

Выполнение этапа 1: «ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ  
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ»

В соответствии с «План-графиком исполнения обязательств» по Соглашению, на этапе 1 научных исследований выполнены следующие работы:

1. Проведен анализ научно-технической литературы и составлен аналитический обзор состояния разработок в области технологии изготовления преобразователей лазерного излучения для различного спектрального диапазона.
2. Проведены патентные исследования в области получения фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения.
3. Определены основные направления работ по получению высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) лазерного излучения (ЛИ) на основе соединений АЗВ5. Показано, что
  - ФЭП ЛИ с  $\lambda=0.809$  мкм и модули на их основе с заданными в Техническом задании характеристиками могут быть изготовлены на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs. При этом возможно два пути решения поставленной задачи: перенос технологии солнечных элементов под задачи проекта и разработка новых структур с p-n-переходом в  $Al_xGa_{1-x}As$  с содержанием алюминия  $x=0.07-0.08$ . Первый вариант позволит решить задачу изготовления высокоэффективных ФЭП ЛИ в наиболее короткие сроки, второй – с более высоким конечным результатом;
  - твердые растворы GaInAsP/InP с содержанием галлия  $x\sim 0.15-0.20$  и мышьяка  $y\sim 0.25-0.40$  находятся вне контура нестабильности и применимы для получения гетероструктур, согласованные по периоду решетки с InP. Фотоэлектрических преобразователей на их основе будут иметь запрещенную зону  $E_g\sim 1.1-1.17$  эВ и могут эффективно использоваться при преобразовании ЛИ с  $\lambda=1.064$  мкм;
  - возможный вариант преобразователя излучения с  $\lambda=1064$  нм – фотоприемник на основе GaInAs/GaAs-гетероструктур с содержанием галлия  $\sim 70-80\%$ ;
  - ФЭП ЛИ на основе GaSb могут преобразовывать монохроматическое излучение с  $\lambda=1.55$  мкм. При этом диффузия цинка из газовой фазы в материал подложки позволяет получать полупроводниковые структуры высокого кристаллического совершенства без дополнительного наращивания буферных слоев или формирования эпитаксиального p-n-перехода.
4. Предложена к использованию комплексная модель расчета спектральных и вольт-амперных характеристик ФЭП ЛИ, позволяющая:
  - при распространении лазерного излучения в полупроводниковой структуре ФЭП учитывать поглощение излучения в объемных и наноразмерных слоях, отражение лазерного излучения от гетерограниц и возникающие при этом интерференционные явления;
  - при оценке механизмов переноса носителей и генерации фототока учитывать уровни легирования фотоактивных слоев, встроенные поля, диффузионный и дрейфовый механизмы протекания тока, включая особенности генерации излучения в непрерывном и квазинепрерывном режиме (импульсном, с высокой частотой повторения);
  - при формировании электрической эквивалентной схемы ФЭП, принимать во внимание особенности ВАХ p-n-перехода ФЭП, вклады различных слоев и контактной сетки в последовательное сопротивление.
5. Определен комплекс измерительных методик для исследования спектральных и вольт-амперных характеристик полупроводниковых фотопреобразователей лазерного излучения. Обоснована целесообразность использования импульсного источника



излучения при измерении ВАХ фотопреобразователей, что позволяет в достаточно широких пределах (вплоть до  $1 \text{ кВт/см}^2$ ) варьировать освещенность и исследовать влияние внутренних омических потерь на коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя при различных уровнях генерируемого фототока.

