

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

Д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____ А.Ю.Егоров

М.п.

"31" августа 2023г.

Отзыв ведущей организации

«Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

о диссертационной работе **Маричева Артема Евгеньевича «Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения»,** представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11- «Физика полупроводников»

В работе А.Е. Маричева объектом исследований являются твердые растворы InGaAsP с составами вблизи области спинодального распада, выращенные на подложках InP, и технология их изготовления для использования в фотоприемниках мощного лазерного излучения (ФПМЛИ).

В диссертационной работе Маричева А.Е. представлены результаты исследований по развитию технологии синтеза четверных растворов InGaAsP и методам изготовления фотоприемников мощного лазерного излучения на их основе. Такие фотоприемники необходимы для систем передачи энергии без применения проводных линий связей, что востребовано в таких областях, как космос (при передаче энергии из космоса на Землю), а

также авиация и флот. В соответствии с приведенным в работе литературном обзоре, для данных целей представляют особый интерес твердотельные лазеры на основе иттриевых гранатов с длиной волны излучения 1.06 мкм и мощностью более 15 кВт. Следовательно твердые растворы для изготовления соответствующих фотоприемников должны иметь ширину запрещенной зоны E_g в диапазоне (1.0-1.2) эВ и преимущественно быть синтезированы на прозрачной для этого излучения подложке. При этом удовлетворяющие данным требованиям твердые растворы $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ ($0.18 < x < 0.25$, $0.37 < y < 0.53$) находятся вблизи границы области спинодального распада (области несмешиваемости). В связи с этим актуальной проблемой является синтез стабильных твердых растворов $InGaAsP$ с $E_g = 1.0 - 1.2$ эВ.

На момент начала выполнения представленной работы в мире изготавливали фотоприемники, рассчитанные на длину волны 1.06 мкм, преимущественно на основе кремния. При этом существующие разработки были сфокусированы в области датчиков, а не преобразователей мощного излучения. Коэффициент полезного действия (КПД) таких фотопреобразователей не превышал 16%. При этом теоретические оценки показывают, что оптимизированные ФЭП могут обеспечить преобразование лазерного излучения с КПД на уровне 50–65%. Вышеизложенное определяет актуальность данной работы.

Целью представленной работы является разработка методом МОСГФЭ технологии синтеза твердых растворов $InGaAsP$ (с $E_g 1.05 - 1.2$ эВ) на подложках InP и исследование их свойств, разработка технологии изготовления ФПМЛИ на основе данных твердых растворов и исследование возможности создания каскадных ФПМЛИ для исключения ограничений, связанных с эффектом «насыщения», высокими электрическим сопротивлением и электрической емкостью.

Работа отвечает критерию **новизны**, так как в ней:

- 1) Показано, что релаксация напряжений путем образования рельефа на поверхности позволяет избежать спинодального распада твердого раствора $InGaAsP$ (с $E_g 1.05 - 1.2$ эВ);
- 2) Показано, что снятие напряжений путем образования рельефа в слоях толщиной 150-200 нм приводит к уменьшению ширины спектров фотолюминесценции на полуввысоте и росту интенсивности оптического отклика. Увеличение толщины области поглощения свыше 200 нм увеличивает развитость рельефа и неоднородность состава твердого раствора, усиливает падение интенсивности и увеличивает ширину спектра фотолюминесценции на полуввысоте;
- 3) Показано, что последовательное выращивание слоев твердых растворов $InGaAsP$ толщиной 150-200 нм и InP толщиной 20 нм обеспечивает релаксацию возникающих

механических напряжений и позволяет обеспечить достижение толщины области поглощения более 1 мкм без ухудшения структурного качества слоев.

- 4) Разработана технология изготовления фотоприемников мощного лазерного излучения на длину волны 1.06 мкм. По результатам измерений был достигнут КПД 34.5% при мощности излучения 10 Вт/см².
- 5) Предложено использование подконтактного слоя InGaAs с $E_g=0.51$ эВ к InP:Zn p-типа, обеспечивающего уменьшение сопротивления структуры в сравнении с традиционными контактами.
- 6) Показана возможность изготовления каскадного фотоприемника лазерного излучения, без использования туннельных p-n переходов, с применением соединительных элементов на основе микрокристаллитов GaP.

