

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию **Кадырова Абдулхата Лакимовича «Электрофизические свойства преобразователей солнечной и тепловой энергии на основе вторичного литого поликристаллического кремния»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Основной целью работы А.Л. Кадырова является получение и комплексное исследование электрофизических, фото- и тепловольтаических свойств мульткристаллического кремния, полученного методом литья и дальнейшей направленной кристаллизации из отходов кремниевого производства, разработке на этой основе предложений научно-обоснованных технологических режимов изготовления солнечных элементов и преобразователей тепловой энергии.

Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений. Темпы развития солнечной энергетики в мире за последние 20 лет не имеют аналогов в других областях. Основным материалом для изготовления солнечных элементов (95 %) являются пластины моно- и мульткристаллического кремния. Одним из важнейших вопросов дальнейшего развития солнечной энергетики является снижение стоимости кремния с сохранением высокой эффективности солнечных элементов.

Для достижения поставленной цели автором был определен ряд сложных задач:

1. Выбор сырья и отработка режимов литья для получения кремния, пригодного для нужд фото- и теплоэнергетики;
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 р-п- перехода и ряда других факторов на выходные параметры СЭ из ВЛПК;
4. Изучение влияния температуры и локальной засветки поверхности образцов на электрофизические свойства изотипных, n+-р и n+-р-р+-структур на основе ВЛПК;
5. Разработка и исследование параметров тепловольтаических преобразователей энергии на базе микрзернистого ВЛПК и технического кремния, 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 тепловольтаических приборов на основе полученных данных.

Диссертация состоит из введения, семи глав основного текста, общих выводов по работе и 3 приложений. Общий объем работы составляет 274 страницы, включая 81 рисунок, 22 таблицы и список цитированной литературы из 207 наименований.

**В первой главе** дан аналитический обзор по проблеме фотоэлектрического преобразования солнечной энергии и краткой предыстории возникновения идеи использования вторичного ПК для этих целей. Кроме того рассмотрены результаты исследований по термофотовольтаическому эффекту.

**Вторая глава** посвящена описанию методологии и техники экспериментов по исследованию электрофизических, оптических и тепловольтаических свойств различных структур, а также солнечных и тепловых преобразователей энергии на основе ВЛПК. Детально описывается установка марки С-3179, приспособленная автором работы для получения кремния методом литья. Подробно рассмотрен разработанный и созданный с участием автора прибор автоматического снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ).

**Третья глава** посвящена выборке сырья из отходов кремниевого производства, подготовке лигатуры и разработке технологий получения литого кремния, описанию физико-химических процессов получения регионального техни-

ческого кремния электродуговым способом и особенностям получения из него литого кремния, а также обсуждаются пути дальнейшего использования полученного ТК в фото- и теплоэнергетике в кристаллической и микропорошковой модификациях. Здесь следует отметить детальное описание установки для получения кремния, которая состоит фактически из двух частей, включающих оригинальное устройство для плавления и выливки расплава кремния в нижнюю часть установки, представляющей собой камеру с заданным распределением температуры для осуществления процесса направленной кристаллизации. По сути, рассмотренная установка представляет лабораторный вариант получения мульткристаллического кремния с предварительным плавлением в вакууме исходного сырья. В связи с этим замечанием, оппонент в дальнейшем будет называть материал ВЛПК мульткристаллическим кремнием (мульткремний).

**В четвертой** главе изложены результаты экспериментального исследования электрофизических параметров СЭ на основе полученных блоков мульткремния. Изготовлены солнечные элементы с эффективностью 12,5 % на пластинах, предварительно подвергнутых шлифовке, полировке и химическому травлению. Разработаны все процессы изготовления солнечных элементов с выбором оптимальных просветляющих покрытий и токосъемных сеток. При холловских измерениях сделан принципиальный вывод о том, что нельзя стандартные методики, используемые при исследованиях монокристаллического кремния переносить на мульткристаллический кремний.

**Пятая глава** посвящена изучению путей улучшения электрофизических параметров солнечных элементов. В работе подробно приводится сравнительный анализ водородной пассивации солнечных элементов, изготовленных на основе поликремния различных видов. Методом ИК– спектроскопии показана пассивация углеродосодержащих дефектов, а также Ni, Cu и Cr, ответственных за снижение времени жизни носителей заряда как в зернах, так и на границах раздела. Обнаружен новый эффект - сверхлинейный рост тока короткого замыкания солнечных элементов при концентрировании солнечного излучения в диапазоне 5 ÷ 10 крат. Показано, что предварительная пассивация рекомбинационной активности зарядовых состояний образцов СЭ приводит к практиче-

скому исчезновению эффекта сверхлинейного роста тока короткого замыкания, а характер зависимости  $I_{кз}$  от интенсивности концентрированного солнечного излучения начинает приближаться к наблюдаемому у СЭ из монокристаллического кремния. Следует отметить использование современных методов оценки электрофизических характеристик мульткристаллического кремния. В работе использован LBIC – метод, который позволяет изучать рекомбинационную активность межзеренных границ. На основании этого показано, что линейные межзеренные границы могут быть пассированы в результате низкоэнергетичной (0,5 - 5 кэВ) водородной имплантации, что имеет высокое теоретическое и практическое значение.

