

Маричев Артем Евгеньевич

Исследование твердых растворов InGaAsP для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

1.3.11 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской Академии
Наук

Научный руководитель:

Пушный Борис Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник в лаборатории фотоэлектрических преобразователей
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

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.

Сидоров Валерий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, пенсионер.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический Университет имени Ж.И. Алфёрова Российской Академии Наук».

Защита состоится «___» _____ 2023 года в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.02 созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», по адресу: 194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 34.01.02:

Доктор физико-математических наук

Сорокин Лев Михайлович

Актуальность темы

Появление лазеров способствовало становлению и интенсивному развитию новых научных направлений и областей. Одним из таких направлений становится передача энергии без проводов.

Технология передачи энергии с помощью лазера, в основном, может использоваться при разработке новых систем энергоснабжения в космосе и для разных потребителей на Земле. Для этих целей особый интерес представляет излучение с длиной волны 1.064 мкм, поскольку, попадает в локальный минимум поглощения Земной атмосферы, а также доступны твердотельные лазеры с $\lambda \sim 1.064$ мкм, обладающие мощностью более 12 кВт.

К моменту начала работы (2012 г.) отсутствовали фотоприемники для приема излучения большой мощности.

В отличие от традиционных солнечных элементов, фотоэлектрический преобразователь мощного лазерного излучения (ФЭПМЛИ) должен принимать монохромное излучение большой мощности, а это налагает определённые требования к их конструкции: учет эффекта «насыщения» и низкое электрическое сопротивление структуры.

С учетом сказанного выше, энергетическая схема лазерного приемника напоминает схему полупроводникового лазера на основе двойной гетероструктуры (ДГС), где материал области поглощения излучения имеет ширину запрещённой зоны (E_g), соответствующее энергии квантов преобразуемого излучения и прямую структуру зон, для исключения потерь энергии при изменении импульса электронов. Эмиттеры изготовлены из материала ширина запрещенной зоны, которых должна быть больше, чем в области поглощения на величину не менее 3кТ (0.1 эВ), для исключения поглощения лазерного излучения.

Материал со стороны приема излучения должен иметь малое электрическое сопротивление.

С учетом вышеизложенного, наиболее подходящим для преобразования излучения с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм является структура на основе твердых растворов InGaPAs с $E_g = 1.0 - 1.2$ эВ на подложке n-InP.

Однако подходящие твердые растворы $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($0.18 < x < 0.25$, $0.37 < y < 0.53$) находятся вблизи границы области спинодального распада (области несмешиваемости). В связи с этим актуальна проблема изготовления стабильных твердых растворов InGaAsP $E_g = 1.0 - 1.2$ эВ.

На момент начала выполнения настоящей работы (2012 г.) в мире изготавливали [1-3], фотоприемники на длину волны 1.06 мкм преимущественно на основе кремния [2] для датчиков, а не для преобразования мощного излучения. КПД преобразования таких ФП был не более 16% [4].

Теоретические же оценки показывают, что ФЭП могут обеспечить преобразование лазерного излучения с КПД 50–65%.

Учитывая вышеизложенное понятно, что разработка технологии ФЭП для мощного лазерного излучения, является очень перспективным направлением.

Цель работы

- 1) Разработать технологию изготовления методом МОСГФЭ твердых растворов InGaAsP (E_g 1.05 – 1.2 эВ) на подложках InP;
- 2) Исследовать свойства твердых растворов InGaAsP;
- 3) Разработать технологию изготовления ФЭПМЛИ на основе гетероструктур InGaAsP/InP;
- 4) Исследовать возможность создания каскадных ФЭПМЛИ для исключения ограничений связанных с эффектом «насыщения», высокими электрическим сопротивлением и электрической емкостью;

В соответствии с поставленной целью сформулированы основные задачи диссертации

- 1) Разработать технологию изготовления твердых растворов $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ ($0.18 < x < 0.25$, $0.37 < y < 0.53$) $E_g = 1.05 - 1.2$ эВ на подложках n-InP методом МОСГФЭ;
- 2) Исследовать свойства твердых растворов InGaAsP с $E_g \approx 1.05 - 1.15$ эВ;
- 3) Разработать технологию изготовления электрических контактов к p-InP;
- 4) Разработать конструкцию и технологию изготовления ФЭПМЛИ на 1.06 мкм на основе твердых растворов $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$;
- 5) Разработать технологию изготовления и исследование новых соединительных элементов на основе микрокристаллов для замены туннельного p-n перехода в каскадных ФП;

Научная новизна полученных результатов

- 1) Показано, что релаксация напряжений путем образования рельефа на поверхности позволяет избежать спинодального распада твердого раствора;
- 2) Показано, что снятие напряжений путем образования рельефа в слоях толщиной 150-200 нм приводит к уменьшению ширины спектров фотолюминесценции на полувысоте 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 полувысоте;
- 3) Показано, что последовательное выращивание слоев твердых растворов InGaAsP толщиной 150 -200 нм и InP толщиной 20 нм обеспечивает релаксацию напряжений и позволяет обеспечить толщину области поглощения более 1 мкм без ухудшения качества.