К наиболее значимым результатам, приведенным в диссертационной работе Маричева А.Е., можно отнести следующие:

1. Разработана технология изготовления твёрдых растворов InGaAsP ($E_g = 1.0 - 1.2$ эВ) вблизи области спинодального распада n и p типа проводимости методом МОСГФЭ на подложках InP.
2. Релаксация напряжений путем образования рельефа на поверхности позволяет избежать спинодального распада твёрдых растворов InGaAsP;
3. Снятие напряжений в слоях толщиной 150-200 нм приводит к уменьшению ширины спектров фотолюминесценции на полувысоте и росту интенсивности. Увеличение толщины активной области свыше 200 нм усиливает рельеф и неоднородность состава твердого раствора, сопровождается падением интенсивности и увеличением ширины спектра фотолюминесценции на полувысоте;
4. Показано, что последовательное выращивание слоев твердых растворов $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ толщиной 150-200 нм и слоев InP толщиной 20 нм позволяет обеспечить толщину активной области более 1 мкм без ухудшения качества.
5. Разработана технология изготовления фотоприемников мощного лазерного излучения на длину волны 1.06 мкм. По результатам измерений был достигнут КПД 34.5% при мощности засветки 10 Вт/см².
6. Предложен новый подконтактный слой InGaAs с $E_g=0.51$ эВ к InP:Zn p-типа, это приводит к уменьшению сопротивления в сравнении с традиционными методами создания контактов.

7. Показана возможность и разработана технология изготовления каскадного фотоприемника, без туннельных p-n переходов, с использованием соединительных элементов на основе микрокристаллитов GaP.

Достоверность полученных методологических и экспериментальных результатов является результатом широкого использования современных экспериментальных установок и методов физического эксперимента. Достоверность выводов и заключений подтверждается использованием современных методов диагностики свойств материалов и структур, служивших объектами проведенных исследований. Приведенные результаты хорошо согласуются с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. разработана технология изготовления твердых растворов InGaAsP на подложках InP с $E_g = 1.05 - 1.15$ эВ методом ГФЭМОС;
2. разработана технология изготовления фотопреобразователей на основе твердых растворов InGaAsP с $E_g = 1.05$ эВ на подложках InP;
3. разработана технологии изготовления электрических контактов к p-InP;
4. разработана технология изготовления новых соединительных элементов на основе микрокристаллитов GaP для каскадных фотопреобразователей для замены туннельных переходов на основе InP;
5. предложена конструкция каскадного фотоприемника мощного лазерного излучения без туннельного p⁺⁺-n⁺⁺ перехода.

По представленной работе можно сделать следующие замечания:

1. При упоминании эффекта «насыщения» не приведены оценки предельной мощности облучения и предложений о возможных толщинах областей поглощения в каскадном ФПМЛИ. Также имело бы смысл обсудить механизмы рекомбинации фотогенерируемых носителей в микрокристаллитах GaP.
2. В предложенном методе изготовления активной области более 200 нм отсутствует обоснование толщины слоев InP.
3. Требуется пояснений, почему в работе подробно изложена технология изготовления каскадного ФПМЛИ, но сам прибор не изготовлен. Требуется также обоснование выбора толщины в однокаскадном ФПМЛИ.

Сделанные замечания носят частный характер и не ставят под сомнения основные результаты и выводы диссертации, не снижают научной и практической значимости диссертации.

Рекомендации по использованию

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для ознакомления и использования специалистами в области тонкопленочных оптоэлектронных гетероструктур, работающих в ведущих научно-исследовательских организациях и промышленных предприятиях.

Помимо этого, полученные результаты и разработанные методы следует рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области электроники, нанoeлектроники и возобновляемых источников энергии.

Общая оценка диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка используемых источников из 55 наименований. Работа изложена на 111 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 8 таблиц. В заключении приведено обобщение полученных результатов и выводы, отражающие результаты исследований.

Структура и содержание работы свидетельствуют о том, что в целом диссертация представляет собой завершённое научное исследование, в котором продемонстрирована актуальность, новизна и перспективность развиваемых подходов. Выводы и заключения обоснованы и имеют научную и практическую ценность для разработок в области создания новых функциональных материалов.

Апробация работы выполнена при публикации 18 статей в журналах, входящих в базы данных SCOPUS и WoS, 4 патентов Российской Федерации.

Публикации в индексируемых изданиях и выступления на международных конференциях свидетельствуют о том, что полученные автором диссертации результаты соответствуют уровню современной науки.

Заключение

Диссертационная работа Маричева Артема Евгеньевича является завершённой научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном и техническом уровне. Результаты и выводы диссертации являются достоверными и научно-обоснованными.

Автореферат и публикации полно и достоверно отражают содержание диссертации и её основные положения и выводы. По своей актуальности, научной новизне, практической значимости, достоверности, а также объему выполненных исследований и личному вкладу соискателя диссертационная работа Маричева Артема Евгеньевича «Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения» полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор Маричев Артем Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - «Физика полупроводников».

Диссертационная работа, автореферат, публикации и доклад соискателя и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на научном семинаре центра Нанотехнологий «Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» (Протокол №1 от 22 июня 2023 г.).

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией ВИЭ

СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова

д.ф.-м.н., доцент

Тел.: +7 (812) 297-21-45

e-mail: imukhin@spbau.ru

И.С. Мухин

[ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ]

Ведущий специалист по кадрам

ск. О. А. Анискина

«31» августа 2023г.