6. Разработана технология изготовления линз Френеля из силиконовой резины для концентрированного маломощного лазерного излучения в условиях космического пространства. Включение концентраторов в конструкцию фотоэлектрического модуля позволяет уменьшить площадь ФЭП пропорционально кратности концентрирования ЛИ. Обоснован выбор основных конструктивных элементов модуля (защитная прозрачная пластина, концентратор, скоммутированные на теплоотводящем основании фотоэлектрические преобразователи). Показано, что асферические линзы из кварцевого стекла имеют крайне высокую стоимость, нежелательные весовые и габаритные характеристики, поэтому не имеют перспектив применения в космических условиях. Хорошим весовыми, оптическим и стоимостным характеристикам обладают концентраторные панели на основе линз Френеля, выполненные из силиконовой резины. Они могут успешно функционировать в фотоэлектрических модулях, установленных борту космических аппаратов. Толщина профиля Френеля может не превышать 0.5 мм. В зависимости от конфигурации фотоэлектрического модуля общие оптические потери, включающие потери на отражение, поглощение и потери на дефектах концентратора, могут составлять 4-10 %.

7. Для исследования ФЭП создана система приёма-передачи энергии лазерного излучения, состоящая из экспериментальной установки ЭУ-1347, лазерных источников с длинами волн 809 нм, 1064 нм и 532 нм.

8. Проведены испытания существующих макетов ФЭП ЛИ размером не менее 20 мм x 20 мм. По результатам тестирования под Хе-лампой на образцах, изготовленных в ФТИ им.А.Ф.Иоффе (размер 20 мм x 20 мм), при плотности фототока  $\sim 1 \text{ А/см}^2$  достигнута монохроматическая эффективность преобразования свыше 48%. В условиях засветки лазерным излучением с длиной волны  $\lambda=0.809 \text{ мкм}$  получена эффективность преобразования  $\sim 40.4\%$  при плотности фототока  $58 \text{ мА/см}^2$ . Для ФЭП ЛИ, предоставленных НПО «Квант» (размер 40 мм x 40 мм), максимальный КПД составил 42.5 % при плотности фототока  $60 \text{ мА/см}^2$ .

Проведенный комплекс исследований позволяет сделать следующие выводы и рекомендации:

- системы беспроводной передачи энергии (БПЭЭ) востребованы для решения энергетических задач как в наземных условиях, так и в условиях космоса;
- термодинамический максимум для КПД идеализированного фотоэлектрического преобразователя лазерной энергии увеличивается с ростом плотности фототока (вплоть до  $10^4 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$ ), т.е. с увеличением мощности ЛИ, и уменьшается с увеличением длины волны лазерного излучения;
- анализ литературных данных и теоретические оценки показывают, что в ФЭП ЛИ на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs возможно достижение преобразование лазерного излучения ( $\lambda=809 \text{ нм}$ ) с эффективностью  $\sim 65\%$ . КПД преобразования 70 и 80% соответствует идеализированным системам с нулевыми оптическими и омическими потерями и не достижим на практике;
- для преобразования лазерного излучения с  $\lambda=1064 \text{ нм}$  перспективными являются ФЭП ЛИ на основе GaInAsP, в которых возможно достижение КПД  $\sim 45-55\%$ ;
- при значительном увеличении токовой нагрузки на элемент его площадь должна уменьшаться с целью снижения омических потерь;
- как метод ЖФЭ, так и метод МОГФЭ дают возможность получения качественных эпитаксиальных слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  требуемых составов, уровня легирования и толщин, необходимых для формирования фотоэлементной структуры;

- для того чтобы стоимость транспортировки полезных грузов при использовании систем беспроводной передачи энергии была ниже, чем при использовании многоразовых межорбитальных буксиров с ядерной электроракетной двигательной установкой, ее эффективность должна быть не ниже 15-20 %. Существующие макеты единичных ФЭП не обладают эффективностью, достаточной для достижения требуемых значений КПД тракта БПЭЭ. Для повышения КПД приёмника-преобразователя необходимы дальнейшие исследования по нескольким направлениям:

- повышение КПД единичного ФЭП до 60-65%;
- разработка топологии схемы электрической коммутации;

*Полученные на 1 этапе результаты соответствуют техническим требованиям к выполняемому проекту.*

Руководитель проекта  
д.ф.-м.н., в.н.с.

В.П. Хвостиков