- 4) 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.
- 5) Предложен подконтактный слой InGaAs с $E_g=0.51$ эВ к InP:Zn p-типа, это приводит к уменьшению сопротивления в сравнении с традиционными контактами.
- 6) Показана возможность изготовления каскадного фотоприемника лазерного излучения, без туннельных p-n переходов, с использованием соединительных элементов на основе микрокристаллитов GaP.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, приведенных в работе, подтверждается большим количеством проведенных экспериментальных исследований с использованием современного высокоточного оборудования и аттестованных методик, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных, сопоставлением результатов исследований с данными, опубликованными другими авторами, работающими в данной области, а также использованием методов статистического анализа полученных данных.

Личный вклад автора

Представляемая диссертация является результатом завершенной научной работы, проведенной автором. В ней обобщены результаты исследований, полученных автором лично и в сотрудничестве с соавторами опубликованных трудов. Автору принадлежит основная роль в получении, анализе и обобщении результатов экспериментальных данных. Планирование экспериментов, обсуждение полученных результатов и формулирование выводов проводилось совместно научным руководителем диссертационной работы и соавторами опубликованных статей и докладов на конференциях.

Практическая значимость результатов заключается в следующем

- 1) разработана технология изготовления твердых растворов InGaAsP на подложках InP с $E_g = 1.0 - 1.2$ эВ методом ГФЭМОС;
- 2) разработана технология изготовления фотопреобразователей на основе твердых растворов InGaAsP с $E_g = 1.0$ эВ на подложках InP;
- 3) разработана технология изготовления новых соединительных элементов на основе микрокристаллитов GaP для каскадных фотопреобразователей для замены туннельных переходов на основе InP;
- 4) разработана технология изготовления электрических контактов к p-InP;
- 5) предложена перспективная конструкция каскадного фотоприемника мощного лазерного излучения;

Положения выносимые на защиту

1) Релаксация напряжений в слоях InGaAsP ($E_g=1.05 - 1.15$ эВ) путем образования рельефа на поверхности позволяет избежать спинодального распада твёрдого раствора;

2) Снятие напряжений путем образования рельефа в слоях толщиной 150-200 нм приводит к уменьшению ширины спектров фотолюминесценции на полувывсоте и росту ее интенсивности. Увеличение толщины области поглощения свыше 200 нм усиливает рельеф и неоднородность состава твердого раствора, что сопровождается падением интенсивности и увеличением ширины спектра фотолюминесценции на полувывсоте;

3) Последовательное выращивание слоев твердых растворов InGaAsP толщиной 150 -200 нм и InP толщиной 20 нм обеспечивает релаксацию напряжений и позволяет обеспечить толщину области поглощения более 1 мкм без ухудшения качества.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на 21 всероссийских и международных конференциях.

Публикации. По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 18 печатных работ в рецензируемых журналах индексируемых в Web of Science и Scopus, 4 патента РФ. Список работ размещен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все результаты работы, нашедшие отражение в научных положениях и заключении диссертации, получены автором лично. В исследованиях диссертанту принадлежит разработка технологических режимов и проведение экспериментов по МОС-гидридном эпитаксиальном выращиванию материала и приборных структур, обработка и анализ полученных данных, подготовка и написание статей.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 55 наименований. Общий объем работы составляет 111 страниц, включая 70 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных в данной работе исследований показана научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава содержит краткий обзор литературы по теме диссертационной работы, на начальный период работы(2012г.). В литературном обзоре приводится обоснование выбора длин волн для фотоприемника мощного лазерного излучения,

обоснование выбора материала для ФЭПМЛИ и обоснование выбора конструкции ФЭПМЛИ.

Наиболее подходящими длинами волн для фотоприемника мощного лазерного излучения являются длины волн доступных мощных лазеров, попадающих в область пропускания земной атмосферы: 1.06, 1.33 и 1.55 мкм. Спектры пропускания земной атмосферы представлены в работе [5].

Анализ пригодности различных типов лазеров, на данных длинах волн, для применения в Системах передачи энергии(СПЭ) показал что наиболее подходящими являются твердотельные лазеры Nd: YAG (1.064 мкм). На момент начала работы объем литературных данных в области технологии фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения на длину волны 1.06 мкм крайне ограничен и были в большей степени посвящены маломощным фотоприемникам:

- Известны работы, в которых лабораторные фотоэлектрические преобразователи энергии были изготовлены на основе четверных твердых растворов InGaAsP и мощностью преобразуемого меньше 10 мВатт, что не подходит для преобразования излучения на длину волны 1.06 мкм больших мощностей [6,7,8].
- Английскими учеными был опубликован ряд работ, в которых были представлены результаты фотопреобразователя с поглощающим слоем на основе InGaAsP [9] с эффективностью 7% при интенсивности 0,5 Вт/см² на длине волны 1.06 мкм.

