

## **Выводы, перечень публикаций и исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности**

**(Выдержка из отчета о выполнении проекта № 14-29-00178 «Разработки наногетероструктурных солнечных элементов и устройств фотовольтаики нового поколения», в 2016 году)**

### **Описание выполненных работ полученных научных результатов (в том числе степень выполнения проекта) для публикации на сайте РНФ на русском языке**

За время выполнения проекта были разработаны технологические приемы изготовления методом МОС-гидридной эпитаксии полупроводниковых структур на GaAs и Ge подложках для многопереходных и однопереходных ФЭП на основе GaInP и GaInAs слоев различного состава и уровней легирования. Изготовлены экспериментальные образцы ФЭП для создания высокоэффективных концентраторных модулей. Трехпереходные GaInP/GaInAs/Ge гетроструктуры для ФЭП согласованные по параметру решетки (псевдоморфные структуры) и имеющие n-p электрическую полярность выращивались в едином эпитаксиальном процессе.

В ходе выполнения работ по проекту технология роста псевдоморфных солнечных фотопреобразователей была усовершенствована. Было максимально сокращено время роста гетроструктуры. В результате было зафиксировано снижение уровня взаимного автолегирования слоев и достигнуто увеличение производительности (а, следовательно, и Проект № 14-29-00178/2016 Страница 55 из 64 рентабельности) установки. Одним из факторов, для реализации усовершенствованной технологии стала разработанная методика выделения вольт-амперной зависимости, характеризующей дополнительные потери на гетероинтерфейсе. Для анализа электрических потерь были применены теоретические подходы, с использованием оригинальной разработанной модели и показано, что в трансмиссионной части многопереходных солнечных элементов существуют дополнительные потери, связанные с барьерами на изотипных гетероинтерфейсах. Это позволило повысить эффективность ФЭП за счет увеличения фотогенерированного тока среднего GaInAs субэлемента (тока короткого замыкания КСЭ), используя в «верхнем» туннельном диоде широкозонную гетеропару n+-GaInP/AlGaAs.

С помощью оригинальной математической модели рассчитаны двухсекционные БО с более широким (по сравнению с имеющимися аналогами) спектром отражения в составе GaInAs субэлемента, что позволяет уменьшить толщину материала и снизить количество возникающих при эксплуатации радиационных дефектов. Получены солнечные элементы для спектра AM0 с увеличенным до 10-25 лет ресурсом работы.

Были исследованы процессы нуклеации квантовых точек InAs на подложках GaAs различной ориентации методом МОС-гидридной эпитаксии. Показано, что использование разориентированных подложек ведет к получению образцов с высокой плотностью квантовых точек, необходимой для создания солнечных элементов.

Получены солнечные элементы содержащие слои InAs квантовых точек. Достигнуто увеличение плотности тока GaAs солнечного элемента до 0.07 мА/см<sup>2</sup> в пересчете на один слой квантовых точек, что является рекордным значением для подобных структур.

С помощью комплексных фотолюминесцентных исследований проведена оптимизация ростовых параметров КТ (температура осаждения материала InAs, скорость роста InAs, толщина и скорость роста покрывающего слоя) для получения бездефектных многослойных массивов. Исследованы физические параметры полученных массивов КТ при помощи просвечивающей электронной микроскопии. С помощью теоретического анализа показана возможность дальнейшего совершенствования КТ-среды для увеличения фотогенерированного тока среднего субэлемента.

Получены гетероструктуры метаморфных GaInAs фотопреобразователей (ФП) на подложках GaAs с длинноволновым краем fotocувствительности вплоть до 1300 нм и уровнем квантового выхода фотоответа в диапазоне 1050 – 1100 нм до 83%. Показана применимость полученной технологии как для использования в приборах по преобразованию лазерного излучения, так и для создания среднего либо нижнего субэлемента в многопереходном фотопреобразователе нового поколения.

