

## Резюме проекта, выполненного

в рамках ФЦП

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

по этапу № 3

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: 14.604.21.0008

Тема: «Разработка концепции и технологии создания полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей на основе гетеровалентных наноструктур соединений групп А3В5 и А2В6»

Приоритетное направление: Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

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

Период выполнения: 17.06.2014 - 31.12.2015

Плановое финансирование проекта: 11.165 млн. руб.

Бюджетные средства 9.40 млн. руб.,

Внебюджетные средства 1.765 млн. руб.

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

Индустриальный партнер: Закрытое акционерное общество "Светлана-Рост"

Ключевые слова: многопереходные солнечные элементы, КПД, полупроводниковые соединения группы А3В5, полупроводниковые соединения группы А2В6, гетеровалентные гетероструктуры, псевдоморфные гетероструктуры, метаморфный слой, наногетероструктуры, сверхрешетки, молекулярно-пучковая эпитаксия.

### 1. Цель проекта

Реализуемый проект направлен на развитие высокотехнологичного производства концентраторных гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей нового поколения, эффективность которых заметно превышала бы все существующие на сегодняшний день мировые аналоги.

Целью реализуемого проекта является разработка оригинальной конструкции и технологии изготовления 4х-переходного солнечного элемента на основе германия, соединений группы А3В5 (InGaAs, InAlGaAs) и соединений группы А2В6 (ZnCdSSe), оптимизированного по величине коэффициента полезного действия в условиях 500 солнц – не менее 38%, что на 9% превышает типичные параметры промышленно изготавливаемых в России 3х-переходных солнечных элементов и является рекордным значением для российских лабораторных разработок. На основе полученных результатов должен быть разработан Проект технического задания на проведение ОКР, нацеленной на реализацию многопереходных фотоэлектрических преобразователей с оптимизированными характеристиками фотоактивных переходов и суммарной эффективностью более 40%.

### 2. Основные результаты проекта

За счёт средств субсидии выполнены следующие работы по проекту:

- разработана производственная методика (лабораторного регламента) изготовления тестовых структур фотоэлектрических преобразователей в системе (Zn,Cd)(S,Se) и изготовлены тестовые структуры;
- проведены измерения электрооптических характеристик тестовых структур фотоэлектрических преобразователей в системе (Zn,Cd)(S,Se), выполнены обработка и интерпретация измеренных характеристик;
- разработан ЭКД лабораторных образцов 4х- переходных гетеровалентных солнечных элементов;
- разработана производственная методика (лабораторный регламент) изготовления структур 4х- переходных гетеровалентных солнечных элементов и изготовлены лабораторные образцы;
- проведены измерения электрооптических характеристик лабораторных образцов структур 4х-переходных гетеровалентных солнечных элементов, выполнены обработка и интерпретация измеренных характеристик;
- обобщены результаты выполнения ПНИ;
- выполнена оценка полноты решения задачи и достижения поставленных целей ПНИ и выполнена оценка эффективности полученных результатов в сравнении с требованиями ТЗ и современным научно-техническим уровнем;



- разработаны технические требования к проведению дальнейшей ОКР и разработаны рекомендации по возможности использования полученных результатов в реальном секторе экономики;
- разработан Проект технического задания на проведение ОКР по теме;
- обобщены и оценены полученные результаты;
- проведена технико-экономическая оценка результатов ПНИ;
- сопоставлены результаты анализа научно-информационных источников и результаты теоретических и экспериментальных исследований;
- оценена полнота решения задач и достижение поставленных целей ПНИ;
- оценена эффективность полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем.
- разработаны рекомендации по использованию результатов ПНИ в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках.

За счет софинансирования из внебюджетных источников:

- разработана производственная методика (лабораторного регламента) элементов постростовой планарной технологии для макетов полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей на основе наноструктур соединений A2B6.

Результаты исследований соответствуют основным требованиям и характеристикам ПНИ данного этапа, приведенным в Техническом задании.