Вышеописанные фотоприемники не подходят для преобразования больших мощностей, т.к. при преобразовании излучения большой мощности, в следствии низкого КПД фотоприемников большая часть излучения пойдет на нагрев, что приведет к разрушению фотоприемников.

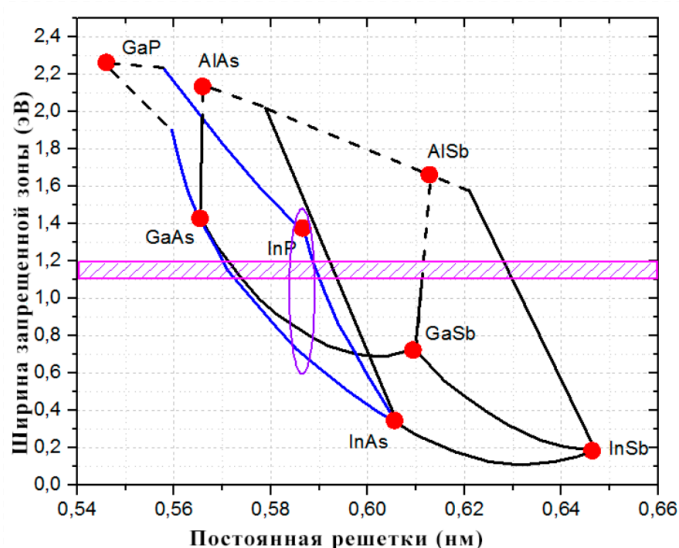


Рисунок 1 - Диаграмма зависимости ширины запрещённой зоны от постоянной решётки для полупроводников A₃B₅.

Для ФЭПЛИ на 1.06 мкм среди известных в настоящее время полупроводниковых материалов $A^{III}B^V$ подходящими видятся твердые растворы GaInAsP на подложке InP (рис.1), которые имеют ряд преимуществ по сравнению с другими системами материалов.

Основные причины выбора твердых растворов на основе InP:

- 1) Твердые растворы на основе GaSb, а именно AlGaAsSb и AlGaPSb могут быть получены современными методами, но использование твердых растворов с алюминием снижает сроки гарантийной эксплуатации прибора. Кроме этого, подложки на которых могут быть получены такие растворы (InAs, GaSb) непрозрачны для излучения 1,06 мкм, что предполагает освещение только с лицевой стороны. Это обстоятельство увеличивает долю потерь (поглощение на сетке контактов и на сопротивлении растекания).

- 2). Твердые растворы на основе InAs, типа InPSb и GaPSb, находятся в области несмешиваемости и их изготовление затруднено в настоящее время.

- 3) На подложках из InP возможно выращивание твердых растворов InGaPAs с шириной запрещенной зоны 1.05-1.15 эВ (1.065 мкм соответствует 1.16 эВ) и эти материалы имеют прямую структуру зон. Кроме этого, подложка прозрачна для интересующей длины волны $\lambda = 1.064$ мкм и, следовательно, возможно облучать фотоприемник со стороны подложки.

На основе анализа существующих, на момент начала работ, ФЭПМЛИ предложена концепция п/п ФЭПМЛИ, представленная ниже:

Область поглощения.

- 1.Ширина запрещенной зоны материала должна быть в диапазоне 1.05 – 1.15 эВ (300К) т.е. край поглощения должен соответствовать длине волны излучения лазера -1.06 мкм, n и p - слоев.

2. Толщина области(слоя) поглощения определяется по формуле Бугера Ламберта Бера и при коэффициенте межзонного поглощения $(2-5) \cdot 10^4$, для поглощения 99%, составит не менее 1,5 мкм.

Электрические контакты.

- 1.Удельное контактное электрическое сопротивление должно быть возможно минимальным.

2. Площадь контактной сетки со стороны засветки (со стороны подложки) должна быть не более 10% приемной площади, толщина подложки порядка 300 мкм n-типа($n-1-3 \cdot 10^{18}$).

3. Контакт со стороны теплоотвода на поверхности структуры сплошной. Толщина и состав контакта должен позволять монтаж на теплоотводе.

Просветление.

1. Просветляющее покрытие сплошное и только со стороны засветки.

С учетом вышеизложенных желаемых характеристик выбрана следующая гетероструктура фотоприемника:

Двойная гетероструктура (ДГС), область поглощения на основе твердого раствора GaInPAs ($E_g = 1.05 - 1.2$ эВ) изопериодного к InP, толщиной около 3.5 мкм. Подложка InP (100) $n=(2-5) \cdot 10^{18}$ см.куб. толщиной 250-300 мкм, полированная с обеих сторон.. Ввод излучения через подложку.

