

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Научно-исследовательского
института Энергетики и экономики при
ГКПЭН КР, доктор технических наук,
профессор



 А.Дж. Обозов

 2019 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу Кадырова Абдулахата Лакимовича «Электрофизические свойства преобразователей солнечной и тепловой энергии на основе вторичного литого поликристаллического кремния», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность. Сегодня поиск и замена традиционных ресурсов, используемых для производства энергии, изучение и разработка новых технологий на основе возобновляемых источников энергии является вопросом глобального тренда и диверсификации технологического и экономического развития. Одним из приоритетных направлений развития возобновляемой энергетики является солнечная энергетика и ее прямое преобразование в электроэнергию на основе фотогальванических явлений в частности. Таким образом, поиск, решение и создание новых материалов для фотоэлектрических преобразователей, отличающихся относительно невысокой стоимостью, приемлемым КПД и надежными эксплуатационными показателями являются актуальными научными задачами, решению которых и посвящена предлагаемая диссертационная работа.

Диссертация Кадырова А.Л. посвящена исследованию электрофизических, фото- и тепловольтаических свойств вторичного литого поликристаллического кремния (ВЛПК) из отходов металлургии кремния, различных n^+ -р и n^+ -р-р⁺ - структур, солнечных элементов (СЭ) и преобразователей тепловой энергии (ПТЭ) на его основе и разработке научно-обоснованных технологических режимов их изготовления.

Для выполнения поставленных в диссертации задач соискателем выполнен достаточно большой объем работ, в частности:

-проведён комплексный анализ и исследование электрофизических характеристик исходных материалов, полуфабрикатов и СЭ в процессе их изготовления из литого ПК, в том числе, на концентрированном солнечном излучении;

-дана оценка влияния водородной пассивации, типа токосъемных контактов и просветляющего покрытия, методов получения p-n- переходов и ряда других факторов на выходные параметры СЭ из ВЛПК;

-изучено влияние температуры и локальной засветки поверхности образцов на электрофизические свойства изотипных n^+p и n^+p-p^+ -структур на основе ВЛПК;

-проведено исследование электрофизических свойств собственного производства тепловольтаических преобразователей энергии на базе микрорезнистого ВЛПК и ТК, а также их сочетаний;

-дано теоретическое обоснование получаемых экспериментальных результатов по части возникновения термо-ЭДС при однородном нагреве изотипных структур на основе ВЛПК.

Научная новизна полученных в работе результатов также не вызывает сомнения. Автором впервые:

-**показана** возможность достижения на СЭ из ВЛПК с КПД $\leq 12\%$ в лабораторных и $\sim 8\%$ 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 более коротковолновую область ($\lambda=0,7$ мкм.), что обусловлено спектром энергетических уровней граничных зарядовых состояний;

-**определён** диапазон КСИ ($5 \div 10$ крат, $P_0 = 850$ Вт/м²), в пределах которого на СЭ из ВЛПК обнаруживается эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания с ростом уровня облучения;

-**установлен** примесный тепловольтаический эффект (ТВЭ) на подготовленных им образцах ВЛПК, 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 $\sim 4 \cdot 10^{18}$ 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;

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

градиентном нагреве; использование микропорошкового ВЛПК, в котором генерация носителей тока с участием глубоких уровней растет с уменьшением размеров зёрен, либо создание градиента температуры улучшают энергетические пара-метры 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 ~ 1 Ом·см и размером зерен ~ 300 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.

Практическую значимость полученных результатов представленной работы следует выделить отдельно. Заключается она в следующих основных положениях:

-показана возможность изготовления солнечных элементов с КПД до 8÷12 % с применением диффузии, ионной имплантации и созданием МДП-структур;

-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 позволяют резко увеличить энергетические параметры преобразователя тепловой энергии;

-примесный тепловольтаический эффект и предлагаемые варианты преобразователей тепловой энергии, изготавливаемые на основе изотипного, микрозернистого ВЛПК, р-n 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

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-n- переходов на ВЛПК выбирается ниже, чем на аналогичных операциях, проводимых на МК;
3. Концентрации легирующей примеси в базе и фронтальном слое СЭ из ВЛПК вне «ямы» подвижности, значения которых зависят от размеров зерен и режимы водородной пассивации граничных зарядовых состояний у СЭ на

основе ВЛПК, позволяющие заметно приблизить их энергетические параметры к таковым у СЭ из моно-Si;

5. Диапазон концентраций солнечного излучения ($5 \div 10$ крат.), в пределах которого проявляется эффект сверхлинейности;

6. Температуры, при которых происходит эффект переключения – изменение полярности напряжения холостого хода и направления тока короткого замыкания у изотипных образцов ВЛПК;

7. 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;

8. 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;

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

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.

Во введение обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, указаны объекты исследования, показаны научная новизна и практическая значимость, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится литературный обзор, проведен анализ текущего состояния исследований фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии и полупроводниковых преобразователей тепловой энергии, определены основные задачи исследований.

