

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02
ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ
УЧРЕЖДЕНИИ НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ
ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 26.10.2023 № 9 _____

О присуждении Маричеву Артему Евгеньевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения», по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» принята к защите «20» апреля 2023 г., протокол № 6 диссертационным советом ФТИ 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Маричев Артем Евгеньевич, 06 мая 1988 года рождения, в 2012 г. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по направлению подготовки 11.04.04 – «электроника и наноэлектроника». С 2012 по 2016 гг. проходил обучение по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» в аспирантуре Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника в лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – **Пушный Борис Васильевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» в своем заключении, подписанном заведующим лабораторией ВИЭ, доктором физико-математических наук Иваном Сергеевичем Мухиным и утвержденном проректором по науке «Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического

университета имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» доктором физико-математических наук А.Ю. Егоровым, дала положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа является актуальной, законченной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и соответствует профилю диссертационного совета ФТИ 34.01.02 (специальность 1.3.11 – «физика полупроводников»).

В отзыве содержатся 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 выбора 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 сомнение основные результаты и выводы диссертации, не снижают научной и практической значимости диссертации. О достаточной апробации работы говорят 18 публикаций статей в журналах, входящих в базы данных SCOPUS и WoS, 4 патента Российской Федерации.

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-технического института 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».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обуславливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На защите на все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

Официальные оппоненты:

Закгейм Александр Львович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук («НТЦ Микроэлектроники»), старший научный сотрудник. Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

Сидоров Валерий Георгиевич, доктор физико-математических наук,

профессор, пенсионер.

Адрес: 196641, Санкт-Петербург, Металлострой, ул. Центральная, д. 15, кв. 16

Вопросы и замечания официального оппонента Закгейма А.Л.

При упоминании эффекта «насыщения» нет оценки мощности облучения и предложений о возможных толщинах областей поглощения в каскадном ФЭПМЛИ.

В предложенном методе изготовления активной области более 200 нм (гл.4) отсутствует обоснование оптимальности толщины слоев InP.

В работе подробно изложена технология изготовления каскадного ФЭПМЛИ, но не представлены результаты исследований каскадного ФЭПМЛИ.

При обсуждении достигнутых значений КПД опытного фотоприемника нет сравнения с лучшим мировым уровнем и анализа причин, ограничивающих КПД: физических, технологических, конструкционных.

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, так же как и «EBC» 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, рис.28), «отн.ед.» (стр.62, рис.37).

Стр.85, рис.57 обозначение «полуширина фотолюминесценции» - некорректно, все-таки полуширина бывает у спектра фотолюминесценции.

Вопросы и замечания официального оппонента Сидорова В.Г.

1. В обзоре литературы отсутствует анализ способов беспроводной передачи электрической энергии, альтернативных лазерному, который рассматривается в диссертации.

2. Цель работы сформулирована некорректно. Это задачи, а не цель, что и повторено в задачах.

3. Нет расчёта толщин слоёв в многослойной структуре фотоприёмника, которые обеспечивают разгрузку структуры по внутренним механическим напряжениям и сохраняют изопериодность с подложкой.

4. Почему температура выращивания слоёв 600°C выбрана как оптимальная, если при других температурах выращиваний не проводилось?

5. В диссертации русский язык оставляет желать лучшего, много ошибок всех видов, страдает стиль изложения материала. Характерны такие словосочетания как: «интенсивность спектров», «ширина спектра», «полуширина подложки», «интенсивность роста плёнок», «усиление рельефа» и др. На некоторых графиках мелкий шрифт без лупы не читается, в подписи может стоять «концентрация электронов», а на самом деле должна быть «концентрация дырок».

На автореферат поступило 7 отзывов, все они положительные.

Отзыв к.т.н. Вадима Валентиновича Лентовского, Доцент кафедры О4 «Физика» Балтийского государственного технического университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, (190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1).

Замечания:

- в работе подробно изложена технология изготовления каскадного ФЭПМЛИ, но сам прибор не изготовлен.

