

Резюме проекта, выполняемого

в рамках ФЦП

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»

по этапу № 4

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: 14.607.21.0075

Тема: «Разработка фотоэлектрических гетероструктурных преобразователей на основе кристаллического и аморфного кремния с конкурентными на мировом рынке энергетическими и экономическими показателями.»

Приоритетное направление: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика (ЭЭ)

Критическая технология: Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику

Период выполнения: 20.10.2014 - 31.12.2016

Плановое финансирование проекта: 78.00 млн. руб.

Бюджетные средства 46.00 млн. руб.,

Внебюджетные средства 32.00 млн. руб.

Получатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Участник Консорциума: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"

Индустриальный партнер: Общество с ограниченной ответственностью "Хевел"

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, эффективность преобразователей, стоимость преобразователей, кристаллический кремний, аморфный кремний, фотоэлектрический модуль, гетеропереходная технология, текстурирование поверхности, плазмохимическая технология, проволочные контакты, металлизация, трафаретная печать

1. Цель проекта

Разработать научные основы технологии и конструкций фотоэлектрических гетероструктурных преобразователя (ФЭП типа НГТ) на основе кристаллического и аморфного кремния для солнечных элементов и модулей с технико-экономическими характеристиками, обеспечивающими конкурентные преимущества на российском и мировом рынках по эффективности (не менее 20 %) и низкой стоимости удельной мощности. Разработать научные основы технологии создания фотоэлектрических гетероструктурных модулей (ФЭГПМ) на основе ФЭП.

Высокая эффективность ФЭП будет получена путем использования запатентованных технологий пассивации интерфейсов и плазмохимического осаждения аморфных слоев, а низкую стоимость – удешевлением технологии, использованием промышленного оборудования и потенциально большим объемом производства солнечных модулей (до 1 ГВт в год) в условиях завода Новочебоксарска.

2. Основные результаты проекта

Были изготовлены а) полноразмерные модули ФЭГПМ размером 6x10 из 60 ячеек по технологии smartwire, б) модули размером 6x7 из 42 ячеек по клеевой технологии, в) минимодули размером 2x3 из 6 ячеек по технологии пайки.

Проведен контроль ФЭГПМ на отсутствии дефектов, контроль геометрических размеров, получены результаты исследования фотоэлектрических параметров ФЭГПМ, проведена оценка удельного контактного сопротивления токосъёмных шин, протестированы ФЭГПМ в климатической камере, проведены испытания ФЭГПМ на токи утечки, надежности при наличии механических нагрузок.

Для повышения стабильности к условиям ветровой и механической нагрузкам, для уменьшения электрических потерь необходимо использовать высококачественные ламинаты и герметики, провести оптимизации технологии изготовления ФЭП и технологии сборки ФЭГПМ.

Разработаны эскизный проект «Экспериментальный образец ФЭП», технические требования на ФЭГПМ.

Были разработаны два стенда натуральных испытаний, обеспечивающих круглосуточную регистрацию метеорологических данных и фотоэлектрических параметров солнечных элементов для оценки качества работы и надежности ФЭГПМ. Предварительные испытания экспериментальных образцов ФЭГПМ в натуральных условиях, проведенные Индустриальным партнером, показали, что за 35 дней наблюдения деградации ФЭГПМ типа НГТ не обнаружено.

Основные характеристики созданной научной (научно-технической, инновационной) продукции.

Исследовательские испытания подтвердили выполнение пунктов ТЗ по заявленным численным характеристикам полноразмерных ФЭГПМ размерами 1656x991 мм с 6x10=60 ФЭПами размерами 156x156 мм. Образцы выдержали входной контроль на отсутствии поверхностных дефектов, контроль геометрических размеров, выдержали исследовательские испытания по измерениям ВАХ, определению фотоэлектрических параметров ФЭГПМ (P_{mp} - 273 Вт, V_{oc} - 43 В, I_{sc} - 8.8 А, FF - 72.00 %, средний P_{mp} ФЭПа - 4,55 Вт). Образцы выдержали испытания по определению удельного контактного сопротивления токопроводящих шин, выдержали испытания на стойкость к влажности (85%) и высоким температурам (85°C) в течение 1000 часов.

Разработанная конструкция токопроводящих шин позволяет уменьшить потребление Ag на 21 г на ФЭГПМ при увеличении КПД на 5.7 % отн. Оптимизация конструкции монтажа позволяет увеличить мощность до 10 Вт, до 10 % отн. Для повышения стабильности к ветровой и механическим нагрузкам рекомендуется использовать ламинаты EVA для эксплуатации модулей в жарком климате, PIV – во влажном климате.

