве исходного материала для изготовления эффективных СЭ и ПТЭ. Анализ химического состава поверхности зерен, то есть непосредственно области межзеренных границ (МЗГ), показал рост концентрации примесей в направлении от ядра зерна до его поверхности и наличие на них кислородосодержащих комплексов. При этом в ВЛПК содержание кремния на МЗГ составляет 70,65 %, что коррелирует с современными представлениями о конфигурации структуры зерен и МЗГ.

На рис.2 показаны микрофотографии МЗГ образцов ВЛПК при различных степенях увеличения. Видно, что поверхность зерен во всех случаях изобилует разнообразными, весьма сложными структурами. Зерна с размером $\sim 100+300$ мкм априори не гладкие, а обладают шероховатой поверхностью с размерами выступов ≤ 10 мкм.

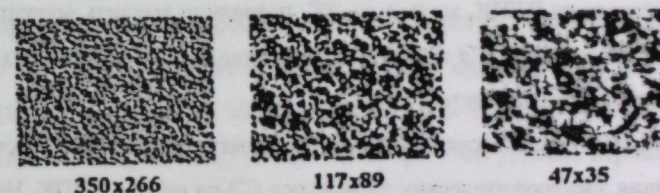


Рис.2. Микрофотография межзеренных границ ВЛПК.

Методом электродуговой технологии, основанной на восстановлении SiO_2 углеродом при температуре ~ 1900 °С, в лабораторных условиях впервые воспроизводимо получены ТК марки Кр1 (98 %) и более низкие марки с вовлечением в производство кремний- и углеродсодержащего сырья из региональных месторождений. Образцы полученного ТК марки Кр1 были пропущены через традиционную технологию с химико-металлургическим переделом в SiHCl_3 и показана возможность получения СЭ со структурой n_+p без тыльного подлегирования базы и с простейшим просветлением из SiO_2 с КПД $\sim 11\%$ при АМ 1,5 и 25 °С. На образцах СЭ, изготовленных переплавкой указанного ТК по техно-

логии ВЛПК; удалось достичь КПД $5+7\%$ без дополнительных технологических операций, что говорит о его перспективности.

Совершенно уникальные возможности использования полученного ТК возникают в свете последних достижений в области тепловольтаики и микропорошковой технологии. Предлагается обсуждаемый ТК пустить на переплав в слитки ВЛПК по самым простым технологиям, без какого-либо контроля за размерами зерен и временем жизни носителей тока, то есть, другими словами, изначально не пригодного для фотоэлектрического метода преобразования энергии и их применение в ПТЭ. После перевода полученного таким образом ВЛПК в порошкообразное состояние, созданы ПТЭ, работающие на основе термоэлектрического метода прямого преобразования тепловой энергии в электричество и тепловольтаического эффекта, а также сочетающих в своей работе оба этих физических явления. Экспериментальное обнаружение указанного эффекта сначала на ВЛПК, затем и на ТК, позволило выявить основные требования к материалу для ПТЭ и выбрать в качестве одного из путей их создания использование мелкозернистого кремния.

Четвертая глава посвящена изложению результатов экспериментального исследования электрофизических параметров СЭ на основе ВЛПК. На подложках из ВЛПК с разной степенью химико-механической подготовки поверхности был создан р-п-переход методами ионной имплантации, диффузии и создания МДП структуры SiO_2 -поли-Si. Максимальный КПД СЭ имеет место в случае ионной имплантации фосфора на глубину 0,5 мкм при R_s легированного слоя ~ 50 Ом/□ и освещенности АМ 1 и АМ 1,5 12,5 % и 11,5 %, соответственно, когда подложки для СЭ предварительно подвергнуты шлифовке, полировке и химическому травлению. Конечная чистота поверхности соответствует 15 классу. На подложках с аналогичной подготовкой КПД МДП СЭ составляет ~10 %. На подложках с аналогичной подготовкой КПД диффузионных СЭ составляет 10,5 %. Размер СЭ при этом 2x4 см.

Оптимальнее всех для изготовления многослойных токосъемных контактов на фронтальной и тыльной сторонах СЭ на основе ВЛПК оказалась система

титан-никель-медь (рис.3) с предельной толщиной не более 1 мкм, получаемая методом последовательного вакуумного напыления в едином цикле, обеспечивающая требуемый омический контакт с поверхностью, хорошую адгезию, малое сопротивление току и высокую коррозионную стойкость.

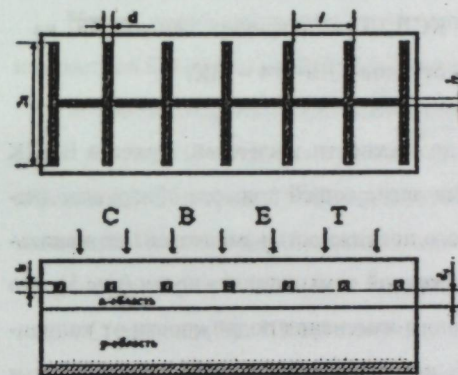


Рис.3. Фронтальная контактная сетка СЭ из ВЛПК и р-п-переход: b -ширина контактной шины; d -ширина полосы; l -расстояние между полосами; b -высота (толщина полосы); $2a$ -длина полосы; d_1 -глубина р-п-перехода.

В процессе выбора просветляющего покрытия было установлено, что наиболее оптимальное просветление происходит при нанесении слоя SiO_x толщиной 1150 нм вакуумным напылением композиции SiO_2 -мелкодисперсный Si-SiO, что дает прирост КПД на $20 \pm 25\%$, при этом уровень отражения монохроматического света от поверхности кремния минимален (около 2 %).

По результатам исследования готовых СЭ показано, что на ВЛПК можно создавать солнечные преобразователи энергии с КПД не ниже 7 %, а применение различных пассивирующих операций на финишных стадиях изготовления позволит увеличить КПД до $10 \pm 12\%$.

Максимум спектральной чувствительности СЭ из других материалов, а также СЭ из МК, лежит в области $0,75 \pm 0,8$ мкм, тогда как у СЭ из ВЛПК в более коротковолновой области спектра ~ 0,7 мкм. Если учесть, что максимум солнечного излучения в спектрах АМ 0 и АМ 1,5 приходится на длину волны $\lambda = 0,55$ мкм (рис.4), то наибольшим потенциалом в преобразовании солнечной энергии будут обладать ВЛПК СЭ, у которых максимум спектральной чувствительности наиболее близок к максимуму солнечного спектра.

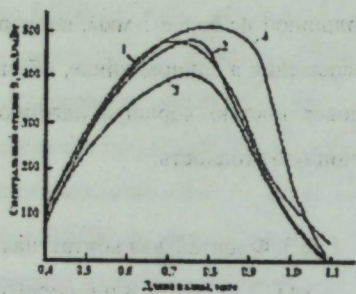


Рис.4. Спектральная чувствительность СЭ различных видов: 1 – ВЛПК; 2 – ленточный ПК из отходов КСД; 3 – профилированный ПК из отходов КДБ-1; 4 – МК.