Отзыв д.ф.-м.н. Анатолия Петровича Ковчавцева, ведущего научного сотрудника- Институт физики полупроводников им А.В. Ржанова (630090, Новосибирск просп. Академика Лаврентьева, 13).

Замечания:

- на стр. 12 в последней строке не верна ссылка на рисунок, должна быть ссылка на рис.7б. На стр.13 в главе 5 должна быть ссылка на рис. 8.

Отзыв д.ф.-м.н. Андрея Федоровича Цацульникова, Заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологического центра микроэлектроники и субмикронных гетероструктур, (194021, Санкт- Петербург, Политехническая ул., 26).

Замечания:

- в работе подробно работе изложена технология изготовления каскадного фотоприемника мощного лазерного излучения (ФЭПМЛИ), но не представлены результаты исследований его свойств.

Отзыв к.ф.-м.н. Ефимова Никиты Юрьевича, АО «ЦНИИ "ЭЛЕКТРОН"», (194223, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Светлановское, пр-кт Тореза, д. 68, литера Р.).

Замечания:

- как автор оценивает полученные значения КПД 34.5% для изготовленных образцов фотоприемников.

Отзыв к.ф.-м.н. Скачкова Александра Федоровича, заместитель генерального директора по научной работе АО «Сатурн», (350072, г. Краснодар, ул. Солнечная, 6).

Замечания:

- при обсуждении достигнутых значений КПД опытного фотоприемника, нет сравнения с лучшим мировым уровнем и анализа причин ограничивающих КПД: физические, технологические, конструкционные.

Отзыв д.т.н. Виктора Борисовича Бессонова, декан факультета электроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5).

Замечания:

- каковы перспективы увеличения КПД для изготовленных образцов фотоприемников?

Отзыв д.т.н. А.О. Жукова, заместитель генерального директора АО «ОКБ МЭИ» (111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14).

Замечания:

- в работе подробно изложена технология изготовления каскадного ФЭПМЛИ, но сам прибор не изготовлен.

Новизна работы:

Показано, что релаксация напряжений путем образования рельефа на поверхности позволяет избежать спинодального распада твёрдого раствора, при этом снятие напряжений путем образования рельефа в слоях толщиной 150-200 нм приводит к уменьшению ширины спектров фотолюминесценции на полувывоте и росту интенсивности. Увеличение толщины области поглощения свыше 200 нм усиливает рельеф и неоднородность состава твердого раствора, усиливает падение интенсивности и увеличивает ширину спектра фотолюминесценции на полувывоте.

Было предложено последовательное выращивание слоев твердых растворов InGaAsP толщиной 150-200 нм и InP толщиной 20 нм; это обеспечивает релаксацию напряжений и позволяет обеспечить толщину области поглощения более 1 мкм без ухудшения качества.

Была 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.

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 контактами.

Разработана технология изготовления каскадного фотоприемника лазерного излучения, без туннельных p-n переходов, с использованием соединительных элементов на основе кристаллитов GaP.

Диссертация является законченной, последовательной и внутренне согласованной научной работой, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение. Полученные результаты воспроизводимы и повторяемы, что подтверждает их достоверность. Для получения представленных в диссертационном исследовании результатов применялось современное высокоточное оборудование, а также общепринятые стандарты научных исследований. Данные, полученные различными методами, дополняют друг друга и подтверждают взаимную достоверность результатов.

Личный вклад автора

Личный вклад соискателя состоит в разработке технологических режимов и проведении экспериментов по МОС-гидриднему эпитаксиальному выращиванию материала и приборных структур, обработке и анализе полученных данных, подготовке и написании статей.

