

## ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертационной работе Маричева Артема Евгеньевича  
на тему: «Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»

**Актуальность.** В диссертационной работе Маричева А.Е. представлены результаты разработки технологии изготовления и исследований твердых растворов InGaAsP для фотоприемников мощного лазерного излучения. Такие фотоприемники необходимы для систем передачи энергии в случаях отсутствия возможностей проводных связей: в космосе, в системах авиации и флота, в случаях сложного рельефа местности и при передаче энергии из космоса на Землю. Для этой цели в качестве источника энергии наибольший интерес представляют твердотельные лазеры YAG:Nd с длиной волны излучения  $\lambda=1.06$  мкм и киловаттной выходной мощностью. Соответственно, для работы с ними, активная область фотоприемников должна изготавливаться на основе твердых растворов с шириной запрещенной зоны  $E_g \sim 1,0-1,2$  эВ и желательно (из конструктивных соображений) располагаться на прозрачной для излучения подложке.

В этой связи, диссертационную работу Маричева А.Е. «Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения», посвященную исследованию физико-технологических основ создания эффективных фотоприемников мощного лазерного излучения, следует считать актуальной и представляющей значительный практический интерес.

**Диссертационная работа** состоит из введения, шести глав и заключения, содержит 111 страниц, включая 70 рисунков, 4 таблицы, а также библиографию из 55 наименований.

**Введение.** Обоснована актуальность данной тематики, сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

**Глава первая.** Дан обзор опубликованной литературы по теме диссертации. Обоснован выбор материала и конструкции фотоприемника, оптимизированного под источник с длиной волны излучения  $\sim 1$  мкм. Основное отличие в конструкции предлагаемого фотоприемника – ввод излучения со стороны подложки, что позволяет увеличить площадь засветки за счет использования редкой контактной сетки при сохранении контактного сопротивления.

**Глава вторая.** Предложено и обосновано использование для изготовления фотоприемных структур метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОСГФЭ). Приведено описание установки для выращивания AIXTRON AIX – 200 и обоснован выбор исходных реагентов.

**Глава третья.** Проведен, на основе литературных данных, анализ существования области стабильных твердых растворов InGaAsP на подложках InP. Приведена оценка критической толщины стабильных твердых растворов с необходимой шириной запрещенной зоны 1,0 – 1,2 эВ и предложен способ их изготовления с достижением толщин более 1,5 мкм.

**Глава четвертая.** Представлены результаты исследования по определению оптимальных режимов изготовления слоев InP на подложках InP и на основе лучших образцов изготавливались твердые растворы с составами вблизи области спинодального распада. Представлены результаты исследований этих твердых растворов методами фотолюминесценции (ФЛМ), рентгеновской дифрактометрии, анализ поверхности на атомно-силовом микроскопе и методом анизотропного отражения. Показана возможность

выращивания нелегированных и легированных слоев InP с высоким кристаллическим совершенством при толщине до 200 нм.

Для получения слоев с толщиной, необходимой для полного поглощения принимаемого излучения, была разработана многослойная конструкция структура с чередованием слоев InGaAsP, толщиной 200 нм, и слоев InP, толщиной 10 нм.

**Глава пятая.** Описана технологию изготовления и конструкция опытного образца фотоприемника лазерного излучения с длиной волны 1.064 мкм с вводом излучения со стороны подложки. По результатам испытаний достигнут КПД 35.1% при плотности мощности излучения 10 Вт/см<sup>2</sup>

**Глава шестая.** Предложена конструкция каскадного фотоприемника мощного лазерного излучения (ФЭПМЛИ) и технология его изготовления. Такой фотоприемник позволяет исключить эффект «насыщения» при большой мощности за счет разделения поглощаемого потока излучения по нескольким областям и уменьшает электрическую емкость прибора, что позволяет работать с большими частотами.

Были решены проблемы просветления, предложены низкоомные электрические контакты, решена проблема замены туннельных переходов для соединения каскадов. В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, среди которых отметим создание на основе гетероструктур InGaAsP/InP актуального для современной техники передачи энергии образца фотоприемника лазерного излучения, обладающего высоким КПД при больших входных мощностях излучения.