Во второй главе приведено обоснование использования метода изготовления гетероструктуры ФЭП. Обосновано использование метода газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений(МОСГФЭ), описание установки роста AIXTRON AIX-200, исходные реагенты.

В третьей главе проведен теоретический анализ существования зоны стабильных твердых растворов с шириной запрещенной зоны 1.05-1.15 эВ на доступных подложках из InP.

Представление о положении границ областей несмешиваемости получены из теоретических исследований. Так, Онабэ[10] провёл расчёты областей спиноподального распада для четверных систем твёрдых растворов $A^{III}B^V$ с использованием модели регулярных твёрдых растворов для большинства широко используемых в полупроводниковой электронике систем твёрдых растворов $A^{III}B^V$ рис. 2.

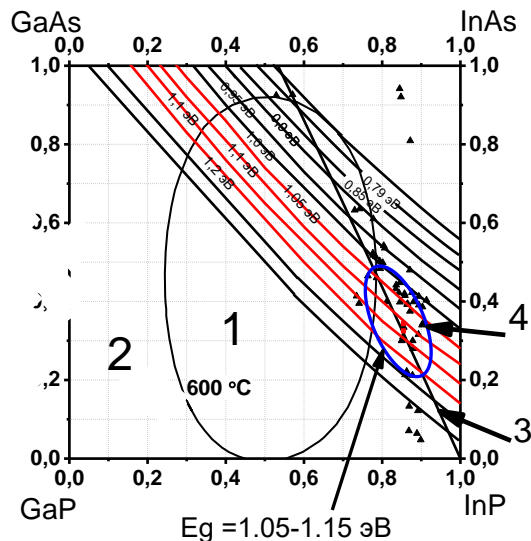


Рисунок 2 - Диаграмма фазового распада для GaInAsP. Область 1 - область спиноподального распада; Область 2 – область стабильных твердых растворов; 3- подложка InP; 4- области технологических исследований.

С точки зрения изготовления твёрдых растворов наличие области несмешиваемости при температуре роста приводит к тому, что составы внутри области несмешиваемости при данной температуре не могут быть получены равновесными методами. Вместо твёрдых растворов с составами внутри области несмешиваемости формируются как правило две фазы.

Приведена оценка критической толщины твердых растворов не испытывающих распад и предложен метод изготовления толстых слоев.

В четвертой главе изложена технология изготовления твердых растворов InGaAsP Eg~1.0-1.2 эВ методом МОСГФЭ и исследованиям их.

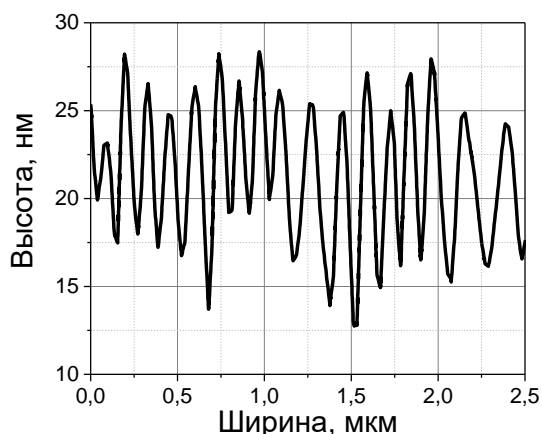
Были проведены работы по определению оптимальных условий роста и легирования слоев на образцах InP на подложке InP. Оптимальные условия роста были использованы при выращивании слоев твердых растворов.

Слои InGaAsP выращивались при оптимальных условиях: $T_p = 600$ °С, давление в реакторе $P = 100$ мбар, несущий газ – водород (H₂), его полный поток составляет $F_c = 5$ л/мин. Источник триметилиндия (TMIn) находился при температуре $T_{In} = 17$ °С, поток составил $F_{TMIn} = 2,564 \cdot 10^{-5}$ моль/мин. Источник триэтилгаллий (TEGa) находился при температуре $T_{Ga} = 17$ °С, поток составил $F_{TEGa} = 3,064 \cdot 10^{-6}$ моль/мин. Поток фосфина (PH₃) – $F_{PH3} = 2,232 \cdot 10^{-5}$ моль/мин. Поток арсина (AsH₃) – $F_{AsH3} = 1,696 \cdot 10^{-3}$ моль/мин. Отношение компонентов V к III группе – 300.

При исследовании твердых растворов с составами вблизи области спинодального распада, необходимо учитывать, что возрастает вероятность образования в области поглощения фаз с непрерывно меняющимся составом.

Исходя из того, что в слоях напряжения могут частично релаксировать путем образования рельефа на поверхности проводился анализ морфологии поверхности слоев на атомно-силовом микроскопе(рис.3). Выяснено что в слоях с толщинами от 50 до 200 нм с ростом толщины наблюдается увеличение рельефа при этом увеличивается интенсивность фотолюминесценции и уменьшается ширина пика на полувысоте(рис.4).