При исследовании зависимостей подвижности носителей заряда в ВЛПК различной зернистости от концентрации легирующей примеси обнаружен диапазон концентраций, в пределах которого подвижность изменяется нетривиальным образом с образованием ярко выраженной «ямы» подвижности (рис.5), что принципиально отличается от монотонного изменения подвижности от концентрации примеси в МК. СЭ из ВЛПК, имеющие уровни легирования базы и фронтальных слоев, соответствующие «яме» подвижности, обладают крайне малой эффективностью. Положение «ямы» подвижности изменяется в зависимости от размеров зерен ВЛПК. Анализ литературы дает противоречивую картину. С одной стороны, величина μ_e в поли-Si на $1 \cong 2$ порядка ниже, чем в моно-Si [6], что объясняется более высокой концентрацией дефектов. С другой стороны, результаты работы [7] свидетельствуют о том, что подвижность носителей в поли-Si при освещении приближается к значению подвижности в моно-Si.

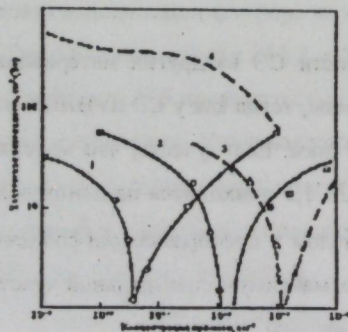


Рис.5. Сопоставление зависимостей холловской подвижности носителей тока от уровня легирования в различных материалах для СЭ: 1 – объемный ПК, осажденный из газовой фазы ($\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$) [6]; 2 – ПК, осажденный из газовой фазы на поликристаллические подложки; 3 – ВЛПК; 4 – МК.

По видимому, прямой перенос Холловской методики измерения подвижности с моно-Si не корректен и необходима другая методика, учитывающая эффекты, связанные с изменением зарядового состояния электроактивных дефектов.

Пятая глава посвящена изучению путей улучшения электрофизических параметров СЭ на основе ВЛПК разными способами и применением КСИ.

В работе подробно приводится сравнительный анализ водородной пассивации СЭ, изготовленных на основе ПК различных видов. Экспериментальные образцы СЭ размером 20×40 мм изготавливали по единой схеме на пластинах толщиной 300 мкм, вырезанных из слитков ПК, полученных вытягиванием по Чохральскому (А), ВЛПК (Б), а также из ленточных заготовок, полученных методом Степанова (В). ПК А1 получали намеренно в виде единичного или группы одновременно вытягиваемых из расплава слитков. Образец такого же материала А₂ получали одновременно с изготовлением монокристаллического бездислокационного слитка большого диаметра. При изготовлении слитков ПК А₃ в компоновку плавок добавляли до 20 % ТК марки Кр00.

Удельное сопротивление базовой области в каждой группе образцов лежало в пределах $1 \cong 2$ Ом·см. Легирование базы производилось бором. Было установлено, что сравнительно низкая эффективность ПК СЭ связана с высокой рекомбинационной активностью (РА) исходного материала, обусловленная зарядовыми состояниями на границах зерен (ГЗ) в ПК и другими электроактивными дефектами. Прирост фотоэлектрических параметров СЭ в результате гидрогенизации прослеживается на всех типах ПК СЭ, а также на МК СЭ. КПД образцов, например, увеличивается в пределах $0,8 \div 2,4$ %.

Показано, что основными дефектами, снижающими время жизни носителей заряда в ВЛПК, являются примеси углерода (следствие использования в процессе литья графитовой изложницы) и небольшие концентрации переходных металлов (следствие применения в компоновке плавок тигельных остатков металлургии). Зерна в ВЛПК имеют столбчатую структуру и не сильно разориентированы друг относительно друга, следовательно, ГЗ в ВЛПК хорошо пас-

свируются водородом. Наблюдаемый рост эффективности СЭ из ВЛПК обусловлен, в первую очередь, пассивацией указанных электроактивных дефектов, а также скоплений дислокаций, в особенности линейных.

Методом ИК- спектроскопии контролировали пассивацию ГЗ и дефектов вакансионного типа. Обнаружена пассивация углеродосодержащих дефектов: $(\text{CSi})\text{SiH}_2 - 2215 \text{ см}^{-1}$, $(\text{CCSi})\text{SiH} - 2083 \text{ см}^{-1}$, $(\text{CSi})\text{SiH}_2 - 2105 \text{ см}^{-1}$. Что касается примесей переходных металлов, то хорошо пассивируются не только Ni и Cu, но и Cr, ответственные за снижение времени жизни носителей заряда как в зернах, так и на их границе раздела.

Исследование ВАХ структур из ВЛПК с заведомо высокой концентрацией локальных включений из краевой области слитка показало, что их коэффициент выпрямления зависит от температуры намного сильнее, а именно резко падает с ростом температуры, чем у других видов ПК СЭ, а также СЭ на основе ВЛПК без упомянутых дефектов. Это обстоятельство было использовано нами при создании на основе этих результатов защитного устройства ламп накаливания.

Испытания СЭ из ВЛПК на концентрированном излучении обнаружили новый эффект- сверхлинейный рост тока короткого замыкания (рис.6) в диапазоне $5 \cong 10$ крат, сопровождающийся изменением $I_{\text{кз}}$ от $23 \cong 25 \text{ мА/см}^2$ при $K=1$ до 250 мА/см^2 при $K=8 \cong 10$. Эффект устойчиво проявляется в области малых и средних значений концентрации солнечного излучения и зависит от размеров зерен ВЛПК и других электрофизических характеристик материала.

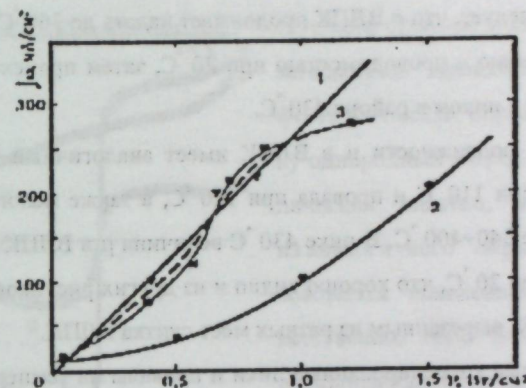


Рис.6. Зависимость тока короткого замыкания СЭ от интенсивности излучения: 1 - МК; 2 - мелкозернистый эпитаксиальный слой; 3 - ВЛПК.

Полученные результаты интерпретируются рекомбинационно-стимулированной реструктуризацией локальных уровней, расположенных в середине запрещенной зоны и новым механизмом сверхлинейного роста времени жизни неравновесных носителей с уровнем фотовозбуждения, обусловленным возникновением дефект-примесных комплексов типа отрицательно заряженная вакансия - положительно заряженный рекомбинационный центр.