Проведены работы по исследованию влияния сурфактантов (изовалентных примесей) на свойства приборов получаемых диффузионными методами. Показано, что предварительная обработка подложек GaAs в парах In и P приводит к изменению скорости диффузии легирующей примеси и к улучшению транспортных свойств эмиттера. Обнаружен эффект кластерирования атомов индия на поверхности обрабатываемой подложки и показано, что данный эффект сопровождается появлением свободного электронного газа на поверхности и усилением сигнала Рамановского рассеяния, вызванного появлением локальных электрических полей. Показана возможность упрощения контактной структуры при использовании данной обработки.

Разработан способ и создана установка для исследования процессов переизлучения в многопереходных СЭ и измерения результативности люминесцентной связи. Измерена результативность люминесцентной связи в трехпереходном солнечном элементе и определена предельная результативность для пар его субэлементов. Выявлен диагностический потенциал люминесцентной связи для определения времен жизни неосновных носителей заряда в излучающих p-n переходах.

Определены возможности люминесцентной связи для решения задачи повышения КПД многопереходных солнечных элементов. Разработана математическая модель переноса рекомбинационного излучения в многослойных гетероструктурах для расчета Проект № 14-29-00178/2016 Страница 56 из 64 фотолюминесцентной связи.

Проведены исследования образцов ФЭП при низких температурах. Показано, что при использовании концентрированного солнечного излучения с одновременным эффективным охлаждением образцов МП ФЭП возможно достижение КПД порядка 38-40% даже в условиях преобразования космического солнечного излучения.

Разработан комплекс методик, который позволил выявить специфическое поведение температурных зависимостей основных фотоэлектрических характеристик и параметров МП СЭ и обозначить проблемные вопросы транспорта носителей в многослойных гетероструктурах.

Разработаны и изготовлены преобразователи бета-излучения на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, полученных эпитаксией из жидкой фазы. Проведено тестирование полученных структур с использованием тритий-содержащих источников мягкого ионизирующего излучения.

Разработана методика температурных измерений элементов систем преобразования солнечного излучения. Предложена и реализована схема лабораторной установки для определения температуры фотоэлектрических преобразователей, работающих в разных режимах. Были определены величины перегрева солнечных элементов относительно окружающего воздуха

Предложена и реализована схема лабораторной установки для оценки эффективности передачи остаточного тепла из концентраторного модуля водяному теплоносителю. Это было реализовано путем физического моделирования тепловыделения в фотопреобразователях и измерения перепада температур на входе и выходе системы охлаждения модуля.

Разработан лабораторный измерительный комплекс для тестирования единичных концентраторных фотоэлектрических модулей. Он состоит из линзового концентратора солнечного излучения, полупроводникового фотопреобразователя и основания для последнего, которое в условиях реальной эксплуатации служит для отвода остаточного тепла. Комплекс предназначен для обеспечения условий засветки, максимально приближенных к реальным (за исключением тепловых эффектов). Также комплекс предназначен для прецизионного варьирования взаимного пространственного расположения элементов модуля. Это помогает находить оптимальные геометрические параметры модуля.

Разработана методика расчета преломляющего профиля концентраторов, учитывающая дисперсионную зависимость показателя преломления и её изменение от температуры для материала преломляющего профиля концентратора – силиконового компаунда Wacker RT604. Результаты расчета позволяют добиться максимальной эффективности пары «концентратор-фотопреобразователь» при наличии хроматических аберраций в оптической системе концентрирования солнечного излучения.

Разработана конструкция концентраторных модулей с размером линз 30x30 мм<sup>2</sup>. Размер линз позволил добиться снижения оптических потерь в первичной оптике и электрических потерь в фотопреобразователях, вызванных перегревом последних.

Проведены сравнительные экспериментальные исследования аэродинамических процессов обтекания воздушными потоками концентраторных фотоэлектрических модулей для плоской и ступенчатой схем расположения. Исследования показали существенное преимущество ступенчатого варианта расположения модулей в отношении уменьшения ветровых нагрузок на платформу. Получены значения коэффициентов сопротивления для разных схем расположения модулей на платформе. Рассчитаны значения сил, действующих на реальные платформы.