(а)



(б)

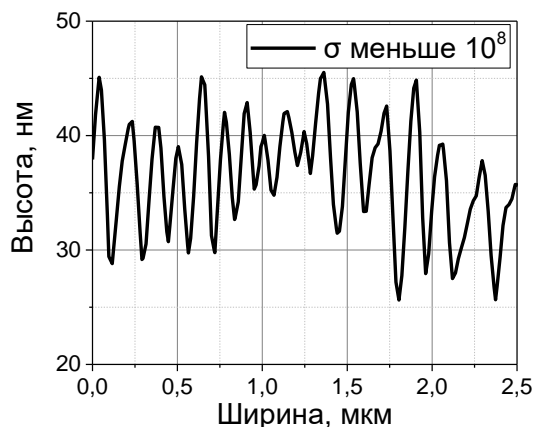


Рисунок 3 - Объёмное изображение поверхности слоев и профилей сечения полученное методом атомно-силовой микроскопии(АСМ): (а) d(толщина слоя)-50 нм, S – 5 мкм x 5 мкм; (б) d(толщина слоя) -200 нм, S – 5 мкм x 5 мкм.

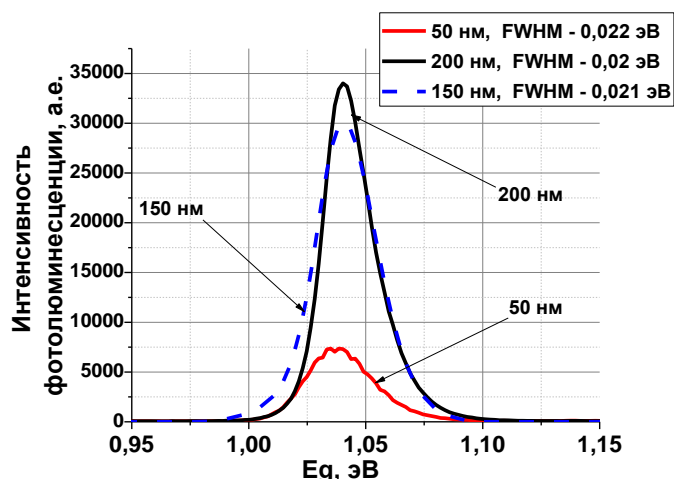


Рисунок 4 - Спектры фотолюминесценции слоев InGaAsP с толщиной 50-200 нм.

В слоях с толщиной ≥ 200 нм наблюдается усиление рельефа поверхности. Из профиля рельефа проведены оценки напряжений, снятых путем образования этого рельефа по формуле[11]:

Оценка напряжений

$$\sigma = 2Gh^2/L_dL_0$$

где σ — напряжения, G — модуль сдвига, h — высота гребня, L_d — расстояние между гребнями, L_0 — ширина у основания гребня.

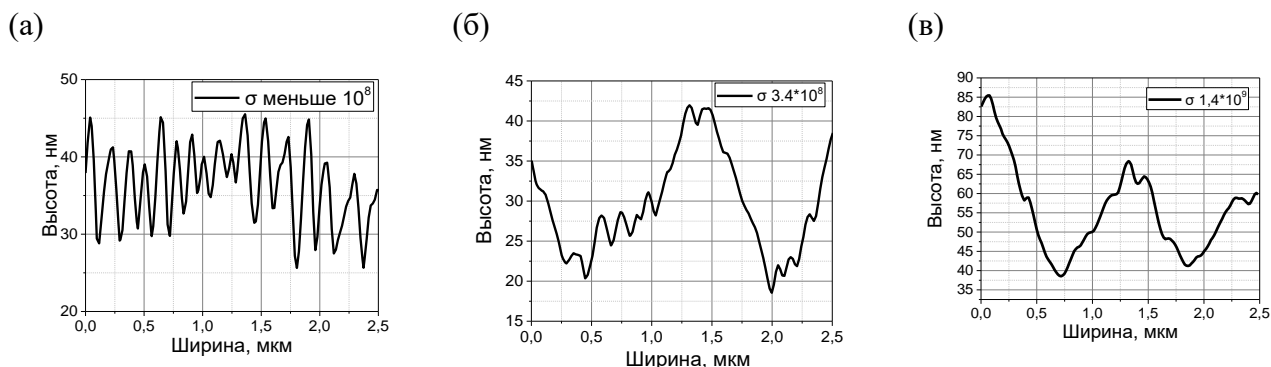


Рисунок 5 - Объёмное изображение поверхности слоев и профилей сечения полученное методом атомно-силовой микроскопии(АСМ): (а) d-200 нм, S – 5 мкм x 5 мкм; (б) d-500 нм, S – 5 мкм x 5 мкм; (в) d-1000 нм, S – 5 мкм x 5 мкм.