При использовании технологии «Smartwire» закругленная форма проволок увеличивает поглощение света ФЭП за счет уменьшения затенения на 25 % по сравнению с металлическими шинами при использовании технологии «Busbar». При этом совокупные потери мощности ФЭП, изготовленные по технологии SmartWire, меньше в 2 раза по сравнению с технологией BusBar.

Меньшие потери мощности при переходе от элементов к модулю имеют двусторонние образцы по сравнению с односторонними образцами, 4.6 Вт и 7.6 Вт, соответственно. Двусторонние образцы с конфигурацией стекло/стекло (G/G) имеют на 10 Вт большую мощность по сравнению с односторонними образцами. Мощность двусторонних образцов на 8-10 Вт больше односторонних с тыльным покрытием.

Увеличение сопротивления слоя ПГО в 10 раз увеличивает относительные потери на ~ 3% для варианта BusBar и ~5% для варианта SmartWire. Расчеты показали, что если эффективность ФЭП равно 21%, то она уменьшится не более 1 %.

При массовом производстве ФЭП типа НГТ и модулей на их основе (стандартный модуль состоит из 60 ФЭП) наиболее перспективным является использование линейных цилиндрических магнетронных источников с вращающимися мишенями для нанесения ПГО слоев в DC режиме.

Оценку элементов новизны научных (конструкторских, технологических) решений.

Проведены сопоставления результатов анализа информационных источников и результатов исследовательских испытаний экспериментальных образцов ФЭГПМ, которые подтвердили новизну научно-технических решений по следующим направлениям:

- а) расчетам слоевого сопротивления тонкого фронтального слоя ФЭПа, в котором протекает собираемый ток и которое вносит заметный вклад в последовательное сопротивление ФЭПов при их сборке в ФЭГПМ;
- б) применению токопроводящих паст для создания контактов токопровода, выбор и определение их состава, способам обеспечения их стабильности и адгезии к полупроводниковой основе;
- в) расчетам стойкости ФЭГПМ к влажности, скорости проникновения воды внутрь модуля, анализу факторов, обеспечивающих их температурную стабильность;
- г) оценке механической и ветровой надежности ФЭГПМ в условиях реальной эксплуатации;

Приведен сравнительный анализ конструкторских и технологических решений, из которого следует, что выбранное направление по разработке фотоэлектрических гетероструктурных преобразователей (гетероструктурный ФЭП типа НГТ) на основе кристаллического и аморфного кремния имеет конкурентные на мировом рынке энергетические и экономические показатели: КПД ФЭП более 20%, с предварительной оценкой их удельной стоимости менее 30 руб./Вт, изготовленных на промышленном оборудовании Индустриального партнера ООО «Хевел». При этом впервые для этого использованы технологические установки плазмохимического осаждения KAI фирмы «Oerlicon».

Сопоставление с результатами аналогичных работ, определяющими мировой уровень.

Проведено сопоставление параметров экспериментальных образцов ФЭГПМ. Показано, что оптимизация технологических этапов позволит получить мощность единичного ФЭГПМ с количеством ячеек 6x10=60 на менее 297 Вт. Анализ литературы показал, что это превышает на 9.5 Вт мощность реальных промышленных модулей фирмы Meyer Burger, которые в настоящее время находятся на испытательном стенде в Lugano, Switzerland.

Разработана модель и проведены теоретические расчеты по оптимизации контактных сеток. Впервые показано, что при малом числе поперечных шин (пальцев) увеличивается ток короткого замыкания и последовательное сопротивление контактных сеток. По мере увеличения числа пальцев ток короткого замыкания будет уменьшаться, вследствие роста затенения контактной сетки. При этом также будет уменьшаться последовательное сопротивление. Модель позволяет определить оптимальное соотношение между значениями плотности тока короткого замыкания и величиной фактора заполнения ВАХ, связанного с величиной последовательного сопротивления.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что возможным является разработка отечественных низкотемпературных

токопроводящих композитов (пасты) с температурой вжигания контактов не более 250°C, необходимые для создания контактных шин при разработке высокоэффективных ФЭГПМ.

Для повышения надежности ФЭГПМ необходимо использовать ламинаты с улучшенными термофизическими и механическими свойствами: POE (polyolefin, полиолефиновая) или XLPO (cross-linked polyolefin, сшитая полиолефиновая) вместо обычно используемой пленки EVA (Ethylene-vinyl acetate, этиленвинилацетатная). Расчеты показали, что их использование, в сочетании с герметизирующими краевыми изоляторами, позволяет уменьшить скорость диффузии атмосферных паров воды внутрь модуля до 30-40 лет.