Апробация работы

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 18 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (с указанием личного вклада автора):

1) Левин РВ; Маричев АЕ; Шварц МЗ; Марухина ЕП; Хвостиков ВП; Пушный БВ; Мизеров МН; Андреев ВМ, Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения на основе InGaAsP(1.0 эВ)/InP-гетероструктур, ФТП, т.49, 5, 2015, с. 715 – 718

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

2) Marichev AE; Pushnyi BV; Levin RV Investigation of spinodal decomposition of InGaAsP solid solutions grown by the MOCVD technique J. Phys.: Conf. Ser. 17th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics (RYCPS 2015), November 2015, St. Petersburg, Russia

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

3) Marichev AE; Levin RV; Gagis GS; Gordeeva AB, Obtaining solid solutions of InGaAsP solid solutions in the spinoidal decomposition region, J. Phys.: Conf. Ser. 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint Petersburg OPEN 2016), March 2016, St Petersburg, Russia.

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

4) Marichev AE; Pushnyi BV; Levin RV; Lebedeva NM; Prasolov ND; Kontrosh, EV New connecting elements for cascade photoelectric converters based on InP J. Phys.: Conf. Ser. 19th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics; St.Petersburg, Russian Federation; 27 November to 1 December 2017

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

5) Marichev AE; Levin RV; Prasolov ND; Kontrosh EV; Pushnyi BV Development of the technology of manufacturing connecting elements in cascade photodetectors J. Phys.: Conf. Ser. International Conference PhysicA.SPb 2017; St. Petersburg, Russian Federation; 24-26 October 2017

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

6) Marichev AE; Levin RV; Pushnyi BV; Gagis GS; Vasil'ev VI; Scheglov MP; Kazantsev DY; Ber BY; Popova TB; Marukhina EP Effect of growth conditions at MOCVD on thickness uniformity of GaInAsP epilayers obtained on InP J. Phys.: Conf. Ser. International Conference PhysicA.SPb 2018; St. Petersburg, Russian Federation; 23-25 October 2018

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

7) Epoletov VS; Marichev AE; Levin RV; Pushniy BV; Talnishnikh NA Antireflection coating for photovoltaic converters based on InP native oxide J. Phys.: Conf. Ser. International Conference PhysicA.SPb/2019; St.Petersburg, Russian Federation; October 2019

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

8) Epoletov VS; Marichev AE; Popova TB; Pushnyi BV; Levin RV

Subcontact layers of p-InGaAs with minimal resistance for photodetectors of high-power laser radiation J. Phys.: Conf. Ser. 21st Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics, RYCPS 2019; St. Petersburg, Russian Federation; 25-29 November 2019

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

9) Маричев АЕ; Левин РВ; Гордеева АБ; Гагис ГС; Кучинский ВИ; Прасолов НД; Шмидт НМ, Особенности технологии InGaAsP/InP наногетероструктур для преобразователей лазерного излучения с длиной волны 1064 нм Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век т.8, 3, 2016, с. 27 – 31

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

10) Маричев АЕ; Левин РВ; Гордеева АБ; Гагис ГС; Кучинский ВИ; Пушный БВ; Прасолов НД; Шмидт НМ Релаксация напряжений в InGaAsP/InP-гетероструктурах для преобразователей лазерного излучения с длиной волны 1064 nm Письма ЖТФ т.43, 2, 2017, с. 3 – 9

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

11) Васильев ВИ; Гагис ГС; Левин РВ; Маричев АЕ; Пушный БВ; Щеглов МП; Кучинский ВИ; Бер БЯ; Казанцев ДЮ; Горохов АН; Попова ТБ Исследование градиента состава слоев GaInAsP, полученных на InP методом газофазной эпитаксии Письма ЖТФ т.44, 24, 2018, с. 17 – 24

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

12.) Левин РВ; Маричев АЕ; Контрош ЕВ; Прасолов НД; Калиновский ВС; Пушный БВ, Изготовление и исследование коммутирующих р-n-переходов для каскадных фотопреобразователей Письма ЖТФ т.44, 24, 2018, с. 25 – 31

