

**Резюме проекта (НИР), выполненного в рамках ФЦП  
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»  
по этапу №4**

Номер контракта: 16.516.11.6053

Тема: Разработка и создание автономных солнечных установок энергоснабжения с расщеплением солнечного спектра, слежением за солнцем и аккумулярованием энергии

Приоритетное направление: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

Критическая технология: нанотехнологии и наноматериалы

Период выполнения: С «28» апреля 2011 г. по «12» ноября 2012 г.

Плановое финансирование проекта: 12,36 млн. руб.

Бюджетные средства - 10,5 млн. руб.,

Внебюджетные средства - 1,86 млн. руб.

Исполнитель: Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

Ключевые слова: Фотоэлектрический преобразователь, концентратор солнечного излучения, фотоэлектрический концентраторный модуль, расщепление света, литий-ионные аккумуляторы

## **1. Цель исследования, разработки**

Разработка методов расчета и проектирования фотоэлектрических преобразователей и концентраторных модулей на их основе, разработка методики ускоренных испытаний литий-ионных аккумуляторов и изучение механизмов деградации.

Разработка технологии изготовления литий-ионных аккумуляторов с увеличенным сроком службы. Создание экспериментальных образцов фотопреобразователей и концентраторных модулей с расщеплением света и проведение их экспериментальных исследований. Разработка научно-технического обоснования применения автономных систем фотопреобразователей в реальном секторе экономики.

## **2. Основные результаты проекта**

Разработана математическая модель многопереходного солнечного элемента. Особенностью разработанной модели является возможность учета спектрального состава света при прохождении через многослойную структуру фотоэлемента и учет неравномерности освещения. Данная модель необходима при разработке солнечных элементов и позволяет на предварительном этапе подобрать параметры структур солнечных элементов максимально близкими к оптимальным, что сокращает время и затраты материалов на разработку солнечных элементов.

Проведены расчеты эффективности концентраторных фотоэлектрических модулей с расщеплением света. Расчеты сделаны для трех выбранных вариантов исполнения. Расчеты необходимы, в первую очередь, для выбора параметров дихроичных фильтров и их согласования с характеристиками фотоэлементов, подбора оптимального соотношения между параметрами солнечных элементов и оценки эффективности выбранных решений. Показано, что эффективность фотоэлектрического преобразования в системе с тремя p-n переходами (с расщеплением света на два либо три спектральных диапазона) возможно дос-

тижение КПД фотоэлектрического преобразования более 49%. Применение четвертого р-п перехода может дать дополнительный выигрыш на уровне 2,5 %.

Ввиду того, что в разрабатываемой конструкции фотоэлектрического модуля с расщеплением света верхний фотоэлемент установлен на поверхности концентратора (линзы Френеля) было принято решение по применению линз Френеля увеличенного размера (по сравнению со стандартными концентраторными модулями). Были получены профили линз Френеля размером  $6 \times 6 \text{ см}^2$  и фокусным расстоянием 112 мм, являющимся оптимальным с точки зрения КПД линзы для указанного размера. Применение концентраторов увеличенного размера необходимо для снижения оптических потерь на затенение.

Были разработаны прецизионные датчики слежения за солнцем предназначенные для установки на трекер, применение которых необходимо для использования с концентраторными модулями с высокой кратностью концентрирования солнечного света.

Была разработана компьютерная система сбора данных, в возможности которой входит измерение нагрузочных вольт-амперных характеристик солнечных батарей, и энергоустановок, их обработка и сохранение. Данная система необходима как для характеристики модулей на этапе разработки, так и для исследования поведения солнечной энергоустановки в реальных условиях и согласования ее параметров с системой аккумулирования.

Была разработана технология жидкофазного синтеза электродного материала на основе литированного фосфата железа с и без использования добавок. данная технология необходима для проводимых исследований по увеличению срока службы электродных материалов.