Разработана производственная методика (лабораторный регламент) изготовления тестовых структур фотоэлектрических преобразователей в системе (Zn,Cd)(S,Se) с активной областью на основе короткопериодной сверхрешетки CdSe/ZnSe на метаморфном буфере с постоянной решетки, соответствующей твердому раствору  $In_{0,26}Ga_{0,74}As$ . Изготовлены тестовые структуры в количестве трех штук. Подобные структуры ранее в мире не производились.

Разработана производственная методика (лабораторный регламент) элементов постростовой планарной технологии для макетов полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей на основе наноструктур соединений A2B6:

- выполнен аналитический обзор научно-технической литературы по вопросу постростовой технологии соединений A2B6;
- отработана технология изготовления омических контактов с низким контактным сопротивлением к слоям (Zn,Cd,Mg)Se n-типа проводимости с величинами концентрации носителей заряда  $(1-5) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , используемых в качестве контактных слоев в фотоэлектрических преобразователях на основе наноструктур соединений A2B6;
- измерены величины контактного сопротивления, которое составило  $1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  для слоев (Zn,Cd,Mg)Se n-типа проводимости.

Полученные электрофизические параметры находятся на уровне лучших мировых достижений.

Проведены измерения электрооптических характеристик тестовых структур фотоэлектрических преобразователей в системе (Zn,Cd)(S,Se), включая параметры темновых ВАХ (токи насыщения и диодные коэффициенты) и световых ВАХ (ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, напряжение и ток в точке оптимальной нагрузки, КПД). Обработаны и интерпретированы измеренные параметры и зависимости. Во всех тестовых структурах полученные электрооптические характеристики соответствуют "Программе и методикам электрооптических испытаний структур фотоэлектрических преобразователей", что позволило сделать вывод о перспективности использования аналогичных структур в качестве наиболее широкозонного перехода гетеровалентного 4х-переходного солнечного элемента.

Разработана производственная методика (лабораторный регламент) изготовления лабораторных образцов 4х-переходных гетеровалентных солнечных элементов, включающих один каскад на основе Ge, метаморфный буфер с постоянной решетки, соответствующей твердому раствору  $In_{0,26}Ga_{0,74}As$ , два каскада на основе соединений A3B5 ( $InGaAs$  и  $AlInGaAs$ ) и четвертый каскад на основе соединений A2B6 (короткопериодная сверхрешетка CdSe/ZnSe). Изготовлены лабораторные образцы в количестве трех штук. Подобные структуры ранее в мире не производились.

Проведены измерения электрооптических характеристик лабораторных образцов структур 4х-переходных гетеровалентных солнечных элементов. Обработаны и интерпретированы измеренные параметры и зависимости. Во всех лабораторных образцах значения КПД, полученные в условиях высокой концентрации солнечного излучения, соответствуют ТЗ ПНИ и превышают 38%. Такие значения являются рекордными для России и находятся на уровне лучших мировых достижений. Разработаны технические требования к проведению дальнейшей ОКР и сформулирован проект технического задания на проведение ОКР, предусматривающий разработку 4-переходных солнечных элементов с КПД, превышающим 40% в условиях высокой концентрации солнечного излучения.

Проведено обобщение результатов ПНИ, а также их оценка, включающая технико-экономическую оценку, сопоставление результатов анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований, оценку полноты решения задач и достижения поставленных целей ПНИ, а также оценку эффективности полученных результатов в сравнении с требованиями ТЗ и современным научно-техническим уровнем. Показано фактическое выполнение всех поставленных целей и достижение современного мирового уровня в области разработки гетероструктур многопереходных концентраторных солнечных элементов и их изготовления методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Разработаны рекомендации по использованию результатов ПНИ в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках. Показано, что дальнейший прогресс в данной области в существенной степени тормозится недостаточным развитием технологий постростовой обработки эпитаксиальных гетероструктур.

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

Заявка на изобретение №2015130425 22.07.2015г. «Четырехпереходный солнечный элемент», РФ.