Предварительная пассивация рекомбинационной активности зарядовых состояний образцов СЭ из ВЛПК приводит к практическому исчезновению эффекта сверхлинейного роста тока короткого замыкания и характер зависимости $I_{\text{кз}}$ от КСИ начинает приближаться к наблюдаемому у СЭ из МК.

В шестой главе изложены результаты исследований температурной зависимости электрофизических параметров изотипных образцов, n^+ -р, p^+ -р- p^+ структур и СЭ на основе ВЛПК кристаллического и мелкозернистого исполнения.

Поведение проводимости σ и подвижности μ НЗ в ВЛПК в интервале температур от 20 до 100 °С согласуется с расчетными данными для МК, а именно, проводимость и подвижность монотонно падают с ростом температуры. Из

наших данных следует, что σ ВЛПК продолжает падать до 300°C , уменьшаясь в 10 раз по сравнению с проводимостью при 20°C , затем происходит ее резкий (2-кратный) рост с пиком в районе 430°C .

Поведение подвижности μ в ВЛПК имеет аналогичный характер, но с наличием пика при 110°C и провала при 120°C , а также малого сглаженного пика в диапазоне $340\text{--}400^\circ\text{C}$. В пике 430°C величина μ в ВЛПК примерно в 25 раз выше, чем при 20°C , что хорошо видно и из других рисунков, относящихся к образцам ВЛПК, вырезанным из разных мест слитка ВЛПК.

Наблюдаемые коррелированные пики и провалы на температурных зависимостях удельного сопротивления (проводимости), подвижности и концентрации и на аналогичных температурных зависимостях фототока при локальном освещении и темнового тока, снятых на n^+ -р ВЛПК структурах, связываются с активацией конкретных глубоких уровней, обусловленных примесями и дефектами на МЗГ. При температуре $\sim 430^\circ\text{C}$ на всех исследованных образцах замечено наиболее яркое, более чем десятикратное, изменение основных электрофизических параметров ПК по сравнению с ситуацией при 20°C , что является, на наш взгляд, проявлением ПТВ-эффекта и связано с генерацией термодоноров с кислородокремниевых комплексов.

Исследование температурной зависимости относительного изменения темнового тока короткого замыкания и напряжения холостого хода изотипных образцов ВЛПК р-типа с удельным сопротивлением $\sim 1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ и толщиной 200 мкм выявило (рис.7), что $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$ растут до $\sim 325\text{ К}$, а затем наблюдается их резкое падение, изменение направления и рост до $\sim 525\text{ К}$ с резким изменением направления вблизи 600 К (рис.7). Абсолютная величина тока при этом втором переключении в 1000 раз больше, чем при первом. Подобным нетривиальным образом изменяется с температурой и темновое напряжение $U_{\text{хх}}$ (кривая 3). Данные рис.7, указывают на генерацию НЗ с участием

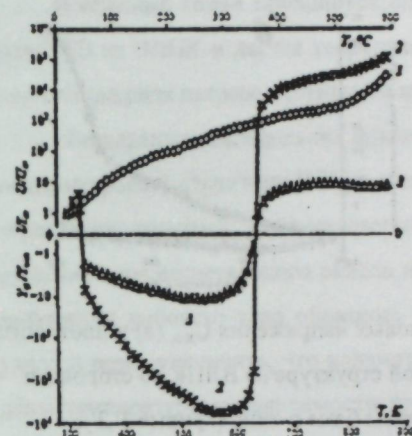


Рис. 7. Относительные изменения проводимости ловушек (1), темновых тока (2) и напряжения (3) от температуры. $U_{\text{хх}}, I_{\text{кз}}, U_{\text{зо}}$ измерены при 300 К.

Для объяснения полученных результатов используется модель термоэлектронной эмиссии с дополнениями, касающимися учета токов, возникающих в процессе захвата и эмиссии НЗ на ловушках, а также зонной диаграммой заряженной МЗГ.

В рамках исследований ПТВ-эффекта приведены результаты оценки влияния размеров зерен ВЛПК на температурные зависимости $U_{\text{хх}}, I_{\text{кз}}$, снятые на n^+ -р-структурах при однородном нагреве. На рис.8 приведены указанные зависимости для планарного образца размером $1,8 \times 1,4\text{ см}^2$, представляющем собой n^+ -р-структуру, изготовленную на подложке р-типа из ВЛПК с $\rho \sim 1\text{ Ом}\cdot\text{см}$ и максимальным размером зерен $\sim 50\text{ мкм}$, причём n^+ -р-переход площадью $\sim 2,5\text{ см}^2$ выполнен диффузией фосфора на глубину $\sim 3\text{ мкм}$.

На приведенных зависимостях $U_{\text{хх}}$ и $I_{\text{кз}}$, полученных при подводе тепла со стороны n^+ -р-перехода (кривые 1, 2), имеются пики и перегибы, а

глубоких уровней и являются доказательством проявления ПТВ эффекта в этих ПК образцах, поскольку однородный нагрев монокристаллических пластин, изготовленных из аналогичного сырья, не сопровождается появлением $U_{\text{хх}}$ и, соответственно, тока. Важно отметить воспроизводимость результатов, а также их соответствующее изменение при повороте образцов на 180° . Проводимость ловушек (крив. 1) растёт во всём диапазоне нагрева, особенно в диапазоне 725-860 К.

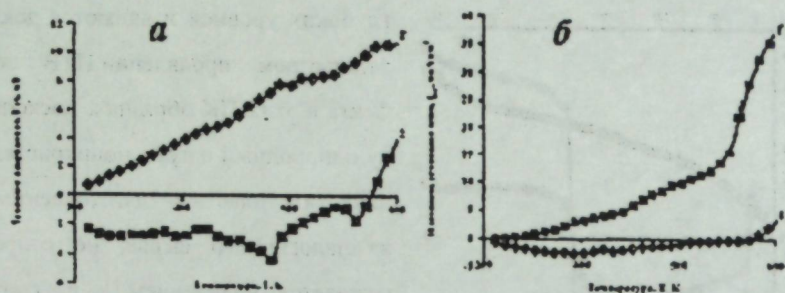


Рис. 8. Температурные зависимости темновых напряжения U_{xx} (а) и плотности тока J_{kz} (б) при подводе тепла к планарной структуре из ВЛПК со стороны p^+ – p -перехода (кривые 1,2) и со стороны базы p -типа (кривые 1',2').

также смена полярности напряжения при ~ 570 К. Их характер, особенно кривых J_{kz} , похож на токовые, снятые на ранее исследованных p^+ – p образцах из ВЛПК [5] с более крупным $\sim 100+300$ мкм размером зерен и наличием в сырье для плавки глубокой примеси, отличаясь только абсолютными значениями U_{xx} и J_{kz} . Если нагрев идет со стороны базы p -типа, характер изменения указанных параметров и их величина резко отличаются, как от ранее описанных кривых 1, 2, так и от [5], а именно, значения напряжения U_{xx} (кривая 2') и плотности темнового тока (кривая 1') при тех же температурах становятся в десятки раз выше по величине J_{kz} и вдвое по величине U_{xx} .