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

13) Хвостиков ВП; Сорокина СВ; Потапович НС; Левин РВ; Маричев АЕ; Тимошина НХ; Пушный БВ, Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения ($\lambda=1064$ нм) на основе GaInAsP/InP ФТП т.52, 13, 2018, с. 1641 – 1646

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

14) Гагис ГС; Власов АС; Левин РВ; Маричев АЕ; Щеглов МП; Попова ТБ; Бер БЯ; Казанцев ДЮ; Чистяков ДВ; Кучинский ВИ; Васильев ВИ Люминесцентные свойства выращенных на InP слоев GaInAsP с градиентом состава по толщине Письма ЖТФ т.45, 20, 2019, с. 22 – 25

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

15) Гагис ГС; Левин РВ; Маричев АЕ; Пушный БВ; Щеглов МП; Бер БЯ; Казанцев ДЮ; Кудрявцев ЮА; Власов АС; Попова ТБ; Чистяков ДВ; Кучинский ВИ; Васильев ВИ Исследование однородности состава по толщине слоев GaInAsP, полученных на подложках InP методом газофазной эпитаксии ФТП т.53, 11, 2019, с. 1512 – 1518

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

16) Гагис ГС; Васильев ВИ; Левин РВ; Маричев АЕ; Пушный БВ; Кучинский ВИ; Казанцев ДЮ; Бер БЯ Исследование влияния легирования на переходные слои анизотипных гетероструктур на основе GaInAsP и InP, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии Письма ЖТФ т.46, 19, 2020, с. 22 – 24

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

17) Эполетов ВС; Маричев АЕ; Пушный БВ; Салий РА Электрические контакты к структурам на основе InP с подконтактным слоем к р-InP, легированным Zn Письма ЖТФ т.46, 23, 2020, с. 13 – 14

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

18) Маричев АЕ; Эполетов ВС; Власов АС; Пушный БВ; Лихачев АИ; Нащекин АВ Замена туннельных переходов в InP на каналы проводимости с кристаллитами GaP Письма ЖТФ т.47, 22, 2021, с. 52 – 54

Личный вклад заключается в проведении эксперимента по росту структур и слоев, их исследовании и подготовке статьи.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, получено 4 патента РФ:

1) Название: Фотоэлектрический преобразователь на основе InP
Патент РФ: #205312 от 8 июля 2021 г. Тип: Полезная модель
Авторы: Эполетов В.С., Маричев А.Е., Пушный Б.В., Салий Р.А.

2) Название: Способ изготовления гетероструктуры InGaAsP/InP фотопреобразователя
Патент РФ: #2660415 от 6 июля 2018 г. Тип: Изобретение
Авторы: Андреев В.М., Левин РВ, Пушный Б.В., Маричев А.Е.

3) Название: Полупроводниковая гетероструктура для фотопреобразователей
Патент РФ: RU 178900 U1 от 2017.12.15
Авторы: Мизеров М.Н., Левин Р.В., Маричев А.Е., Пушный Б.В.

4) Название: Способ изготовления полупроводниковой структуры многoperеходного фотопреобразователя
Патент РФ: #2781507 от 12 октября 2022 г.
Авторы: Маричев А.Е., Эполетов В.С., Власов А.С., Пушный Б.В., Устинов В.М..

На заседании 26 октября 2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Маричеву Артему Евгеньевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 20 человек из 25 членов совета, из них 13 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали:

За присуждение Маричеву Артему Евгеньевичу ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 17.

Против – нет.

Недействительных бюллетеней – нет.

Из 3 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Маричеву Артему Евгеньевичу ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:

«за» – 3

«против» - нет.

«не голосовал» – нет.

Итого: из 25 членов совета участвовали в очно-заочном голосовании – 20

За: 20

Против: нет

Воздержались: нет

Не проголосовал: нет

Председатель диссертационного совета,
академик РАН

Сурис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного совета,
д. ф.-м. н.

Сорокин Лев Михайлович

26 октября 2023 г.