### **Научная новизна**

Среди новых научных результатов, можно выделить следующие:

- Разработан технологический процесс изготовления методом МОСГФЭ твердых растворов InGaAsP на подложке InP вблизи области спинодального распада с шириной запрещенной зоны 1,0-1.2 эВ защищено патентом РФ.

- Показано, что релаксация внутренних напряжений происходит путем образования рельефа на поверхности слоя и установлено, что оптимальная толщина не может превышать 200 нм.

- Предложена и защищена патентом РФ технология изготовления активной области, толщиной более 1.5 мкм, путем последовательного выращивание слоев InGaAsP, толщиной 200 нм, и InP, толщиной 20 нм.

- Предложена технология изготовления соединений элементов в каскадном фотоприемнике на основе каналов проводимости для замены туннельных переходов защищена патентом РФ.

### **Практическое значение работы**

Разработана технология изготовления твердых растворов InGaAsP на подложках InP с  $E_g = 1.0 - 1.2$  эВ методом ГФЭМОС и на ее основе созданы образцы мощных фотоприемников лазерного излучения с КПД ~35%.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для промышленного освоения мощных InGaAsP полупроводниковых фотопреобразователей в системах оптической транспортировки энергии, а также представляют интерес для исследователей, работающих в области технологии многокомпонентных полупроводниковых гетероструктур для оптоэлектронных приборов.

**Достоверность и надежность** результатов работы обеспечена современным измерительным оборудованием, статистической обработкой экспериментальных данных с применением ЭВМ.

**Содержание диссертации** в достаточной степени отражено в публикациях автора, а ее основные положения обстоятельно изложены в автореферате.

## Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

- 1) При упоминании эффекта «насыщения» нет оценки мощности облучения и предложений о возможных толщинах областей поглощения в каскадном ФЭПМЛИ
- 2) В предложенном методе изготовления активной области более 200 нм (гл.4). отсутствует обоснование толщины слоев InP.
- 3) В работе подробно изложена технология изготовления каскадного ФЭПМЛИ, но не представлены результаты исследований каскадного ФЭПМЛИ.
- 4) При обсуждении достигнутых значений КПД опытного фотоприемника нет сравнения с лучшим мировым уровнем и анализа причин ограничивающих КПД: физические, технологические, конструкционные.
- 5) В тексте диссертации имеются опечатки и стилистические погрешности.  
Стр.42. В тексте «Ошибка! Источник не найден» Что это значит?  
Стр.72. «...сопровождалось падением  $FF$ » Нет расшифровки сокращения « $FF$ » ни здесь, ни на рис.48, также как и «ЕВІС» на стр.82, рис.55b  
Стр.73. « По результатам прямых измерений... КПД составил 35.1%». И на этой же странице и на стр.105 «КПД составил 34.5%». Так все же: 35.1 или 34.5?  
На графиках для единиц размерностей используются то русские, то латинские обозначения (например, «нм» на стр.68, рис.42 и «nm» на стр.73, рис.48), или они вообще отсутствуют (стр.99, рис.65; стр.87, рис.60), или приобретают разнообразный вид: «а.е.» (стр. 103, рис.68), «усл.ед.» (стр.53, рис28), «отн.ед.» (стр.62. рис.37)  
Стр.85, рис.57 обозначение «полуширина фотолюминесценции» - некорректно, все-таки полуширина бывает у спектра фотолюминесценции

Приведенные замечания не меняют в целом положительной оценки диссертационной работы Маричева А.Е., которая выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой. Основные результаты диссертационной работы, полученные автором, являются оригинальными и достоверными, что подтверждается патентами РФ, докладами на представительных конференциях, публикациями в ведущих физических журналах, а также использованием в работе современного технологического и измерительного оборудования.

Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Автор диссертации Маричев Артем Евгеньевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.11.- «Физика полупроводников».

Официальный оппонент  
заведующий лабораторией  
оптоэлектронных приборов НТЦ Микроэлектроники РАН  
к.т.н., с.н.с.

«25» сентября 2023 г.

А.Л.Закгейм

Подпись заверяю

Директор  
НТЦ Микроэлектроники  
РАН

В.М.Устинов