Согласно [8], в структурах p^+ – p могут возникать барьерная и объемные ТЭДС при наличии хотя бы минимального градиента температуры, соответственно, в базе p -типа и p^+ -слое. В [9] показано, что в отличие от фото ЭДС, барьерная ТЭДС, возникающая на том же самом p^+ – p переходе, может иметь не только пропускное, со знаком (+) на p -базе и (-) на p^+ -слое, но также и запирающее, т.е. обратное направление. Величина барьерной ТЭДС зависит при этом, как от электрофизических характеристик p^+ – p -структуры, так и расположения температурных градиентов.

В седьмой главе проводится оценка выходных энергетических параметров ПТЭ из ВЛПК и дается теоретическая интерпретация возникновения ЭДС при однородном нагреве изотипного микрозернистого кремния.

Результаты исследования энергетических характеристик ПТЭ позволили оптимизировать структуру ПТЭ, а именно, применить в качестве исходного материала порошковый микрозернистый кремний и приемы, исключаящие разрушение слоя естественного окисла на поверхности отдельных зерен при формировании рабочего тела образцов. В итоге энергетические параметры ПТЭ удалось резко увеличить, что иллюстрируется данными рис. 9 а, б и 10 а, б, где даны температурные зависимости плотности тока J_{kz} (а) и напряжения U_{xx} (б) для изотипных ПТЭ без легирования материала примесями (кривые 1), дающими глубокие уровни в кремнии, и с таковыми (кривые 2,4). Вариант кривых 3, вообще, касается случая выполнения ПТЭ целиком

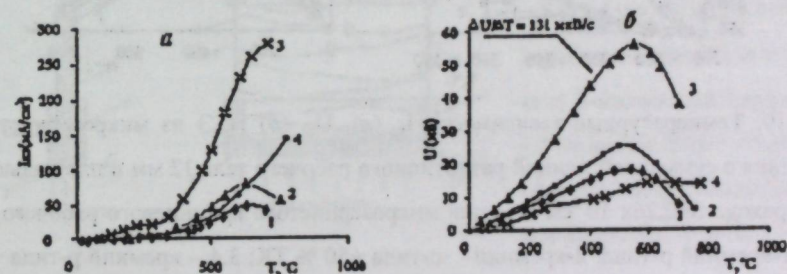


Рис.9. Температурные зависимости J_{kz} (а) и U_{xx} (б) изотипных преобразователей со структурой металл-SI-металл с рабочим телом длиной $L=6$ мм и диаметром $d=2$ мм, выполненным из микрозернистого кремния; 1- p -тип без добавки глубокой примеси; 2-в p -типный кремний введено до 50 % ТК; 3-рабочее тело целиком выполнено из ТК; 4- ТК введен в p -типный кремний.

из упомянутого ТК марки Кр1 регионального производства с содержанием глубокой примеси железа $< 0,18$ %. Видно, что параметры вновь разработанных изотипных ПТЭ на несколько порядков превосходят таковые у известных из солнечноплавленного ТК. ПТЭ могут работать в двух вариантах: в однородном

тепловом поле и при создании градиента температуры вдоль рабочего тела. В последнем случае их параметры гораздо выше и, например, у образца, представляемого кривыми 2 рис.9, при температуре горячего конца 700°C $I_{\text{кз}}$ составляет $14,2 \text{ mA}$ ($J = 0,45 \text{ A/cm}^2$), а $U_{\text{кк}} = 167 \text{ mV}$. Более высокий результат получен на образцах, выполненных целиком из ТК. К аналогичным выводам приводят данные рис. 10 а, б, касающиеся ПТЭ с р- и п- областями. Видно, что значения $U_{\text{кк}}$ у них на порядок превышают таковые у известных преобразователей, а плотность тока у них выше на два – три порядка.

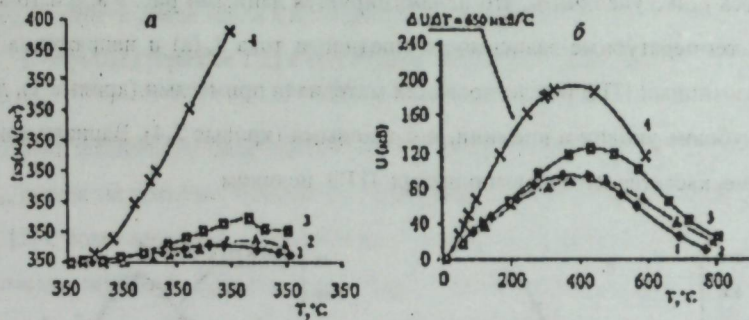


Рис.10. Температурные зависимости $I_{\text{кз}}$ (а), $U_{\text{кк}}$ (б) ПТЭ из микрозернистого кремния с суммарной длиной разнотипного рабочего тела 12 mm и площадью р-п-перехода $S=2,26 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$. Состав микрозернистого кремниевого рабочего тела: 1-кремний р-типа; 2-кремний п-типа +50 % ТК; 3,4 – кремний р-типа +50 % ТК. Контакты: 1,2,3-на основе сплава железа, 4-на основе меди.

Температурная характеристика $U_{\text{кк}}$ имеет, независимо от состава материалов рабочего тела и контактов к нему, вид кривой с максимумом при температуре $\sim 430^{\circ}\text{C}$. Этот максимум, возможно, связан с максимумом скорости распада комплексов SiO_4 , в избытке имеющихся в исходном материале, особенно, на межзеренных границах. Из сопоставления соотношения $\Delta U/\Delta T$, например, для кривой 4 с таковым у лучших термопар видно, что у разработанных ПТЭ этот параметр выше более чем в 10 раз и намного выше, чем у ряда полупроводниковых термоэлектрических соединений.

Изложенное касалось ПТЭ с р- и п- областями, работающих в однородном тепловом поле. Однако ПТЭ из мелкозернистого кремния с разнотипными областями, как и изотипные, работают в условиях специально созданного по их длине градиента температуры. Так, небольшой градиент температуры $\Delta T \sim 40^{\circ}$ вдоль ПТЭ, параметры которого иллюстрируют кривые 3 на рис. 10 а, б, вызывает $\sim 30\%$ рост напряжения.

На рис. 11 показан эффективный преобразователь тепловой энергии, где 1 – рабочее тело, выполненное в виде пластины из ВЛПК р-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho \sim 1 \text{ Om}\cdot\text{cm}$ и размером зёрен $\sim 300 \text{ mkm}$, р-п переход 2 на глубину $\sim 2 \text{ mkm}$ выполнен диффузией фосфора. В шихту для

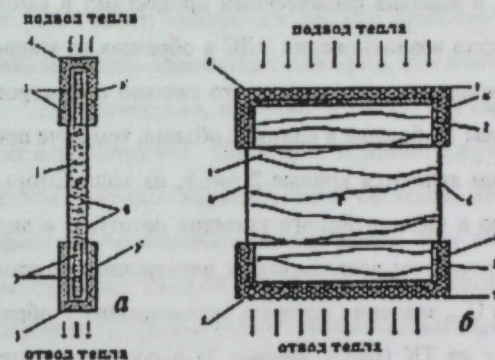


Рис. 11. Преобразователь энергии с рабочим телом в виде пластины из ВЛПК: а-вид сбоку; б- вид в плане. 1-рабочее тело; 2-р-п-переход; 3-изотипный переход; 4,5-разнополярные омические контакты; 6-селективное покрытие; 7-электроды.

