

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Минтаирова Сергея Александровича «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 темы

Многoperеходные фотопреобразователи на основе полупроводников A^3B^5 с различной шириной запрещенной зоны и Ge на сегодняшний день начинают все шире использоваться как в космических, так наземных солнечных батареях. Для космических применений такие фотопреобразователи являются незаменимыми вследствие значительного улучшения массогабаритных параметров фотоэнергетических модулей космических летательных аппаратов. Для наземных применений их конкурентоспособность повышается при использовании в установках на основе фотоэлектрических модулей с оптическими концентраторами излучения.

Гетероструктура многoperеходных (каскадных) солнечных элементов содержит несколько десятков различных наноразмерных и объемных эпитаксиальных слоев. Разработка технологии выращивания требует оптимизации параметров практически каждого составляющего ее слоя. Ввиду острой практической значимости данной тематики многие исследования, проводящиеся данной области зарубежными специалистами, даются в публикациях в сжатом виде или являются предметом «ноу-хау».

Фотоэлектрические характеристики, в том числе эффективность преобразования солнечной энергии, каждого субэлемента, составляющего многoperеходный солнечный элемент, напрямую связаны с характеристиками всего многoperеходного фотопреобразователя. Поэтому вопросы оптимизации параметров и достижения высоких значений эффективности многoperеходных фотопреобразователей связаны с тщательным исследованием и выявлением скрытых параметров каждого отдельного субэлемента.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что работа Минтаирова С.А., включающая как разработку научных основ МОС – гидридной технологии эпитаксиального выращивания GaInP/GaInAs/Ge структур многoperеходных солнечных элементов (космического и наземного назначения), так и описание путей снижения различного вида потерь является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Структура диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения и списка цитированной литературы. Объем работы составляет 173 страницы, включая 75 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 130 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору каскадных ФЭП различного назначения и МОС-гидридной технологии для выращивания их структур. Показано, что в настоящее время основной интерес представляет структура GaInP/GaInAs/Ge, выращиваемая методом МОС-гидридной эпитаксии, которая позволяет осуществлять преобразование солнечной энергии с высокой эффективностью.

Главы 2 — 4 посвящены изложению оригинальных результатов, полученных в диссертационной работе.

Вторая глава описывает результаты теоретических и экспериментальных исследований однопереходных солнечных элементов на основе Ge, GaAs и GaInP. Установлены зависимости диффузионных длин неосновных носителей заряда в слоях *p*-Ge, *p*-GaAs и *n*-GaAs от уровня легирования посредством аппроксимации спектральных характеристик соответствующих однопереходных фотопреобразователей. Проведены расчеты коэффициентов собирания носителей из эмиттерных и базовых слоев субэлементов GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов и сделаны выводы о требованиях в дизайну структуры таких преобразователей с точки зрения обеспечения близкого к полному собирания фотогенерированных носителей. Экспериментально и теоретически показано, что при создании GaInP солнечных элементов *p-n* полярности возникает потенциальный барьер, проявляющийся в наличии перегибов на ВАХ и в падении КПД, в то время как для структуры *n-p* полярности барьер для основных носителей (электронов), проходящих через слой широкозонного окна, не ограничивает их транспорт.

Третья глава посвящена оптимизации структуры каскадного солнечного элемента на основе GaInP/GaInAs/Ge с точки зрения минимизации оптических и электрических потерь. Проведены расчеты спектральных характеристик и коэффициентов вхождения света в субэлементы многопереходной гетероструктуры. Определены параметры структуры, обеспечивающие повышение фототоков, генерируемых всеми субэлементами структуры. Обнаружено наличие встречного фото-ЭДС, возникающего в верхнем туннельном диоде. Проведена оптимизация многопереходной гетероструктуры, позволившая повысить КПД за счет значительного снижения встречной фото-ЭДС. Обнаружен потенциальный барьер для носителей

заряда, приводящий к снижению КПД, наличие которого связано с использованием широкозонного барьерного слоя в нижнем туннельном диоде. В результате экспериментального исследования и моделирования найдена конструкция туннельного диода, обеспечивающая эффективный транспорт носителей через нижний туннельный диод.

