

## Резюме проекта, выполняемого

в рамках ФЦП

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

по этапу № 2

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: 14.604.21.0089

Тема: «Мощные фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения с КПД более 60% для систем лучевой энергетики»

Приоритетное направление: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

Критическая технология: Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии

Период выполнения: 27.06.2014 - 31.12.2016

Плановое финансирование проекта: 31.50 млн. руб.

Бюджетные средства 25.00 млн. руб.,

Внебюджетные средства 6.50 млн. руб.

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

Индустриальный партнер: Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С. П. Королева"

Ключевые слова: Эпитаксиальное выращивание, фотоэлектрическое преобразование энергии, КПД, гетероструктуры, технология, лазерное излучение

## 1. Цель проекта

Целью проекта является решение проблемы высокоэффективной передачи энергии по лазерному лучу. Такие фотонные тракты находят широкое применение для создания систем беспроводного получения электроэнергии удаленным приемником. Основной задачей является разработка принципов построения, создание и исследование новых типов высокоэффективных наногетероструктурных фотопреобразователей мощного лазерного излучения в диапазоне длин волн 0.78 – 1.55 мкм для приема и преобразования энергии в системах лучевой энергетики (в том числе для преобразования лазерного излучения, передаваемого по оптоволокну) с целью повышения КПД энергоснабжения наземных и космических объектов.

## 2. Основные результаты проекта

Подготовлен Отчет о ПНИ, касающийся выполнения работ на первом этапе: выбор направления исследований по созданию высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) лазерного излучения. Проведен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, в том числе обзор научных информационных источников: статьи в ведущих зарубежных и российских научных журналах, монографиях - 41 научно-информационный источник за период 2009 – 2013 гг. Проведены патентные исследования.

Получены следующие результаты:

- В ФЭП на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs возможно достижение преобразование лазерного излучения ( $\lambda=809$  нм) с эффективностью ~ 65%. КПД преобразования 70% соответствует идеализированным системам с нулевыми оптическими и омическими потерями и не достижимо на практике.- Для преобразования лазерного излучения с  $\lambda=1064$  нм перспективными являются ФЭП лазерного излучения на основе InGaAsP, в которых возможно достижение КПД 45-55%. - Для эффективного преобразованию лазерного излучения с длиной волны  $\lambda=1064$  нм требуется кристаллизация слоев активной области ФЭП лазерного излучения с запрещенной зоной ~1.1 эВ, согласованных по периоду решетки с подложкой InP. Теоретические оценки показывают, указанные соединения находятся вне контура нестабильности составов, если эпитаксиальный рост проводить при температуре эпитаксии ~ 600 градусов С.

- Разработана технологии создания линз Френеля для концентрирования маломощного лазерного излучения.

- Создана система приёма-передачи энергии лазерного излучения для исследования изготовленных ФЭП и проведены экспериментальные исследования существующих макетов ФЭП лазерного излучения.

Подготовлен Отчет о ПНИ, касающийся выполнения работ на втором этапе: Теоретические исследования по созданию

высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения (ФЭП).

- Проведен расчет полупроводниковых структур и конструкций ФЭП, обеспечивающих эффективное преобразование лазерного излучения с заданной длиной волны.

- Разработаны физико-математические модели для описания процессов преобразования потоков мощного лазерного излучения в ФЭП.

Получены следующие теоретические результаты:

Наиболее перспективными являются ФЭП на основе GaAs для излучения с длиной волны 808-830 нм,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  при доле индия  $x = 0.22 \dots 0.24$  для излучения с длиной волны 1064 нм и  $\text{InGaAs}/\text{InP}$ , а также GaSb для излучения с длиной волны 1550 нм. С учетом особенностей данных типов ФЭП была разработана комплексная математическая модель, ориентированная на структуры из материалов  $\text{A}^3\text{B}^5$ . Разработанная модель включает:

– модель оптического переноса излучения, позволяющая учесть интерференционные эффекты в наноразмерных слоях;

– модель фотовольтаического эффекта в p-n переходе, основанную на решении диффузионно-дрейфовых уравнений;

– трехмерную эквивалентную схему для учета нелинейных омических потерь при протекании латеральных токов.