**В шестой главе** изложены результаты исследований температурной зависимости электрофизических параметров изотипных образцов,  $n^+$ -р,  $n^+$ -р-р<sup>+</sup>-структур и СЭ на основе мульткристаллического и микрозернистого кремния. На основе исследований температурных зависимостей удельного сопротивления (проводимости), подвижности и концентрации на аналогичных температурных зависимостях фототока при локальном освещении делается вывод о проявлении примесного тепловольтаического эффекта, связанного с генерацией термодоноров с кислородокремниевых комплексов. Особо следует отметить обнаруженный автором эффект температурного переключения. 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.

**В седьмой главе** проводится оценка выходных энергетических параметров примесного тепловольтаического эффекта образцов из мульткристаллического кремния и дается теоретическая интерпретация возникновения ЭДС при однородном нагреве изотипного микрозернистого кремния.

В результате оптимизации структуры элементов преобразователей тепловой энергии применением порошкового микрозернистого кремния и защиты поверхностного окисного слоя автору удалось резко увеличить энергетические параметры элементов. Предложена конструкция эффективного преобразователя тепловой энергии.

Все это, а также несомненная новизна полученных результатов положены в основу выводов и сформулированных научных положений.

Достоверность полученных автором данных подтверждается применением типовых, многократно проверенных методов, использованием сертифицированного оборудования с соответствующими калибровками, тщательностью проведенных экспериментов, хорошей воспроизводимостью результатов при широком варьировании внешних условий.

**По работе возникает ряд замечаний и вопросов:**

1. Первое замечание относится к необоснованно большому количеству защищаемых положений. На взгляд оппонента 2, 3 и 4-ое защищаемые положения было бы целесообразно объединить как относящиеся к технологии изготовления солнечных элементов, 8, 9 и 10-ое положения, как относящиеся к наблюдению примесного тепловольтаического эффекта, а 11, 12 и 13, как относящиеся к конкретным устройствам.
2. На стр.8 приведены ссылки на работы 255 и 263. Статья под номером 263 отсутствует в списке литературы. По-видимому, автор имел в виду ссылки 254 и 262.
3. В научной новизне на стр. 10 написано «выявлена более сильная температурная зависимость коэффициента выпрямления на n-p-структурах из ВЛПК с заведомо высокой концентрацией локальных включений...». Возникает вопрос – по сравнению с чем?
4. На этой же странице приводится – «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 удастся очистить ТК за счет выдержки расплава в форвакууме и сегрегации примесей при затвердевании расплава». Из этого заключения можно понять, что полученный таким образом мультикремний соответствует требованиям солнечной энергетики. Однако это совсем не так. Кремний с такими электрофизическими характеристиками не пригоден для изготовления солнечных элементов.

5. Встречаются в тексте жаргонные выражения. Так на стр.41 «солнечное электричество», «глубокие примеси» стр.194, 202 и др. На стр.71 написано – «мощность нагревателя выплавки «пробки» постепенно увеличивается на 50 А» ?
6. На стр.83 написано, что «ТК получается восстановлением  $\text{SiO}_2$  углеродом при температуре  $\sim 1900^\circ\text{C}$ ». Однако хорошо известно из термодинамических расчетов и многочисленных экспериментов, что это температура начала восстановления кремния из природного  $\text{SiO}_2$ . А температура в рудотермической печи достигает 2000-2200°C.
7. Вывод автора о том, «что пленочные СЭ на основе подложечного моно- и поли- Si из регионального ТК не будут ни в чем уступать таковым по [93,94], изготовленным на моно- и поли- Si, включая ВЛПК из отходов производства эпитаксии, моно- и поли- Si, а также с добавлением ТК производства ДХМЗ» ничем не обоснован. В настоящее время на солнечных элементах (например компанией Хевел разработаны гетероструктурные солнечные элементы на кремнии с КПД 21,5 %). При этом в качестве пластин используется высокоомный кремний N – типа.
8. На стр. 115 говорится, что «Толщина слоев монооксида кремния в процессе нанесения контролировалась с помощью пьезоэлектрического кварцевого датчика». Следует заметить, что монооксид кремния существует в газообразном состоянии, а при осаждении образуется двуоксид кремния и кремний.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Результаты диссертационной работы А.Л. Кадырова хорошо апробированы на многочисленных международных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах. Диссертация является цельным, законченным и глубоким исследованием, имеющим большое научное и практическое значение для дальнейшего развития материаловедческих направлений связанных с разработкой малозатратных технологий получения и применения кремния для солнечной энергетики. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Диссертация хорошо оформлена и иллюстрирована рисунками.

В целом характеризуя диссертационную работу А.Л. Кадырова можно констатировать, что на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики конденсированного состояния в части материаловедения кремния для солнечной энергетики. Абдулахат Лакимович Кадыров является известным специалистом в области не традиционных методов получения кремния для солнечной энергетики, исследования его характеристик и разработки фото-электрических и термофото-электрических преобразователей солнечного излучения, а его работа вносит существенный вклад в развитие этого направления.

Считаю, что диссертационная работа **Абдулахата Лакимовича Кадырова** в полной мере удовлетворяет требованиям положения ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геохимии им А.П.Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики монокристаллов, заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., профессор



*Александр Иосифович Непомнящих*

Непомнящих Александр Иосифович

664033, г.Иркутск, ул. Фаворского 1а, E-mail: [ainep@igc.irk.ru](mailto:ainep@igc.irk.ru), тел: +73952511466

Подпись *Непомнящих А.И.*  
ЗАВЕРЯЮ *Бриль Г.И.*  
Зав. канцелярией  
ИГХ СО РАН *Бриль Г.И.*