выплавки данной партии ВЛПК вводили ТК, содержащий, по определению, примесь железа, дающую глубокие энергетические уровни, что явилось необходимым и достаточным условием обеспечения пороговой концентрации глубоких уровней $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$, которая обеспечивает проявление примесного термоэлектрического эффекта.

Возникновение ЭДС на омических контактах изотипного рабочего тела, нагреваемого в изотермических условиях, находят различное физическое объяснение [10].

Для понимания сути происходящего рассмотрим интересующий нас случай (рис.9, кривая 1), который касается изотипного ПТЭ, выполненного из

кремния электронного качества без глубоких примесей и исходного градиента температуры, с симметричными омическими контактами и минимальным теплоотводом от рабочего тела через электроды. Погрешность измерения температуры в полости тепловой «бани» не превышала $\pm 1^\circ$. Даже если допустить наличие такого, оставшегося незамеченным, исходного градиента температуры в 2° в тепловой «бане» со средней температурой, например, 200°C , то это не могло привести к столь существенным последствиям, а именно, к появлению у образца ЭДС ~ 8 мВ. Величина термо-ЭДС, которая могла бы возникнуть за счет упомянутого градиента температуры, не превышала бы 1,6 мВ, т.е. была бы в 5 раз меньше, чем наблюдаемая. Следовательно, причина появления ЭДС не связана с градиентом температуры, а вызвана физическими процессами в самом рабочем поле ПТЭ. Исходя из факта возникновения ЭДС в образцах из микрозернистого кремния, можно предположить, что это как-то связано с электронными состояниями на МЗГ, т.к. чем их больше в единице объема, тем ярче проявляется эффект. Подтверждением являются кривые 2 рис.9, из хода которых следует, что добавление к сырью в виде р-типного кремния лигатуры в виде ТК, являющегося идеальным источником всевозможных электронных состояний, сопровождается ростом $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{кз}}$, значения которых максимальны у образцов ПТЭ, целиком выполненных из ТК (рис.9, кривые 3) и составляют при 200°C ~ 1 мА (~ 40 мА/см²) и, соответственно, ~ 20 мВ, что, тем более, никак нельзя объяснить градиентом температуры на уровне $1-2^\circ$.

Итак, если суммировать важнейшие особенности явления генерации ЭДС, то их список сводится к следующему:

1. Изотипный образец из микрозернистого кремния, в котором обнаруживается эффект появления ЭДС, является объектом, зеркально-симметричным по отношению к плоскости, перпендикулярной его оси.
2. Тепловая «баня», в которой производится эксперимент, также зеркально-симметрична и в ней изначально отсутствует исходный градиент температуры вдоль образца.

3. При повторении экспериментов знак ЭДС остается прежним и не флуктуирует случайно, при повороте образца на 180° полярность ЭДС меняется.

4. ЭДС при подогреве образца возникает при одной и той же температуре воспроизводимым образом; различия температур лежат в пределах погрешности измерения; изменение величины ЭДС имеет вид кривой с максимумом.

5. Образец микрозернистого кремния со средним размером зерен ~ 10 мкм имеет, по определению, макроскопическое число дефектных состояний, связанных с МЗГ.

Базовый теоретический вывод, из всего сказанного, таков: спонтанное возникновение ЭДС противоречит принципу симметрии Кюри-Пригожина [11], который гласит: «макроскопические причины всегда обладают меньшим или равным числом элементов симметрии, чем наблюдаемые эффекты».

Действительно, причины в нашем случае зеркально-симметричны, а эффект асимметричен. Поскольку принцип Кюри-Пригожина относится к равновесным или слабо неравновесным системам, то это означает, что обсуждаемый эффект сильнонеравновесный. Однако при объяснении образования гидры в симметричной химической «бане» аналогичный эффект был объяснен в 1952 г. Тьюрингом и превратился в один из базовых аспектов синергетики [12].

Приспосабливая анализ Тьюринга к нашему случаю, смеем предположить, что обсуждаемый нами эффект — это слабо возмущенная задача Тьюринга, когда скорости нелинейных квазихимических реакций между p - и n - F_n и F_p приводят к множеству сильнонеравновесных состояний, отбор которых осуществляется слабым электростатическим полем, обусловленным флуктуационной технологической разницей работ выхода контактов. Другим важным выводом является предположение, что обсуждаемая спонтанная генерация ЭДС обусловлена синергетическим процессом, толчком к развитию которого является упомянутая флуктуационная разница электрофизических свойств контактов.

В Приложение 1 предлагается новый, очень простой и дешевый способ нанесения просветляющего покрытия с характеристиками, совпадающими или

превышающими таковые по способу прямого окисления, заключающийся в газофазной реакции химического присоединения оксидов кремния к кремниевой подложке. Покрытия SiO_x , полученные таким способом, дают при толщинах $0,11 \pm 0,13$ мкм прибавку к КПД кремниевых СЭ на уровне не ниже 8 ± 9 %.

В Приложение 2 предложено защищенное патентом РТ переносное зарядное устройство (ПЗУ) на СЭ для зарядки аккумуляторных батарей, которое лишено ряда недостатков существующих аналогов и имеет преимущества в части понижения равновесной температуры СЭ при эксплуатации ПЗУ в жарком климате, устранения бликов от поверхности СЭ, снижения требований к точной ориентации ПЗУ на Солнце. Впервые предложена и реализована конструкция ПЗУ в части выполнения СЭ с сетчатыми контактами с совпадающей на фронтальной и тыльной сторонах топологией, то есть, прозрачных для нефотоактивного ИК-излучения.