Были разработаны методы диагностики электродных материалов литий-ионных аккумуляторов, применение которых необходимо для выполнения поставленных в проекте задач по увеличению емкости и срока службы аккумуляторов. Применение современных методов диагностики должно позволить на предварительном этапе исследований провести отбор наилучших образцов и таким образом сократить сроки исследований и повысить эффективность работы.

С помощью компьютерного моделирования была продемонстрирована важная роль параметров границ раздела (разрывы зон, поверхностные состояния) для солнечных элементов на основе GaInP. Была достигнута хорошая корреляция с экспериментальными данными.

Было показано, что высокое значение разрыва валентной зоны на GaAs/AlInP интерфейсе для р-п структур приводит к ухудшению характеристик солнечных элементов на их основе.

Было показано, что значительная величина разрыва валентной зоны на границе раздела между р-GaAs и р-AlInP принципиально не позволяет использовать данный интерфейс в СЭ, работающих при высоких концентрациях солнечного излучения. Избежать данной проблемы можно при использовании слоя р- $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$  в качестве, граничащего с контактным слоем р-GaAs. Однако, при использовании р- $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$  в качестве окна, зонная структура границы раздела р- $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ /р-GaInP приводит к резкому возрастанию влияния поверхностных состояний на этом интерфейсе и, как следствие, к значительному ухудшению характеристик СЭ

Проведенные расчеты показали что оптимальные структуры широкозонных СЭ с использованием интерфейсов  $(\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4})_{0,5}\text{In}_{0,49}\text{P}$ /р-GaInP и  $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}/(\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4})_{0,5}\text{In}_{0,49}\text{P}$ , обладают КПД при освещении спектром AM1.5 17%

Проведено исследование средств "in-situ" контроля в установке МОС-гидридной эпитаксии и показано, что комбинация in-situ методов нормализованной рефлектометрии и спектроскопии анизотропного отражения является эффективным средством исследования ключевых параметров выращиваемых полупроводниковых эпитаксиальных слоев.

Продемонстрировано определение скоростей роста и, следовательно, толщин полупроводниковых слоев, составов твердых растворов и качества морфологии поверхности с помощью in-situ рефлектометрии. Также показана возможность определения типа и уровня (при построении соответствующих калибровочных зависимостей) легиро-

вания эпитаксиальных слоев, степени упорядочения твердых растворов, особенностей реконструкции поверхности и ее дезоксидации с помощью in-situ спектроскопии анизотропного отражения.

Проведены исследования различных механизмов синтеза  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Проанализированы свойства материалов, получаемых с помощью различных методов.

Разработаны методы постростовой обработки КСЭ, позволяющие снизить число операций и одновременно повысить КПД преобразования при высокой кратности концентрирования за счет снижения распределенных омических потерь и увеличения точности обработки.

Для описания профиля концентрации лития в образце разработана система уравнений, называемых двухфазной задачей Стефана с разрывом концентраций на границе.

Разработана технология изготовления концентраторных солнечных элементов, обеспечивающая значения тока короткого замыкания на уровне  $14,4 \text{ mA/cm}^2$  (для спектра AM1,5), что соответствует КПД фотопреобразования более 37%.

Проведены исследования по разработке и оптимизации многослойных омических контактов на основе Ti, Pt, Ag (Au) к материалу p-типа проводимости.

Разработана технология создания концентраторных солнечных элементов на основе InGaAs и InGaAsP, включающую дополнительное введение изовалентной примеси, приводящее к существенному улучшению их характеристик.

Разработана технология изготовления линзовых панелей с элементами вторичной оптики, обеспечивающих улучшение разориентационных характеристик.

Разработана технология монтажа электро-генерирующих линеек на стальном основании.

Проведены испытания концентраторных фотоэлектрических модулей со спектральным расщеплением светового потока дихроичными фильтрами. Исследованы различные конфигурации с применением 1-2 фильтров и одно- или двух-переходных солнечных элементов.

Проведена комплексная диагностика по определению структурно-фазового состава образцов электродных материалов на основе  $\text{LiFePO}_4$ . Установлено, что важнейшими параметрами катодного порошка являются размер частиц и содержание  $\text{Fe}^{3+}$ .