При разработке модели были проанализированы и учтены эффекты высоких уровней возбуждения, такие как: нелинейность функций безызлучательной, излучательной и Оже-рекомбинации, возникновение поля Дембера и др.

Анализ характеристик ФЭП проводился с использованием разработанной модели в реалистичных внешних условиях.

Учитывались характеристики p-n переходов в ФЭП, а также неравномерность освещенности поверхности ФЭП при облучении лазером. Моделирование производилось для ФЭП размером: 3x3 мм, 7x7 мм, 10x10 мм и 20x20 мм. Рассматривались золотые контактные сетки с линейным и двумерным рисунком. Установлено, что КПД ФЭП определяется резистивными (омическими) потерями в переднем слое и контактной сетке. Потери в переднем слое можно существенно снизить за счет выбора n-p полярности ФЭП и утолщения широкозонного окна. При этом, вследствие отражения излучения от его границ, которое может достигать 2 %, толщина окна должна быть оптически согласована с остальной структурой. С использованием разработанной модели были определены оптимальные значения толщины широкозонного окна в зависимости от структуры, а также выбрано оптимальное просветляющее покрытие, обеспечивающее на рабочих длинах волн отражение менее 0,5 % от структуры.

Показано, что вследствие существующих технологических ограничений при изготовлении контактных сеток, омические потери в них становятся основными для лазерных ФЭП. Это приводит к ограничению по максимальному току для ФЭП и снижению КПД с увеличением размеров ФЭП. Максимальные значения КПД составляют для ФЭП размером 3x3 мм 64, 61 и 50 % для длин волн 809, 1064 и 1550 нм, соответственно. При увеличении размеров ФЭП до 2x2 см эффективность заметно снижается и КПД не превышает 55% для ФЭП на основе GaAs и длины волны 809 нм. Установлено, что достижения высоких значений КПД на ФЭП с большой площадью возможно путем применения контактных сеток на основе Ag, либо, в случае  $\text{InGaAs}/\text{InP}$ , кольцевого переднего контакта при засветке со стороны подложки.

- Разработана постростовая технология создания макетов ФЭП для разрабатываемых гетероструктур. Проведены экспериментальные исследования существующих макетов ФЭП лазерного излучения с  $\lambda=1064$  нм (0.3x0.3 см) с КПД > 35%.

Проведен анализ полученных результатов.

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

На данном этапе отсутствуют

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

Полученные результаты предназначены для создания фотоэлектрических панелей на основе разрабатываемых ФЭП лазерного излучения как для космического, так и для наземного применения.

Для наземного использования систем беспроводной передачи энергии, очевидно, перспективными являются фотопреобразователи лазерного излучения для длин волн 0.78 -0.84 мкм (основе  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  структур) для преобразования лазерного излучения, передаваемого по оптоволокну.

Физико-математические модели для описания процессов преобразования потоков мощного лазерного излучения в ФЭП, полученные на основании расчета полупроводниковых структур и конструкций ФЭП, обеспечивающих эффективное преобразование лазерного излучения с заданной длиной волны, могут быть использованы для получения высокоэффективных ФЭП лазерного излучения, которые необходимы, в частности, как составной элемент системы передачи энергии по лазерному лучу с борта на борт космических спутников, в которых отсутствует возможность применения солнечных батарей для получения электроэнергии.

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

Ожидаемые социально-экономические эффекты от использования товаров и услуг, созданных на основе полученных результатов заключаются в повышении производительности труда, а также снижении материало- и энергоёмкости производства.

### **6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта**

Проектом предусмотрена коммерциализация – заключен Договор от 3 апреля 2014 г. с Индустриальным партнером Открытое акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва» (ОАО "РКК "Энергия") о дальнейшем использовании результатов ПНИ.

В соответствии с Договором к завершению последнего этапа выполнения работ по Плану-графику Исполнитель и Индустриальный партнер Проекта обязуются заключить лицензионный договор на полученные Исполнителем и зарегистрированные РИД согласно статьям 1234 и 1235 Гражданского Кодекса Российской Федерации

## 7. Наличие соисполнителей

Соисполнители отсутствуют

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

Ведущий научный сотрудник

(должность)

(подпись)

Хвостиков В.П.

(фамилия, имя, отчество)

М.П.