



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ
научной работе
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
Иванов М.Ю.
1" декабря 2015 г.

О Т З Ы В

ведущей организации Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина) на диссертационную работу **Минтаирова Сергея Александровича** на тему: «Многoperеходные гетероструктурные фотопреобразователи на основе материалов A^3B^5 и германия, полученные методом МОС – гидридной эпитаксии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Актуальность работы

Полупроводниковая многокаскадная фотовольтаика сегодня является одним из важных направлений научных исследований в области альтернативной энергетики, благодаря высокой эффективности преобразования солнечной энергии в полупроводниковых фотоэлектрических преобразователях (ФЭП), их экологичности и долговечности. Среди ФЭП выделяется класс

многопереходных солнечных элементов, представляющих собой монокристаллические эпитаксиальные структуры на основе комбинации соединений A^3B^5 с различной шириной запрещенной зоны и германия. Данный класс ФЭП обладает высокими значениями КПД. В частности, на трехпереходных солнечных элементах на базе структуры с тремя фотовольтаическими переходами в материалах GaInP, GaInAs и Ge (GaInP/GaInAs/Ge) достигнуты значения КПД более 40 % при преобразовании концентрированного наземного солнечного излучения и более 30 % при преобразовании прямого космического. На данный момент наземные фотоэнергетические установки на основе фотоэлектрических модулей с оптическими концентраторами позволяют повысить концентрацию излучения до нескольких тысяч крат, и при увеличении объема производства многопереходных солнечных элементов, позволят понизить стоимость Ватта энергии до стоимости близкой к конкурирующим технологиям. Кроме того, в космосе, где определяющую роль играют массогабаритные характеристики фотоэлектрических модулей, альтернативы многопереходным ФЭП в ближайшем будущем практически не существует. Поэтому исследования и, главное, разработка технологии создания высокоэффективных структур многопереходных солнечных элементов является актуальной научной и практической задачей для России, где космический комплекс требует перехода на современные конкурентоспособные источники питания отечественной разработки.

Многопереходные солнечные элементы имеют чрезвычайно сложную гетероструктуру, состоящую из нескольких десятков эпитаксиальных слоев. При этом параметры каждого слоя существенно влияют на характеристики прибора, поэтому при разработке технологии создания структур требуется уделять внимание оптимизации характеристик каждого из них.

Диссертационная работа Минтаирова С.А., включающая как разработку научных основ МОС-гидридной технологии эпитаксиального выращивания GaInP/GaInAs/Ge структур многопереходных солнечных элементов (космического и наземного назначения), так и исследования, направленные на

совершенствование их конструкции, является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Новизна исследований и полученных результатов

Как показал анализ диссертационной работы Минтаирова С.А., наибольшую значимость и научную новизну имеют следующие результаты.

1. Показано, что для GaInP/GaInAs/Ge каскадных солнечных элементов собирание фотогенерированных носителей, превышающее 95%, достигается при трехкратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя эмиттера, а для слоев базы достаточно двукратного превышения. В случае полубесконечного базового слоя в подложке Ge близкое к полному собирание достигается при диффузионной длине неосновных носителей более 100 мкм.

2. Показано, что для переходов на основе Ge и GaInP *p-n* полярности возникают структурные и технологические ограничения, которые осложняют их использование в многопереходных ФЭП, при этом для структур *n-p* полярности такие ограничения отсутствуют, что обуславливает перспективность применения многопереходных ФЭП *n-p* полярности.

3. Показано, что гетероструктуры GaAs каскадов ФЭП *p-n* полярности, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии с использованием атомов кремния и цинка в качестве донорной и акцепторной примеси, соответственно, позволяют достичь на 2% больших значений КПД по сравнению с GaAs каскадами *n-p* полярности. Однако ввиду описанных выше ограничений со стороны GaInP и Ge каскадов в структуре трехпереходных ФЭП необходимо использовать менее эффективные GaAs каскады *n-p* полярности.