В Приложение 3 описывается макет фотоэлектрического топливного генератора водорода повышенной эффективности, уровень КСИ которого составил 74 крат, ток короткого замыкания кремниевой СБ равнялся $5,3 \pm 5,5$ А, а в рабочей точке при $U_p = 2,2$ В 5 А. Предлагаемый ФТГВ имеет ряд конструктивных особенностей, главными из которых являются использование рабочего тела непосредственно для охлаждения СБ, совмещение СБ и электролизера в одном рабочем блоке, снижение удельного расхода СЭ применением КСИ и обеспечение электрохимической ячейки наряду с инертными к электролиту электродами, также и расходуемыми электродами из кремнийсодержащих материалов, что обеспечивает работу ФТГВ в пасмурную погоду. При облучении расходуемого электрода и рабочей поверхности СБ КСИ устойчиво наблюдается сверхсуммарный эффект выделения водорода.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Впервые получены слитки крупнозернистого ВЛПК с размерами зерен не менее 2 мкм^2 , без газовых раковин с удельным сопротивлением $0,5 \pm 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ пригодным для изготовления СЭ и ПТЭ. При обеспечении предварительной выборки из кремниевых р-типных отходов эпитаксиального производства и сравнительно высокоомного ($\rho \sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) кремния любого типа проводимости или их смесей методом прямого литья с последующей направленной кристаллизацией расплава.
2. Получение поликремния из местного ТК на нужды фотоэнергетики осуществляется либо по традиционной технологии хлорсиланового передела, либо по технологии с металлургическим переделом ТК в ВЛПК. Полученные результаты по первому варианту показали, что региональный ТК приемлем для получения SiHCl_3 , Si-сырца и моно-Si, слитки которого по остаточному примесному составу ничем не отличаются от рядовых марок Si, обычно используемых в фотоэнергетике. На СЭ из кремния, полученного по второму варианту удалось достичь КПД 5 ± 7 % без просветляющих покрытий и водородной пассивации.
3. ВЛПК и региональный ТК марки Кр1 после химико-металлургического передела в моносилановое сырье могут быть успешно применены в качестве дешевой подложки (grade-Si) при изготовлении СЭ с тонкопленочной базой моносилановым способом.
4. Изначально не пригодные для фотоэлектрического метода преобразования энергии слитки ВЛПК с произвольными размерами зерен и малыми значениями времени жизни носителей заряда можно применять в преобразователях нефотоактивной составляющей солнечного излучения и тепла нагретых тел. ПТЭ, выполненные из микрозернистых порошкообразных ВЛПК и ТК с необходимой для проявления тепловольтаического эффекта концентрацией глубоких энергетических уровней показывают рекордно высокие значения коэффициента Зеебека, на порядок превышающие табличные значения для МК.
5. Максимальный КПД СЭ на основе ВЛПК, составляющий в условиях АМ 1 и АМ 1,5 соответственно $12,5$ % и $11,5$ %, наблюдается у СЭ, подложки для кото-

рых предварительно подвергнуты шлифовке, полировке и химическому травлению с последующей ионной имплантацией фосфора на глубину 0,5 мкм. Пленочные токосъемные контакты из композиции титан-никель-медь на фронтальной и тыльной сторонах СЭ получают методом вакуумного напыления в едином цикле, что придает контакту требуемые механическую прочность, хорошую адгезию с поверхностью кремния, малое сопротивление току и коррозионную стойкость. Просветляющее покрытие из SiO_2 толщиной 1150 нм дает прирост КПД СЭ на $20 \pm 25\%$.

6. Обнаружен диапазон, в пределах которого зависимость подвижности носителей заряда от концентрации легирующей примеси в образцах ВЛПК меняется с образованием ярко выраженной «ямы» подвижности, положение и размеры которой зависят от размеров зерен ВЛПК.

7. Определен максимум спектральной чувствительности полученных ВЛПК СЭ, который приходится на $\lambda \sim 0,7$ мкм, что указывает на их оптимальное соответствие спектральному составу солнечного излучения, достигающего поверхности Земли.

8. Водородная пассивация с использованием источника Кауфмана эффективно снижает РА ЗС на границах зерен и скоплениях дислокаций, в особенности, влияние линейных дислокаций, а также примесей переходных металлов, что приводит к повышению выходных параметров СЭ, однако это сопровождается уменьшением вероятности проявления эффекта сверхлинейности тока короткого замыкания при облучении СЭ КСИ.

9. Обнаружен эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания СЭ на основе крупнозернистого ВЛПК в диапазоне концентрации солнечного излучения 5+10 крат, который сопровождается увеличением КПД на 20%. Предлагается новый механизм интерпретации эффекта сверхлинейного роста тока короткого замыкания за счет роста времени жизни неравновесных носителей с уровнем фотовозбуждения, обусловленного возникновением дефект-примесных комплексов типа отрицательно заряженной вакансии – положительно заряженный рекомбинационный центр.

10. Обнаружена корреляция пиков и провалов на температурных зависимостях удельного сопротивления, подвижности и концентрации носителей заряда в ПК образцах и на температурных зависимостях фототока при локальном освещении и темнового тока, снятых на n^+ -р ВЛПК структурах, что связано с активацией конкретных глубоких уровней, обусловленных примесями и дефектами на МЗГ. При температуре ~ 430 °С замечено наиболее яркое, более чем десятикратное изменение основных электрофизических параметров ПК по сравнению с ситуацией при 20 °С, связанное с генерацией термодоноров, происходящее с участием кислородокремниевых комплексов.

11. На изотипных образцах ВЛПК р-типа с удельным сопротивлением ~ 1 Ом·см и толщиной 200 мкм обнаружен эффект температурного переключения, то есть изменение направления тока короткого замыкания и полярности напряжения холостого хода при нагреве образцов при температурах ~ 350 К и ~ 525 К. Эффект переключения может быть положен в основу создания бесконтактных тепловольтаических генераторов переменного тока с возможностью регулирования пороговой температуры и величины переключаемого темнового тока, как при первом, так и при втором переключении.

12. Установлен рост эффективности ПТЭ по мере минимизации размеров зерен на изотипных образцах из микрочернистых ВЛПК и ТК, что позволяет прогнозировать вероятность резкого увеличения энергетических характеристик преобразователей этого типа при их выполнении из кремния с наноразмерными зернами.

13. Необходимым и достаточным условием проявления примесного тепловольтаического эффекта на таких образцах является обеспечение пороговой концентрации глубоких уровней $> 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ или получение слитков ВЛПК с размером зерен порядка 10 мкм, то есть обеспечение искомой критической концентрации глубоких уровней за счет дефектов на межзеренных границах.

14. Создан фотоэлектрический концентраторный генератор водорода повышенной эффективности, главными особенностями конструкции которого являются использование рабочего тела непосредственно для охлаждения СБ, совмещение

СБ и электролизера в одном рабочем блоке, снижение удельного расхода СЭ за счет применения КСИ и обеспечение электрохимической ячейки наряду с инертными к электролиту электродами, также расходоуемыми электродами из кремнийсодержащих материалов, что обеспечивает работу ФТГВ в пасмурную погоду и даже в ночное время.

15. ПТЭ из ВЛПК р-типа проводимости с удельным сопротивлением $\sim 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и с размером зерен $\sim 300 \text{ мкм}$, в шихту для выплавки которого вводили ТК, содержащий примеси железа с глубокими энергетическими уровнями, обеспечивает проявление примесного тепловольтаического эффекта. При этом получены рекордно высокие значения тока короткого замыкания (3 мА) и напряжения холостого хода (60 мВ) при температуре 200 °С. В развитие данной конструкции ПТЭ предлагается перспективный вариант преобразователя из ВЛПК, где рабочее тело выполняется в виде куба с размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3 \sim 8 \div 9 \text{ мм}$ с шагом 1 мм.