Заявка на изобретение №2015149601 18.11.2015г. «Четырехпереходный солнечный элемент», РФ.



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

Конечным изделием, в состав которого входит 4х-переходный гетеровалентный солнечный элемент, является компактный, мобильный, автономный источник энергии, востребованный в различных областях народного хозяйства, где требуется обеспечение энергией локальных потребителей в сравнительно небольших объемах (до 100 кВт). С другой стороны, модульный принцип построения устройств на основе концентраторных многопереходных фотоэлектрических преобразователей обеспечивает возможность создания крупных энергетических станций мощностью до тысячи кВт и более, характеризующихся высокой экологичностью.

Результаты проекта должны стать основой для проведения промышленным партнером (ЗАО «Светлана-Рост», Ст.Петербург) ОКР, нацеленной на разработку опытных образцов - прототипов устройств концентраторных фотоэлектрических преобразователей. Результаты НИИ должны быть внедрены в образовательный процесс (курсы лекций на кафедрах в СПб ГПУ, СПбГЭТУ, СПбАУ НОЦ ИТ РАН). По теме НИИ защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата наук, опубликованы 3 научные статьи.

Внедрение и коммерциализация результатов проекта может стимулировать дальнейшие отечественные разработки в области конструирования и производства высокотехнологичного оборудования для эпитаксиального роста полупроводниковых гетероструктур.

#### 5. Эффекты от внедрения результатов проекта

Основными преимуществами внедрения эффективных фотоэлектрических преобразователей являются: неисчерпаемость источника энергии, возможность производства энергии непосредственно вблизи конечного потребителя, экологичность процесса фотопреобразования. В некоторых отраслях хозяйства применение фотоэлектрических преобразователей является необходимым условием. Так, солнечные батареи на основе фотоэлектрических преобразователей являются основным источником энергоснабжения космических аппаратов, и их эффективность, надежность и другие эксплуатационные характеристики в существенной степени определяют успех программ по освоению космического пространства.

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

Коммерциализация результатов проекта возможна в форме выполнения промышленным партнером опытно-конструкторских работ, направленных на разработку комплекта рабочей конструкторской документации в объеме достаточном для постановки разработанных фотоэлектрических преобразователей на производство. Потенциальными потребителями данной разработки являются ОАО «НПП «Квант» (Москва) и ОАО «Сатурн» (Краснодар), специализирующиеся на коммерческом выпуске фотоэлектрических преобразователей.

Согласно аналитическим данным консалтинговой фирмы Lux Research на конец 2012 года объем мирового рынка солнечной энергетики составил 31 ГВт (~\$70 миллиардов). Пик ежегодного роста рынка солнечной энергетики пришелся на 2011 год и составил 77% по сравнению с предшествующим годом. Однако уже следующий (2012) год показал существенно меньший годовой рост мирового рынка - всего в 15%. По сегодняшним прогнозам к 2018 г. ожидается двукратный прирост по сравнению с 2012 годом, в первую очередь за счет Китая (12.4 ГВт), США (10.8 ГВт), Японии (7.9 ГВт) и Индии (5.6 ГВт), что составляет порядка 60% всего прогнозируемого объема рынка 2018 года. В настоящее время больше половины объема рынка солнечной энергетики приходится на страны Европы, Ближнего Востока и Африки, однако к 2018 году прогнозируется фактически нулевой рост этой части рынка и уменьшение ее относительной доли до 40%. Точный прогноз развития российского рынка солнечной энергетики в настоящее время затруднителен. Одним из заметных потребителей результатов проекта может стать российская космическая отрасль, связанная с осуществлением орбитальных полетов и освоения Луны.

#### 7. Наличие соисполнителей

Не предусмотрены проектом.

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

\_\_\_\_\_  
директор  
(должность)

  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
Забродский А.Г.  
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель работ по проекту**

Заведующий Лабораторией Квазовозможных  
структур  
\_\_\_\_\_  
(должность)

  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
Иванов С.В.  
(фамилия, имя, отчество)