Так с релаксацией напряжений происходит увеличение рельефа(рис.5), падает интенсивность, увеличивается ширина на полувысоте и происходит сдвиг пика спектра фотолюминесценции (рис. ба). При этом во всем диапазоне исследуемых толщин спинодального распада не наблюдается, что подтверждается кривыми качания полученные методом рентгеновской дифрактометрии(рис. 6б) и спектроскопии анизотропного отражения(рис. 6в).

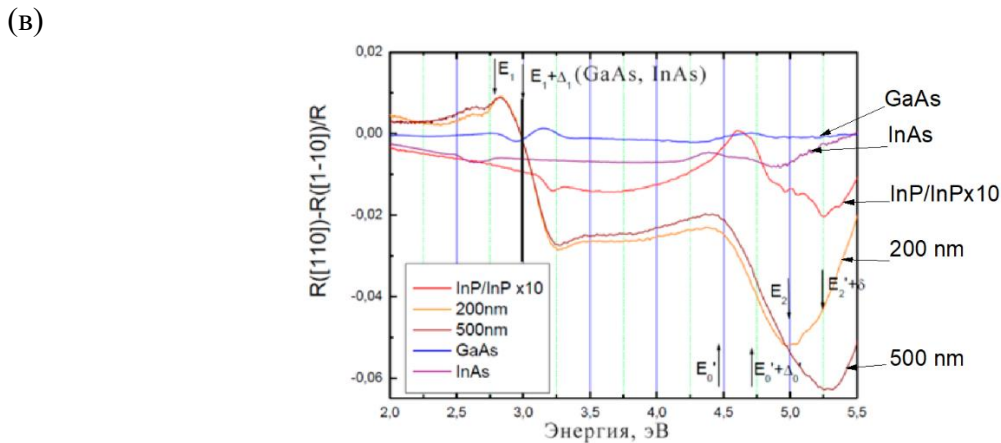
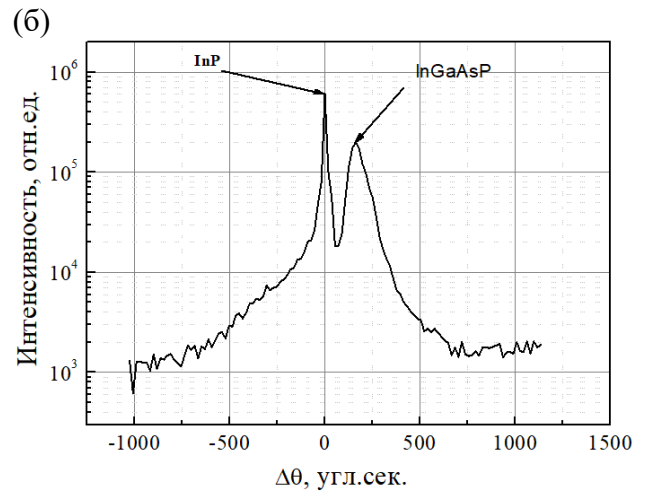
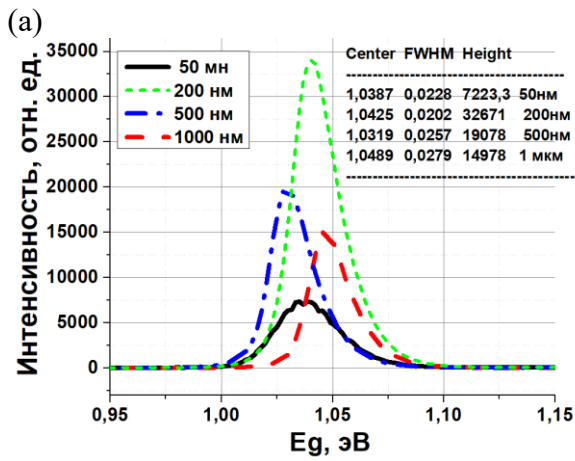


Рисунок 6 - (а) Спектры фотолюминесценции слоев InGaAsP с толщиной 50-1000нм; (б) Кривая качания слоя InGaAsP с толщиной 1000нм, полученная методом рентгеновской дифрактометрии InGaAsP с толщиной 50-1000нм; (в) Спектры анизотропного отражения слоев твердых растворов $\text{In}_{0,80}\text{Ga}_{0,20}\text{As}_{0,44}\text{P}_{0,56}$ с $E_g \sim 1.05$ эВ

На основе проведенных исследований наиболее качественными получаются слои в диапазоне толщин 150-200 нм. Однако толщина области поглощения в 200 нм недостаточна для фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения т.к. по закону Бугера-Ламберта-Бера должна составлять ≥ 2.5 мкм. Поэтому для создания ФЭПМЛИ было предложено использовать составную активную область с чередованием слоев InGaAsP толщиной 200 нм и InP толщиной 20 нм (рис. 7а). Были выращены и исследованы предложенные структуры. Данный способ позволяет выращивать область поглощения с толщиной более 1 мкм без ухудшения его качества, о чем говорит: увеличение интенсивности фотолюминесценции, уменьшение полуширины (рис. 6б). (Патент RU(11) 178900(13)U1).