16. Наряду с проявлением эффекта температурного переключения обычных термоэлектрических характеристик на изотипных микрозернистых образцах ВЛПК обнаруживается также появление нового эффекта-спонтанной генерация ЭДС, который обусловлен, на наш взгляд, синергетическим процессом, толчком к развитию которого служит флуктуационная разница электрофизических свойств контактов.

Список публикаций по теме диссертации

1. Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Ачилов Т.Х., Касымов Ш.Т., Саидов М.С., Таджиев В.Я., Халиков М., Хошимов С., Чететка О.И. Технология производства литого поликристаллического кремния и солнечных элементов на его основе // Гелиотехника, 1992.-№4.-С.8-14.
2. Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Билялов Р.Р., Саидов М.С. Сравнительный анализ водородной пассивации солнечных элементов, изготовленных на основе поликристаллического кремния различных видов // Гелиотехника, 1994.-№5.-С.3-7.
3. Kadirov A.L., B.M.Abdurakhmanov, R.R. Bilylov, M.S. Saidov. Comparative Analysis of Hydrogen-Passivated Solar Cells Manufactured on the Basis of Different Types of Polycrystalline Silicon // Applied Solar Energy (Geliotekhnika), 1994.-V.30.-№5.-PP.1-6.
4. Кадыров А.Л., Умаров М.Ф. Электрофизические свойства солнечных элементов на основе литого поликристаллического кремния // Реферативный сборник неопубликованных работ НПИЦ РТ, 24.10.2002.-Вып.2.-№97 (1531).
5. Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Умаров М.Ф. Пути повышения рентабельности производства солнечных элементов на основе литого поликристаллического кремния // Ученые записки ХГУ им. акад. Б.Гафурова, 2002.-№5.-С.12-19.
6. Кадыров А.Л. Исследование электрофизических свойств вторичного литого поликристаллического кремния и солнечных элементов на его основе // Дисс. канд. физ.-мат. наук., ХГУ им.акад. Б.Гафурова. Худжанд, 2002.-147 с.
7. Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Абдурахманов К.П., Гугушвили Б.В., Кожевников В.М., Саидов М.С., Костецкий М.О., Умаров Т.А. Опытное производство технического кремния и возможности расширения разработок солнечных элементов в Узбекистане // Гелиотехника, 2003.-№2.-С.79-88.
8. Кадыров А.Л., Каримов С.Н., Солихов И.М., Умаров М.Ф. Эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания от уровня излучения на солнечных элементах из поликристаллического кремния // Ученые записки ХГУ им.акад. Б.Гафурова, 2004.-№7.-С.57-63.
9. Кадыров А.Л., Солихов И.М., Умаров М. Исследование влияния токоъемных контактов на повышение эффективности солнечных элементов // Тезисы международной конференции по физике конденсированного состояния и экологических систем, посвященной 40-летию ФТИ им. С.И. Умарова АН РТ. Душанбе, 5-6 октября 2004.-С.9.
10. Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Аладина З.Н., Анарбаев А.И., Захидов Р.А. Фотоэлектрический топливный генератор водорода // Гелиотехника, 2006.-№3.-С.18-23.
11. Kadirov A.L., B.M.Abdurakhmanov, Z.N. Alad'ina, A.I. Anarbayev, R.A. Zakhidov. Photoelectric Fuel Generator of Hydrogen // Applied Solar Energy (Geliotekhnika), 2006.-V.42.-№3.-PP.11-13.

- 12.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М. Переносное зарядное устройство на солнечных элементах // Малый патент на изобретение за №ТJ 72 от 18 июня 2007.
- 13.Кадыров А.Л., Солихов И.М., Умаров М.Ф. Влияние различных просветляющих покрытий на оптические свойства солнечных элементов // Труды 3 международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке». Душанбе, 22-24 мая 2008.-С.156.
- 14.Кадыров А.Л., Солихов И.М., Умаров М.Ф. Влияние температуры диффузии на эффективность преобразования солнечных элементов // Труды 3 международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке». Душанбе, 22-24 мая 2008.-С.156.
- 15.Кадыров А.Л., Муминов Х.Х., Кабутов К., Мухабатов Х. Солнечный кремний из кварцитов Таджикистана и перспективы его использования // Тезисы докладов научно-теоретической конференции «Проблемы физики конденсированных сред», посвященной 80-летию академика Адхамова А.А. Душанбе, 15 ноября 2008.-С.43-45/62 с.
- 16.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Умаров М.Ф., Грузиненко В., Миленин П. Эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания от уровня излучения солнечных элементов из литого поликристаллического кремния // Компоненты и технологии, 2010.-№4.-С.104-105.
- 17.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Абдуразаков Ф.С., Зайнабидинов З.С., Олимов Л.А., Аладина З.Н. Влияние температуры на некоторые свойства n⁺-p и n⁺-p-p⁺ структур на основе вторичного литого поликристаллического кремния // Гелиотехника, 2011.-№2.-С.72-75.
- 18.Kadirov A.L., F.S.Abdurazzakov, S.Z. Zainabidinov, B.M.Abdurakhamov, L.A.Olimov, Z.N. Aladina Influence of Temperature on Certain Properties of n⁺-p and n⁺-p-p⁺ Structures Based on Secondary Cast Polycrystalline Silicon // Applied Solar Energy (Geliotekhnika), 2011.-V.47.-#2.-PP.149-152.
- 19.Кадыров А.Л., Абдуразаков Ф.С., Абдурахманов Б.М., Аладина З.Н., Зайнабидинов З.С., Сидиков В.Т. и др. Некоторые свойства планарных преобразователей тепловой энергии на основе вторичного литого поликристаллического кремния // Материалы международного научного симпозиума «Возобновляемые источники энергии: проблемы и перспективы». Худжанд, 24-26 мая 2011.-С.13-18.
- 20.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Ашуров М.Х., Ашуров Х.Б., Жураев Ж.У. и др. Кремниевые преобразователи тепловой энергии // Там же.-С.30-41/316
- 21.Кадыров А.Л., Солихов И.М., Умаров М.Ф. Влияние температуры диффузии на эффективность преобразования солнечных элементов // Теоретический и научно-практический журнал «Кишоварз», 2012.-№4.-С.53-54.
- 22.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Сидиков В.Т., Олимов Л.О. Некоторые электрофизические свойства вторичного литого поликристаллического кремния