Разработана установка для исследования однородности люминесцентных свойств слоев структур фотопреобразователей, работающая в автоматическом режиме и позволяющая получать экспресс-информацию о распределении характеристик фотопреобразователей по площади пластины.

Предложено и реализовано абсолютно новое направление в развитии фотоэлектрических систем со спектральным и пространственным разделением световых потоков солнечного излучения заключающееся в реализации дополнительных возможностей многослойных полупроводниковых структур, при этом многопереходному элементу отводится не только роль фотоэлектрического преобразователя, но и селективного оптического зеркала.

Выведено уравнение, связывающее фотогенерируемый ток и эффективность СЭ при заданных значениях предэкспоненциальных множителей  $J_0$  и диодных коэффициентов  $A$ , определяемых из темновой безрезистивной  $J-V_j$  характеристики СЭ. Для p-n переходов из GaAs и GaSb получены безрезистивные (не учитывающие последовательное сопротивление структуры)  $J-V_j$  характеристики, из которых сформирована  $J-V_j$  характеристика GaAs/GaSb тандема.

Проведено определение коэффициента диффузии иона лития в синтезированном материале. Исследования методом электрохимического импеданса позволили получить значение коэффициента диффузии иона лития. Изготовлены макетные образцы на базе электродных материалов из феррофосфата лития.

Был изготовлен макет автономной фотоэнергоустановки с накоплением энергии, на котором проводилось тестирование взаимодействия всех систем. Основываясь на характе-

ристикмах разработанного макета были выработаны рекомендации по использованию и производству энергоустановок данного типа.

Разработанная методика ускоренных испытаний литий-ионных аккумуляторов позволяет уменьшить вклад ручного труда при исследовании аккумуляторов нового типа и уменьшить время, требуемое для получения значимых результатов. Применение данной методики позволило достигнуть прогресса в создании аккумуляторов с новым электродным материалом на основе феррофосфата лития, обладающего лучшими мощностными и емкостными характеристиками.

### **3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках исследования, разработки**

Изобретение заявка № 2011141796 от 14.10.2011 «Автономная система электропитания на основе солнечной фотоэлектрической установки», РФ.

Изобретение заявка № 2012100844 от 11.02.2012 «Способ изготовления фотовольтаического преобразователя», РФ.

Изобретение заявка № 2012110438 от 19.03.2012 «Способ изготовления чипов многослойных фотоэлементов», РФ.

### **4. Назначение и область применения результатов проекта**

В результате выполнения работ по Проекту будут усовершенствованы существующие технологии разработки и создания ФЭП, что приведет к увеличению КПД гетероструктурных солнечных фотоэлементов при преобразовании концентрированного солнечного излучения. Будет разработан и создан новый продукт – макет солнечной энергетической установки с системой аккумуляции электроэнергии.

### **5. Эффекты от внедрения результатов проекта**

Использование концентраторных фотоэлектрических установок с системой накопления энергии позволит обеспечить электричеством труднодоступные районы с высокой интенсивностью годового солнечного излучения, что должно повысить качество жизни населения в таких районах. Кроме того, использование высокоэффективных концентраторных систем фотоэлектрического преобразования энергии позволяет экономить площадь, необходимую для размещения солнечных установок.

К потенциальным потребителям автономных солнечных энергоустановок можно отнести:

1. Коммерческие предприятия, отдельные объекты, расположенные вдали от существующих электрических сетей и использующие солнечные энергетические установки для обеспечения электроэнергией своей хозяйственной и производственной деятельности.
2. Временные или перемещаемые военные и иные государственные объекты, находящиеся вдали от электросетей, использующие солнечные энергетические установки для повышения долговременной автономности обеспечения электроэнергией своей деятельности.
3. Научные, исследовательские станции и отдельные объекты, удаленные от электросетей или использующие солнечную энергию в резервных целях.
4. Частные домовладения, удаленные от электросетей, использующие солнечные энергетические установки для обеспечения электроэнергией домашнего хозяйства.