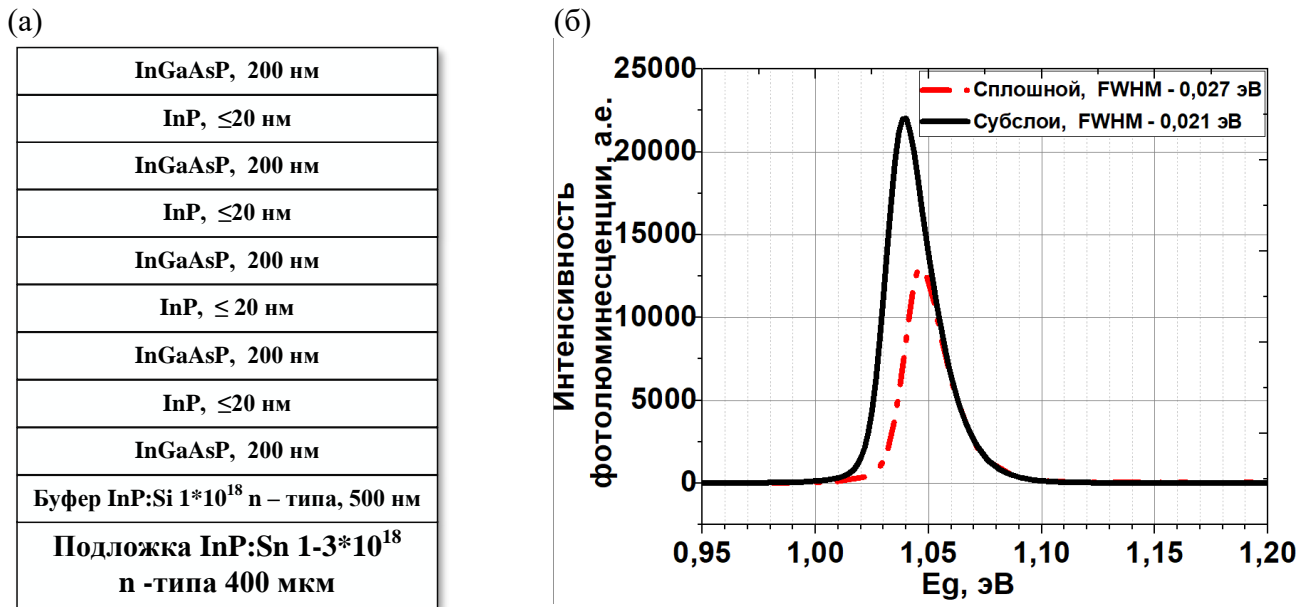


Рисунок 7 - (а) Общий вид полупроводниковой гетероструктуры; (б)Спектры фотолюминесценции структуры без субслоев и с субслоями.

В главе пять изложена технология изготовления ФЭПМЛИ с вводом излучения со стороны подложки. Структура ФЭПМЛИ показана на рис. 12. Ширина запрещенной зоны InP ($E_g \sim 1.34$ эВ при $T=300$ К) превосходит ширину запрещенной зоны $E_g \sim 1.05$ эВ для фотоактивного слоя получения р-п-перехода в GaInAsP. Подложка прозрачна для излучения на длине волны $\lambda = 1.064$ мкм (рис. 8).

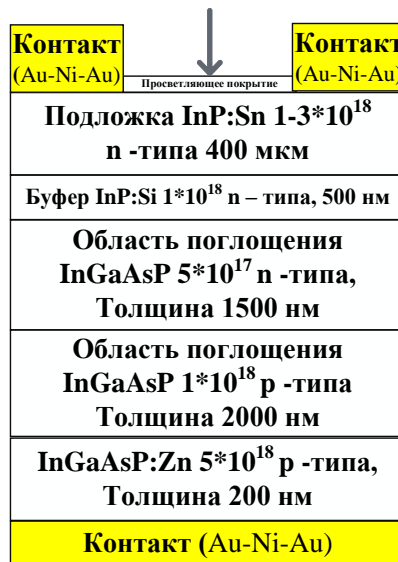


Рисунок 8 - Структура ФЭП ЛИ на основе $In_{0,80}Ga_{0,20}As_{0,44}P_{0,56}$ ($E_g \sim 1.05$ эВ) с инверсной засветкой.

Спектральная чувствительность показанной структуры представлена на рис. 9а.

Характеристики фотоэлектрического преобразователя на основе GaInAsP/InP площадью $3.5 \times 3.5 \text{ мм}^2$ представлены на рис. 9б. При мощности лазера 10 Вт/см^2 обеспечивается КПД 34.5%.

Образец ФЭПМЛИ показал перспективность этого направления, но не должен рассматриваться как идеальный, т.к. нет просветления, электрические контакты не оптимальные и в его конструкции нет возможности преодолеть эффект «насыщения» (концентрация генерируемых излучением носителей равна концентрации собственных носителей в материале области поглощения). Для преодоления недостатков была предложена каскадная конструкция ФЭПМЛИ, т.е. имеющая несколько поглощающих областей.