#### **Перечень публикаций по проекту за весь срок выполнения проекта**

1. Богомолова С.А., Лукашов Ю.Е., Шварц М.З. (Bogomolova S.A., Lukashov Yu.E., Shvarts M.Z.) «Анализ достоверности измерительного контроля энергопроизводительности фотоэлектрических модулей» Измерительная техника / Measurement Technique (перевод) (2014 г.)
2. Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Хвостикова О.А. (Khvostikov V.P., Sorokina S.V., Khvostikova O.A.) «Фотоэлектрическое преобразование лазерного излучения в диапазоне длин волн  $\lambda=810-830$  нм» Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) научный вестник (2014 г.)

3. Soldatenkov F.Yu., Kozlov V.A., Kudoyarov M.F. (Солдатенков Ф.Ю., Козлов В.А., Кудояров М.Ф.) Применение протонного облучения для точной коррекции динамических характеристик сверхбыстродействующих высокочастотных силовых GaAs-A3B5 p-i-n диодов Труды Проект № 14-29-00178/2016 Страница 59 из 64 Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 1-4.06.2015, Санкт- Петербург (2015 г.)
4. Карлина Л.Б., Власов А.С., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю. (Karlina L.B., Vlasov A.S., Ber B.Y., Kazantsev D.Y.) Diffusion of zinc in galliumarsenide with the participation isovalent impurities Journal of Crystal Growth (2015 г.)
5. Кожуховская С.А., Филимонов Е.Д., Шварц М.З. (Kozhukhovskaia S.A., Filimonov E.D., Shvarts M.Z.) «Experimental model of multi-junction solar cell: IVcurve tailoring and photoresponce artifact simulating» Journal of Physics: Conference Series (2015 г.)
6. Контрош Е.В., Малевская А.В., Лебедева Н.М., Гребенщикова Е.А., Контрош Л.В., Ильинская Н.Д., Калиновский В.С. (Kontrosh E.V., Malevskaya A.V., Lebedeva N.M., Grebenschikova E.A., Kontrosh L.V., Il'inskaya N.D., Kalinovskiy V.S.) Исследование фотоэлектрических характеристик многопереходных солнечных элементов, изготовленных одностадийным и двустадийным методом разделительного травления Альтернативная энергетика и экология (2015 г.)
7. Минтаиров М.А., Евстропов В.В., Калюзный Н.А., Минтаиров С.А., Тимошина Н.Х., Шварц М.З. (Mintairov M.A., Evstropov V.V., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Timoshina N.Kh., Shvarts M.Z.) Heterointerfaces in MJ SC: IVCurves and their Peculiarities Proceedings of the 11th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-11), 13-15 April 2015, Aix-les-Bains, France, AIP Conf. Proceedings (2015 г.)
8. Минтаиров М.А., Евстропов В.В., Минтаиров С.А., Шварц М.З., Тимошина Н.Х., Калюзный Н.А. (Mintairov M.A., Evstropov V.V., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Timoshina N.K., Kalyuzhnyy N.A.) «Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов» Физика и техника полупроводников / Semiconductors (перевод) (2015 г.)
9. Румянцев В.Д., Ларионов В.Р., Покровский П.В. (Rumyantsev V.D., Larionov V.R., Pokrovskiy P.V.) "Direct" Measurement of Sheet Resistance in Inter-Subcell Layers of Multi-Junction Solar Cells Proceedings of the 11th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-11), 13-15 April 2015, Aix-les-Bains, France, AIP Conf. Proceedings (2015 г.)
10. Солдатенков Ф.Ю., Козлов В.А., Шульпина И.Л., Ивановский В.И. (Soldatenkov F.Yu., Kozlov V.A., Shulpina I.L., Ivanovskiy V.I.) GaAs-A3B5 heterostructures for high-speed power diodes manufacturing Journal of Physics: Conference Series (2015 г.)
11. Хвостиков В.П., Сорокина С.А., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Шварц М.З., Тимошина Н.Х., Андреев В.М. (Khvostikov V.P., Sorokina S.A., Potapovich N.S., Khvostikova O.A., Shvarts M.Z., Timoshina N.K., Andreev V.M.) AlGaAs Converters and Arrays For Laser Power Beaming Proceedings of the 11th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-11), 13-15 April 2015, Aix-les-Bains, France, AIP Conf. Proceedings (2015 г.)
12. Чумаков Ю.С., Румянцев В.Д., Ащеулов Ю.В., Чекалин А.В. (Chumakov Yu.S., Rumyantsev V.D., Ashcheulov Yu.V., Chekalin A.V.) Сравнительный анализ ветровых нагрузок на плоскую и