Впервые в НТЦ ТПТ на промышленном оборудовании Индустриального партнера ООО «Хевел» разработан процесс формирования гетеропереходов при помощи реакторов KAI, позволяющий изготавливать прототипы промышленных ФЭП типа НПГ с эффективностью свыше 21%. Было показано, что применение технологии формирования контактной сетки Smartwire, предлагаемой компанией Meyer-Burger, может позволить увеличить эффективность ФЭП еще примерно на 1 абс.%.

Впервые было показано, что использование аморфных материалов на основе SiO₂, которые являются прозрачными в области поглощения ФЭГПМ на основе НПГ, могут обеспечить их высокую лучевую и радиационную стойкость до 10⁹ Гр. Их использование также может привести к повышению эффективности преобразования за счет наличия антистоксовой люминесценции. При этом дополнительное легирование Sm, Gd позволяет залечивать дефекты, что уменьшает концентрацию собственных и радиационных дефектов.

3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках прикладного научного исследования и экспериментальной разработки

На данном этапе не планировались.

4. Назначение и область применения результатов проекта

Описание практического внедрения полученных (на этапе или по завершении проекта) результатов или перспектив их использования;

По завершению проекта практическое внедрение будет иметь следующие результаты:

- возможность промышленного выпуска конкурентных на мировом рынке ФЭП и ФЭГПМ с высокими энергетическими и экономическими показателями (КПД ФЭП более 20%, с предварительной оценкой их удельной стоимости менее 30 руб./Вт). При этом они будут изготовлены на промышленном оборудовании Индустриального партнера ООО «Хевел» с использованием технологической установки плазмохимического осаждения KAI фирмы «Oerlicon».

- для массового производства ФЭП типа НПГ и модулей на их основе (стандартный модуль состоит из 60 ФЭПов) наиболее перспективным является использование линейных цилиндрических магнетронных источников с вращающимися мишенями для нанесения ИТО слоев в DC режиме. Свойства ИТО слоев в основном определяются составом ИТО мишени, концентрацией кислорода в рабочей газовой смеси и температурой подложки. Оптимизация данных параметров, а также параметров контактной сетки, позволит увеличить КПД ФЭП на 1-2 % абс.

Оценка и прогноз влияния полученных результатов на развитие научно-технических и технологических направлений; разработку новых технических решений; на изменение структуры производства и потребления товаров и услуг в соответствующих секторах рынка и социальной сферы;

Разработанная программа и методики исследовательских испытаний экспериментальных образцов ФЭГПМ соответствует современному уровню науки, содержит требования к условиям, обеспечению и проведению исследовательских испытаний, требования безопасности, программу, методы и режимы испытаний. ПМ направлена на подтверждение соответствия объекта исследований требованиям ТЗ, используется при проведении и анализе результатов исследовательских испытаний экспериментальных образцов ФЭГПМ, при разработке технических требований к ФЭГПМ, эскизного проекта «Экспериментальный образец ФЭП».

Признаками высокой вероятности значительного влияния полученных результатов на развитие научно-технических и технологических направлений по созданию новых фотоэлектрических преобразователей являются: наличие публикаций в журналах с высокими импакт факторами (>2), участие в отечественных и международных конференциях, использование уникального технологического и исследовательского оборудования мировых лидеров разработки и промышленного выпуска фотоэлектрических элементов (ФЭП) и модулей (ФЭГПМ).

5. Эффекты от внедрения результатов проекта

Производство ФЭП по технологии НПГ, как и производство тонкопленочных ФЭП, будет реализовано на современном роботизированном Заводе ООО «Хевел». Основным этапом является нанесение слоев кремния на подложку в процессе плазмохимического осаждения. Данный процесс осуществляется в PECVD установках, которые входят в состав уже существующей производственной линии завода. По завершению модернизации завода и запуска линии производства ФЭП и ФЭГПМ мощность завода будет увеличена не менее 2 раз, с годовым объемом выпускаемой продукции более 250 МВт суммарной мощности фотоэлектрических преобразователей.

6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта

На данном этапе не планировались.

7. Наличие соисполнителей

Физический факультет МГУ. Привлекались в 1-ом и 2-ом полугодии 2015 г., в 1-ом полугодии 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук

Зам.директора

(должность)

(подпись)

Лебедев С.В.

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель работ по проекту

зав.лабораторией

(должность)

(подпись)

Теруков Е.И.

(фамилия, имя, отчество)

М.П.