Четвертая глава рассматривает фотоэлектрические параметры созданных фотопреобразователей, как однопереходных, так и многопереходных. Рассмотрено поведение субэлементов с каскадных фотопреобразователях с различным числом переходов. Так же в главе рассмотрен перспективный метод повышения эффективности преобразования за счет использования широкозонных, непоглощающих эмиттерных слоев.

Основные научные результаты и их новизна заключается в следующем:

Проведены расчеты коэффициентов собирания фотогенерированных носителей из слоев эмиттеров и баз для фотопреобразователей основе GaInP/GaInAs/Ge, и показано, что для всех эмиттеров собирание порядка 95% достигается при трехкратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя, а собирание в 95% для баз GaAs и GaInP субэлементов достигается уже при двукратном превосходстве диффузионной длины над толщиной слоя.

Сделан вывод о преимуществе GaAs солнечных элементов *p-n* полярности, ввиду того, что при высоких уровнях легирования *p*-GaAs слои обладают большими диффузионными длинами, по сравнению с *n*-GaAs, а при низких меньшими.

Установлено, что ухудшение характеристик GaInP солнечных элементов *p-n* полярности связано с большим разрывом валентной зоны для GaAs/AlInP и AlInP/GaInP интерфейсов *p-n* структуры, что приводит к формированию высокого потенциального барьера для дырок. При этом для структуры *n-p* полярности барьер для основных носителей (электронов), проходящих через слой широкозонного окна не ограничивает их транспорт.

Показано, что использование нуклеационного слоя GaInP с оптимальной толщиной 170-180 нм приводит к дополнительному возрастанию фототока Ge субэлемента на величину порядка 1,5 мА/см². Так же теоретически оптимизированы оптические потери в структурах каскадных солнечных элементов что позволило повысить фототок, генерируемый средним GaInAs субэлементом на величину порядка 2,5 мА/см².

Обнаружен загиб на зависимости напряжения холостого хода от плотности падающего излучения для фотопреобразователей на основе GaInP/GaAs/Ge, что было обусловлено наличием встречного фото-ЭДС, возникающего из-за присутствия туннельных диодов, что было подтверждено численным моделированием.

Выявлено, что при выращивании на подложке Ge верхних субэлементов каскадных фотопреобразователей происходит заглублиение диффузионного перехода в подложку со

140 нм для однопереходного ФЭП к 500 нм для GaAs/Ge двухпереходного ФЭП и до 700 нм для трехпереходного GaInP/GaInAs/Ge КСЭ.

Установлено, что для GaInAs субэлементов в эмиттере диффузионная длина уменьшалась от 500 нм для однопереходного до 300 нм для двух- и трехпереходных солнечных элементов на основе GaInP/GaAs и GaInP/GaInAs/Ge, а в базах от 10 мкм, до 8 мкм и 4 мкм соответственно.

Показано, что использование гетеропереходов, приводящее к сокращению рекомбинационных потерь в эмиттерном слое, позволяет увеличить КПД солнечных элементов.

Достоверность научных положений и выводов хорошо обоснована и определяется целым рядом факторов. В первую очередь автором проведен подробный анализ литературных источников по вопросам, относящимся к структурам каскадных солнечных элементов, их эпитаксиальному росту и исследованию параметров выращенных эпитаксиальных слоев, а также исследованию фотоэлектрических преобразователей. Применен целый ряд апробированных аналитических методик и численных методов для расчета параметров каскадных фотопреобразователей. Результаты, полученные в результате моделирования, сопоставлены с экспериментальными данными и показывают хорошее согласование.