ступенчатую конструкции трекеров солнечных энергоустановок Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки (2015 г.)

13. Шварц М.З., Богомолова С. А. (Shvarts M.Z., Bogomolova S.A.) «Оценка неопределенности при измерении вольтамперных характеристик фотоэлектрических модулей» Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) научный вестник (2015 г.)

14. Богомолова С.А., Лукашов Ю.Е., Шварц М.З. (Bogomolova S.A., Lukashov Yu.E., Shvarts M.Z.) «Методика настройки и калибровки имитатора солнечного излучения при измерении многопереходных тонкопленочных фотоэлектрических модулей» Измерительная техника/ Measurement Techniques (перевод) (2016 г.)

15. Емельянов В.М., Филимонов Е.Д., Кожуховская С.А., Минтаиров М.А., Шварц М.З. (Emelyanov V. M., Filimonov E. D., Kozhukhovskaia S. A., Mintairov M. A., Shvarts M. Z.) «Simulation of the Photoluminescent Coupling Transfer Function in Multijunction Nanoheterostructure Solar Cells» AIP Conference Proceedings (2016 г.) Проект № 14-29-00178/2016 Страница 60 из 64

16. Лебедева Н.М., Козлов В.А., Солдатенков Ф.Ю., Усикова А.А. (Lebedeva N.M., Kozlov V.A., Soldatenkov F.Yu., Usikova A.A.) «Effect of awideband heteroepitaxial emitter on dynamics ofturn-off switching of high-voltage power GaAs p-i-n diodes» Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)

17. Маричев А.Е., Пушный Б.В., Левин Р.В. (Marichev A.E., Pushnyi B.V., Levin R.V.) «Investigation of spinodal decomposition of InGaAsP solid solutions grown bythe MOCVD technique» Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)

18. Минтаиров М.А., Евстропов В.В., Шварц М.З., Минтаиров С.А., Салий Р.А., Калюжный Н.А. (Mintairov M. A., Evstropov V. V., Shvarts M. Z., Mintairov S. A., Salii R.A., Kalyuzhnyy N. A.) "Current flowmechanism in GaAs solar cellswith GaInAs quantumdots" AIP Conference Proceedings (2016 г.)

19. Минтаиров С.А., Емельянов В.М., Рыбальченко Д.В., Салий Р.А., Тимошина Н.Х., Шварц М.З., Калюжный Н.А. (Mintairov S.A., Emelyanov V.M., Rybalchenko D.V., Salii R.A., Timoshina N.K., Shvarts M.Z., Kalyuzhnyy N.A.) Heterostructures of metamorphicGaInAs photo-converters grown byMOCVD on GaAs substrates. Физика и техника полупроводников/ Semiconductors (перевод) (2016 г.)

20. Шварц М.З., Емельянов В.М., Евстропов В.В., Минтаиров М.А., Филимонов Е.Д., Кожуховская С.А. (Shvarts M.Z., Emelyanov V.M., Evstropov V.V., Mintairov M.A., Filimonov E.D., Kozhukhovskaia S.A.) "Overcoming the Luminescent Coupling Effect in Experimental Search for the Actual QuantumEfficiencyValues in Multi-Junction Solar Cells" AIP Conf. Proceedings (2016 г.)