- и его p⁺-р-структур при повышенных температурах // Ученые записки ХГУ им. акад. Б.Гафурова, 2012.-№4 (23). -С.92-99.
- 23.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Абдуразаков Ф.С., Олимов Л.А., Сидиков В.Т. О проявлении примесных тепловольтаического и фотофотовольтаического эффектов в поли- и монокристаллических кремниевых p⁺-р-структурах // Теоретический и научно-практический журнал «Кишоварз», 2012. -№4.-С.53-57.
- 24.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Солихов И. Исследование влияния температуры и времени отжига токосъемных контактов на характеристики кремниевых солнечных элементов // Ученые записки ХГУ им. акад. Б.Гафурова, 2012.-№4 (23).-С.108-111.
- 25.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Кутлимуротов Б.Р., Клычев Ш.И., Осьмаков М.И., Сидиков В.Т. и др. Оптимизация конструкции фотоэлектрического генератора водорода // Материалы II международного научного симпозиума «Возобновляемая энергия и энергосберегающие технологии». Худжанд, 17-19 мая 2012.-С.47-54.
- 26.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Олимов Л.О., Кучканов Ш., Жураев Ж.У. Некоторые особенности генерации носителей тока в нагреваемых тонких пластинах, выполненных из вторичного литого поликристаллического кремния // Там же.-С.55-69.
- 27.Кадыров А.Л., Абдуразаков Ф.С., Зайнабидинов З.С., Абдурахманов Б.М., Олимов Л.А., Аладина З.Н. Сидиков В.Т. Влияние температуры на некоторые свойства p⁺-p и p⁺-p-p⁺ структур на основе вторичного литого поликристаллического кремния // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2013.-№1/2(106).-С.131-135.
- 28.Кадыров А.Л., Жураев Ж.У. Электрофизические свойства вторичного литого поликристаллического кремния // Сборник тезисов X конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний 2014». Иркутск, 7-12 июля 2014.-С.29.
- 29.Кадыров А.Л., Сидиков В.Т., Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Оксенгендлер Б.Л. Полупроводниковые преобразователи тепловой энергии // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук, 2015.-№1/3 (164).-С.82-88.
- 30.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Кучканов Ш.К., Максимов С.Е., Термопреобразователь на основе вторичного литого поликристаллического кремния // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Экономика и перспективы развития возобновляемых источников энергии». Худжанд, 2015.-С.22-27.
- 31.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Олимов Л.О., Сидиков В.Т. Структура двух соприкасающихся зерен поликристаллического кремния и их электрические свойства // Там же.-С.28-31.

- 32.Кадыров А.Л., Жильцов В.Г. Методика расчета почасового, ежемесячного, квартального и годового электропотребления домохозяйств. // Там же.-С.57-66.
- 33.Кадыров А.Л., Шокирова И.А. Термоэлектрические эффекты в полупроводниках // Там же.-С.105-111.
- 34.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Ашууров М.Х., Ашууров Х.Б., Курбанов М.Ш., Оксенгендлер Б.Л. Проблемы и перспективы кремниевого производства в Центральной Азии // Худжанд: Нури маърифат, 2016.-418 с.
- 35.Кадыров А.Л., Максуди А. Возможности создания кремниевого производства в Республике Таджикистан // Материалы Международного симпозиума по применению вычислительных методов в материаловедении KSCMBS-2016. Худжанд, 24-28 сентября 2016.-С.129-130.
- 36.Кадыров А.Л. Преобразователи солнечной и тепловой энергии на основе отечественного кремния // Материалы международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность». Сколково, 13-14 октября 2016.-С.79-86.
- 37.Кадыров А.Л. Преобразователи солнечной и тепловой энергии на основе отечественного кремния // Ученые записки ХГУ им. акад. Б.Гафурова, 2017.-№1 (40).-С.208-219.
- 38.Кадыров А.Л., Сидиков В.Т. Новый способ создания просветляющих покрытий из оксида кремния // Ученые записки ХГУ им. акад. Б.Гафурова, 2017.-№1 (40).-С.220-225.
- 39.Кадыров А.Л., Абдурахманов Б.М., Адилов М.М., Ашууров М.Х., Ашууров Х.Б., Курбанов М.Ш., Нуралиев У.М. Пути повышения экономических и экологических показателей технологических процессов выплавки технического кремния и ферросилиция // Ученые записки ХГУ им. акад. Б.Гафурова, 2017.-№3 (42).-С.86-101.
- 40.Кадыров А.Л. Теоретическая интерпретация возникновения ЭДС при однородном нагреве изотипного микрозернистого кремния // Известия АН Республики Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и тех. наук, 2017.-№4 (169).-С.63-70.
- 41.Кадыров А.Л. Преобразователи тепловой энергии на основе вторичного литого поликристаллического кремния // Доклады АН Республики Таджикистан, 2018.-Т.61.-№3.-С.269-274.
- 42.Абдулахат Кадыров. Получение и свойства вторичного литого поликристаллического кремния // Худжанд: Нури маърифат, 2018.-408 с.

Цитированная литература

- 1.Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников, 2004.-Т.38.-Вып.8.-С.937-948.

- 2.Harber N.P., Wufel P. Semiconductor Science and Technology Special Issue on Termophotovoltaics, ed. by Barnham K., Connolly J. and Rohr C. 18 (5), S151 (2003).
3. Махмудов Ф.Х., Абдурахманов Б.М. Осветительное устройство // Даствлабки Патент РУз. №695 (1 Н ДР 9300085.1). Приоритет от 12.03.93.
- 4.Саидов М.С., Абдурахманов Б.М., Олимов Л.О. Примесный термофотovoltaический эффект границ зерен поликристаллического кремниевого солнечного элемента // Гелиотехника, 2007.-№4.-С.8-13.
- 5.Саидов М.С. Примесные вольтаические эффекты и термофотovoltaический эффект // Гелиотехника, 2004.-№1.-С.2-7.
- 6.Yang J.J., Simpson W.J., Ruth R.P. Dependence of electrical properties of polycrystalline Si films on grain size and impurity doping concentration // J. Electron. Mater., 1981.-V.10.-Is.6.-PP.1011-1050.
- 7.Билялов Р.В., Саидов М.С., Чирва В.П. Водородная пассивация поликристаллических кремниевых солнечных элементов // Гелиотехника, 1990.-№4.-С.36-39.
- 8.Гаджалиев М.М., Пирмагомедов З.Ш. Термоэдс полупроводникового р-п-гетероперехода // Физика и техника полупроводников, 2003.-Т.37.-Вып.11.-С.1334.
- 9.Keevers M.J. and Green M.A. Efficiency improvements of silicon solar cells by the Impurity photovoltaic effect // J. Appl. Phys., 1994.-V.75.-N8.-PP.4022-4031.
- 10.Камнинский В.В., Соловьев С.М. Возникновение электродвижущей силы при изменении валентности ионов самария в процессе фазового перехода в монокристаллах SmS // Физика и техника полупроводников, 2001.-Т.43.-Вып. 3.-С.423-426.
- 11.И.Пригожин, Д.Кондепуди. Современная термодинамика // М.: Мир., 2009.-461 с.
- 12.A. M. Turing. Philosophical Transactions of the Royal Society of London // Series B, Biological Sciences, (Aug. 14, 1952).-Vol. 237.-No.641.-PP.37-72.

Поступило в печать 25.03.2019 г.
Подписано в печать 25.03.2019 г. Бумага белая.
Гарнитура литературная. Печать цифровая. Усл.печ.л. 2,32.
Тираж 100 экз. Заказ № 20.

Отпечатано в типографии «Нури маърифат».
735700, г.Худжанд, 20 квартал, учебный корпус №3