4. Показано что использование в каскадных ФЭП функциональных широкозонных слоев $p-(Al_xGa_{1-x})_{0,52}In_{0,48}P$ не приводит к возникновению потенциального барьера, препятствующего транспорту основных носителей, при $x \leq 25\%$.

5. Обнаружена встречная фотоЭДС, возникающая при разделении носителей, туннельным диодом, определены пути нивелирования этого нежелательного эффекта.

6. Показано, что использование эмиттерных слоев n-AlInP, n-GaInP или n-AlGaAs для перехода на основе GaInAs потенциально позволяет уменьшить рекомбинационные потери и повысить КПД GaInAs каскада в случае, когда время жизни неосновных носителей в базовом слое p-GaInAs составляет более 10 нс.

Рекомендации по использованию результатов работы. Результаты работы могут быть использованы при синтезе методом МОС-гидридной эпитаксии полупроводниковых приборов в ОАО «Сатурн» (г. Краснодар), ОАО «Светлана», ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), ФГУП НИИ «Полюс» (г. Москва), ОАО «НПП «Квант» (г. Москва).

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов, базировавшихся на применении различных методов теоретического моделирования, и сопоставлении их с экспериментальными данными, не вызывает сомнений и подтверждается их апробацией в научных статьях и докладах на конференциях.

Научная и практическая значимость результатов

Работа является законченным научным исследованием и выполнена автором самостоятельно на достаточно высоком уровне. Проведённые исследования можно характеризовать как обоснованные научно-технические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач в области создания каскадных ФЭП как космического, так и наземного применения. При этом продемонстрированы КПД сравнимые с лучшими мировыми аналогами.

Практическое значение проведенных исследований подтверждено внедрением разработанных технологий в ОАО «Сатурн» (г. Краснодар).

По теме диссертации имеется 19 печатных работ в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 1 глава в монографии, 12 патентов РФ, 30 трудов конференций и тезисов докладов.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация изложена доходчивым языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, содержит достаточное

число иллюстраций и таблиц, текст регулярно сопровождается ссылками на публикации.

Однако по диссертационной работе **можно сделать следующие замечания**, касающиеся полноты и четкости изложения материала по отдельным вопросам.

- Научные положения, выносимые на защиту, сформулированы не совсем удачно: слишком длинные, содержат избыточную информацию, что затрудняет восприятие основной идеи;

- В работе исследовались монокристаллические структуры многопереходных солнечных элементов, полностью согласованных по параметру подложки. Однако в таких структурах наблюдается дисбаланс токов – фотогенерированный ток в Ge субэlementе заметно превышает ток широкозонных субэлементов. Было бы полезно указать пути использования избыточного тока Ge субэlementа для увеличения эффективности многопереходного фотопреобразователя;

- В тексте диссертации и автореферата работе не указано учитывалась ли рекомбинация носителей на гетерограницах фотоактивных слоев при расчете коэффициентов сбора носителей;

- Кроме того, текст автореферата и диссертации не свободны от опечаток, а так же орфографических и синтаксических ошибок.

Однако перечисленные замечания не снижают новизну и качество проведенной работы, а диссертационная работа Минтаирова С.А. в целом оставляет благоприятное впечатление.

Таким образом, диссертация Минтаирова С.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важных прикладных задач в области разработки высокоэффективных фотопреобразователей. Диссертация соответствует требованиям П.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением

Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 30.07.2014), а её автор, Минтаиров Сергей Александрович, достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Автореферат диссертации и публикации соискателя достаточно полно и правильно отражают основное содержание работы.

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании кафедры квантовой электроники и оптико-электронных приборов Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И.Ульянова (Ленина) 25 ноября 2015 года, протокол № 8.

Заведующий кафедрой КЭОП
доктор технических наук,
профессор

> В. П. Афанасьев

Профессор кафедры КЭОП,
доктор технических наук,
профессор

А.М. Василевский

197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
тел: 8(812)234 31 60; e-mail: vrafanasiev@mail.ru.