21. Власов А.С. , Карлина Л.Б., Комисаренко Ф.Э., Анкудинов А.В. (Vlasov A.S., Karlina L.B., Komissarenko Ph.E., Ankudinov A.V.) Модификация поверхности GaAs и наблюдение эффекта гигантского рамановского рассеяния после диффузии индия Физика и техника полупроводников/ Semiconductors (перевод) (2017 г.)

22. Кожуховская С.А., Филимонов Е.Д., Шварц М.З. (Kozhukhovskaia S.A., Filimonov E.D., Shvarts M.Z.) "Optical leakage vs. luminescent coupling in MJ SC: howto recognize a source of additional photocurrent" Journal of Physics: Conference Series (2017 г.)

23. Мусалинов С.Б., Анзулевич А.П., Бычков И.В., Гудовских А.С., Шварц М.З. (Musalinov S.B., Anzulevich A.P., Vyckov I.V., Gudovskikh A.S., Shvarts M.Z.) «Влияние двух- и трехслойных

просветляющих покрытий на формирование фототоков в многопереходных солнечных элементах на основе AlInBV» Физика и техника полупроводников/ Semiconductors (перевод) (2017 г.)

24. Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Тимошина Н.Х. (Khvostikov V.P., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Khvostikova O.A., Timoshina N.H.) «Фотоэлектрический приемник лазерного ( $\lambda = 809$  нм) излучения на основе GaAs» Физика и техника полупроводников/ Semiconductors (перевод) (2017 г.)

**Исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта**

1. Авторы РИД: В.М.Андреев, В.Д.Румянцев, Ю.В.Ащеулов, П.В.Покровский, А.В.Чекалин Вид РИД: Заявка на патент № 2014149586 Название РИД: «Система позиционирования и слежения за солнцем концентраторной фотоэнергоустановки» Дата приоритета / Реквизиты документа об охране исключительных прав (при наличии): 2014-12- 10 / 2014149585

2. Авторы РИД: В.М.Андреев, В.П.Хвостиков, С.В.Сорокина, О.А.Хвостикова, Н.С.Потапович Проект № 14-29-00178/2016 Страница 61 из 64 Вид РИД: изобретение Название РИД: «Способ изготовления фотопреобразователя на основе GaSb» Дата приоритета / Реквизиты документа об охране исключительных прав (при наличии): 2014-11- 18 / 074657

3. Авторы РИД: Ф.Ю.Солдатенков, А.А.Усикова, В.М.Андреев Вид РИД: Заявка на патент № 2014149585 Название РИД: «Способ формирования многослойного омического контакта к приборам на основе арсенида галлия» Дата приоритета / Реквизиты документа об охране исключительных прав (при наличии): 2014-12- 10 / 079705

4. Авторы РИД: В.М.Андреев, В.Д.Румянцев, Ю.В.Ащеулов, П.В.Покровский, А.В.Чекалин Вид РИД: изобретение Название РИД: Система позиционирования и слежения за солнцем концентраторной фотоэнергоустановки Дата приоритета / Реквизиты документа об охране исключительных прав (при наличии): 2014-12- 10 / 2014149586

5. Авторы РИД: В.М.Андреев, Н.Ю.Давидюк, В.Д.Румянцев, Н.А.Садчиков Вид РИД: Заявка на патент № 2014149587 Название РИД: «Концентраторный солнечный фотоэлектрический модуль» Дата приоритета / Реквизиты документа об охране исключительных прав (при наличии): 2014-12- 10 / 079707

6. Авторы РИД: В.М.Андреев, Н.Ю.Давидюк, В.Д.Румянцев, Н.А.Садчиков Вид РИД: изобретение Название РИД: Концентраторный солнечный фотоэлектрический модуль Дата приоритета / Реквизиты документа об охране исключительных прав (при наличии): 2014-12- 10 / 2014149587