Во второй главе даются основные характеристики использованных экспериментальных установок и приборов. Приводится описание установки для получения вторичного литого поликристаллического кремния. Разработаны методы и установки для измерения основных электрофизических параметров кремниевых образцов и структур. Описана установка для измерения глубины залегания р-п-перехода. Приведены методы и описаны установки для исследования фотоэлектрических, вольтамперных и термоэлектрических характеристик.

В третьей главе представлены физико-химические процессы получения ВЛПК методом литья и технического кремния карботермическим способом. Приведены данные по выборке сырья, подготовка лигатуры и разработка технологии плавки ВЛПК. Получены выходные параметры ВЛПК и даны рекомендации по их улучшению. Описан процесс получения металлургического кремния высших сортов электродуговым способом в

регионе. Приведены пути использования ВЛПК и регионального технического кремния в фото- и теплоэнергетике.

В четвертой главе изложены основные результаты изготовления и исследования электрофизических свойств солнечных элементов на основе ВЛПК. Были созданы мелкозалегающие p-n-переходы методом диффузии и сравнительного анализа параметров солнечных элементов, полученных различными методами. Проведены исследования влияния низкоомных многослойных токосъемных контактов на эффективность солнечных элементов на основе ВЛПК. Получены различные просветляющие покрытия и изучено их влияние на оптические свойства солнечных элементов из ВЛПК. Получены электрофизические характеристики солнечных элементов на основе ВЛПК.

В пятой главе приводятся результаты разработки способов улучшения электрофизических параметров солнечных элементов на основе ВЛПК.

В шестой главе рассмотрены вопросы получения температурных характеристик изотипных образцов, n^+ -р и n^+ -р-р⁺-структур на основе ВЛПК. Исследованы параметры ВЛПК и n^+ -р-структур на его основе при повышенных температурах и локальной засветке поверхности. Получены электрофизические свойства нагреваемых тонких изотипных пластин из ВЛПК, изучено влияние температуры на некоторые свойства n^+ -р и n^+ -р-р⁺-структур на основе ВЛПК. Исследованы примесные тепловольтаические эффекты в монокристаллических кремниевых n^+ -р-структурах.

В седьмой главе дается оценка выходных энергетических параметров преобразователей тепловой энергии из ВЛПК.

В заключении приведены основные выводы по работе, 3 Приложения, список цитируемой литературы и список опубликованных работ диссертанта.

Диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ и написана хорошим грамотным научным языком. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационного исследования.

Вместе с тем следует указать на следующие **недостатки** в работе:

1. Качество оформления некоторых рисунков (рис.6.9 на стр.183, рис.П.3 на стр.244 и рис. П.4 на стр.245) оставляет желать лучшего, на рис.5.5 на стр.150, например, начало кривой 2 отодвинуто от начала координат.
2. В приведенных в разделе 7.3 формулах в некоторых случаях не даются пояснения введенных обозначений, что затрудняет понимание текста.
3. Сегодня в мире ведутся научные разработки, направленные на создание принципиально новых фотоэлектрических преобразователей. Так, тандемные и многокаскадные фотоэлектрические преобразователи на основе соединений типа $A^{III}B^V$ (арсенид галлия, системы AlGaAs, AlGaInAs и др.) уже имеют КПД в лабораторных условиях более 40 %. Фотоэлектрические преобразователи на основе монокремния, мульткремния, аморфного кремния (a-Si), микро- и нано-кремния имеют КПД в полевых условиях до 18-20%. В диссертации не приведено сравнение с вышеуказанными материалами, интерес вызывает проведение сравнительного расчетного анализа

эффективности предлагаемой технологии, а также экономической эффективности их производства в сравнении с вышеобозначенными технологиями.

4. К сожалению, в рассматриваемых физических моделях, где объясняется эффект сверхлинейного роста тока короткого замыкания от уровня облучения, не рассматривается влияние других факторов, влияющих на этот эффект, поскольку это проявление не однозначно.

Указанные недостатки не умаляют безусловной ценности диссертации, отличающейся новизной и направленной на решение актуальных задач физики твёрдого тела - фото- и тепловольтаики.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на различных конференциях, научных семинарах проводимых как в республике, так и за рубежом.

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

Диссертация Кадырова А.Л. рассматривалась и обсуждалась на Учёном совете Научно-исследовательского института «Энергетики и экономики» при Госкомитете промышленности, энергетики и недропользования Кыргызской республики (протокол №2 от 11 апреля 2019 г.), где был одобрен отзыв.

Считаем, что диссертационная работа Кадырова Абдулахата Лакимовича на тему «Электрофизические свойства преобразователей солнечной и тепловой энергии на основе вторичного литого поликристаллического кремния» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и по актуальности, целостности изложения, научной новизне и практической значимости полностью отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а сам диссертант, Кадыров Абдулахат Лакимович, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07- физика конденсированного состояния.

Зав. лаб. «СИС», д.т.н., проф.

Ураимов С.У.

Зав. НИЛ «ВИЭ», к.т.н.

Исаев Р.Э.

Подписи Ураимова С.У. и Исаева Р.Э. удостоверяю:

Ст. инспектор ОК

Бусурманова Г.Б.