Основная практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработана технология МОС-гидридного эпитаксиального выращивания многослойных многопереходных GaInP/GaInAs/Ge гетероструктур солнечных элементов, которая может быть применена для масштабного производства высокоэффективных фотопреобразователей. При этом разработанные как для космических, так и наземных применений структуры могут быть воспроизведены на любом эпитаксиальном оборудовании.

2. Разработана и оптимизирована конструкция GaInP/GaInAs/Ge каскадных солнечных элементов на основе изопериодичных полупроводниковых материалов, пригодных к крупномасштабному производству, с параметрами, находящимися на уровне лучших достижений в этой области, что дает перспективную возможность для развития солнечной энергетики, особенно важной для Российской Федерации, реализующей значительное количество космических программ и обладающей наибольшим количеством суммарной падающей наземной солнечной энергии.

3. Разработаны математические модели и подходы к численному моделированию, которые могут быть успешно применены для создания широкого спектра оптоэлектронных приборов.

4. Разработаны высокоэффективные однопереходные фотопреобразователи на основе GaInP, GaInAs и Ge, которые могут применяться в качестве фотодетекторов различного спектрального диапазона, в частности, для преобразования лазерного излучения.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты автора нашли отражение в большом количестве опубликованных работ, общим числом 61, в том числе в 19 статей в рецензируемых журналах, 1 глава в монографии, 12 патентов РФ и 30 трудов конференций и тезисов докладов.

Автореферат правильно и полно передает основное содержание диссертации, оформлен в соответствии с требованиями ВАК России.

Замечания и недостатки

Несмотря на высокий научный уровень и новизну полученных в диссертационной работе результатов, вместе с тем, нельзя не сделать ряд замечаний:

1. В работе сделан вывод, о том, что для GaAs или GaInAs субэлемента, выполненного с сильно легированным эмиттерным слоем, низкие значения времени жизни неосновных носителей заряда приводят к рекомбинации значительного количества фотогенерированных носителей, что ведет к падению напряжения и тока, генерируемых *p-n* переходом. Для сокращения рекомбинационных потерь в работе предложено использование широкозонных эмиттерных слоев AlInP, GaInP или AlGaAs, однако экспериментальных данных, подтверждающих эффективность такого подхода, не приведено.

2. В главе 4 делается вывод о том, что при выращивании структур трехпереходных солнечных элементов происходит заглубливание диффузионного *p-n* перехода в подложке германия до 700 нм, что при длине диффузии носителей в 400 нм позволяет обеспечить их сбор на уровне не более 60% (рис. 1б автореферата). Кроме того, для среднего GaInAs субэлемента диффузионные длины в базовом *p*-GaInAs слое трехпереходной структуры обеспечивает только 80% сбор носителей. К сожалению, в работе не сделано выводов о путях повышения сбора носителей из данных слоев.

Однако представленные замечания ни в коей мере не снижают высокой научной ценности диссертационной работы и не ставят под сомнение основные научные результаты и сделанные выводы.

Закключение

Оценивая работу можно утверждать, что рассматриваемая диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладающую несомненной актуальностью, научной новизной и практической ценностью, в которой решена задача, имеющая существенное значение для развития фотоэнергетики и полупроводниковой оптоэлектроники.

Считаю, что диссертационная работа «Многоступенчатые гетероструктурные фотопреобразователи на основе материалов A^3B^5 и германия, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии» удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней (п.9 - п.14), утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Минтаиров Сергей Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент –
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий отделом
нанотехнологий, солнечной энергетики
и энергосберегающих технологий
Южного научного центра РАН

ЛУНИН Леонид Сергеевич

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Южный научный
центр Российской академии наук»,
отдел нанотехнологий, солнечной энергетики
и энергосберегающих технологий
тел. +7 (8635) 255 459
м.т. +7 (918) 551 90 28
e-mail: Lunin_LS@mail.ru
[http:// www.ssc-ras.ru](http://www.ssc-ras.ru)

18.11.2015

Подпись проф. Лунина Л

Ученый секретарь ЮНЦ
канд. биол. наук

Титов В.В.