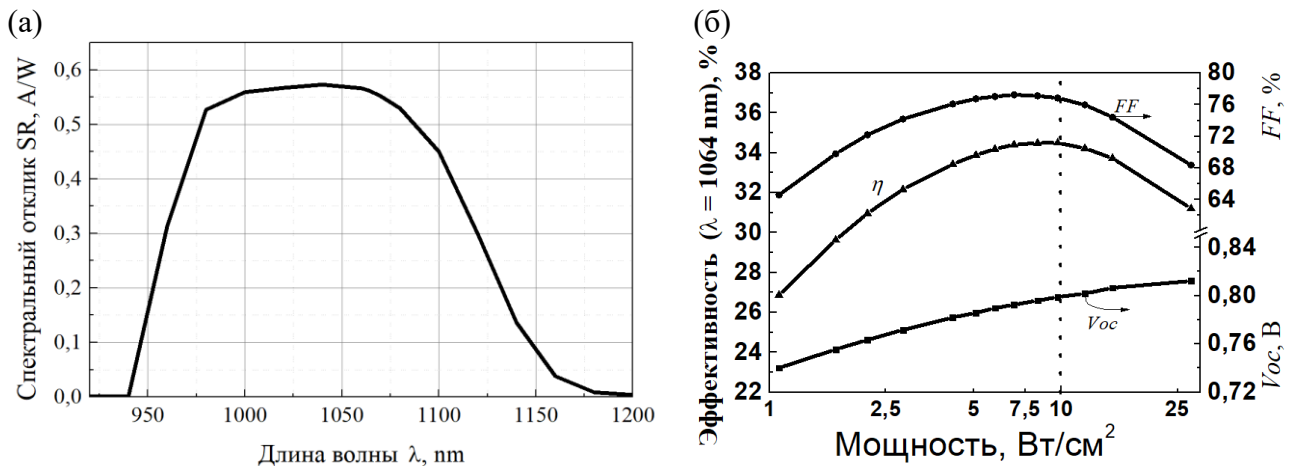


Рисунок 9 – (а) Спектральная чувствительность ФЭПМЛИ с инверсной засветкой; (б) Зависимость кпд, V_{oc} и FF от мощности ЛИ при равномерном облучении

В главе шесть предложена конструкция каскадного ФЭПМЛИ и методика его изготовления. Для исключения эффекта насыщения [12] предпочтительно использовать каскадные фотоприемники. В этом варианте исключается эффект «насыщения», уменьшается ток, т.к. возрастает напряжение и, следовательно, уменьшаются потери на сопротивление, уменьшается емкость и возрастает рабочая частота, что важно в случаях оптической связи.

Обычно в качестве соединительного элемента каскадов ФЭП используется туннельный $p^{++}-n^{++}$ переход. Однако при значительном увеличении мощности падающего излучения генерируемый фоток превышает пиковый ток туннельных переходов, что приводит к возрастанию сопротивления структуры и, следовательно, снижется эффективность преобразования излучения.

Кроме этого изготовления туннельного перехода в InP связано с необходимостью сильного легирования более 10^{19} см^{-3} , особенно p – области, что создает вероятность расплывания границ в следствии высокой скорости диффузии Zn при изготовлении p - области.

Возможным путем решения этих проблем является замена туннельных переходов на каналы проводимости, получаемые посредством создания массива микрокристаллических включений в области объемного заряда (ООЗ) между

соседними фотоактивными p–n-переходами. В этом случае в каналах проводимости обеспечивается линейная зависимость протекающего тока.

Материал микрокристаллических включений для создания каналов проводимости в области объемного заряда должен удовлетворять следующим условиям: 1. Слабое оптическое поглощение преобразуемого излучения, преобразуемое нижележащими активными слоями. 2. Не должен образовывать на границе с фотоактивным материалом монокристаллического слоя, а только отдельные кристаллы с оптимальными размерами. 3. Толщина слоя микрокристаллитов должна быть не менее области ОПЗ p-n перехода

Для InP этим условиям удовлетворяет GaP. Он имеет ширину запрещенной зоны 2.261 эВ больше, чем у InP (1.351эВ) и, следовательно, имеет слабое поглощение света в области фоточувствительности InP, а постоянная кристаллической решетки GaP 5.45117Å (у InP -5.86875Å), что гарантирует получение кристаллитов, а не монокристаллического слоя.

На первом этапе были проведены эксперименты по изготовлению микрокристаллитов. В результате анализа поверхности полученных образцов было установлено, что увеличение времени роста при постоянном соотношении PH_3/TEGa приводит к увеличению средних геометрических размеров микрокристаллов GaP (по высоте в среднем на 40%, а по ширине в среднем на 15%) рис. 10.

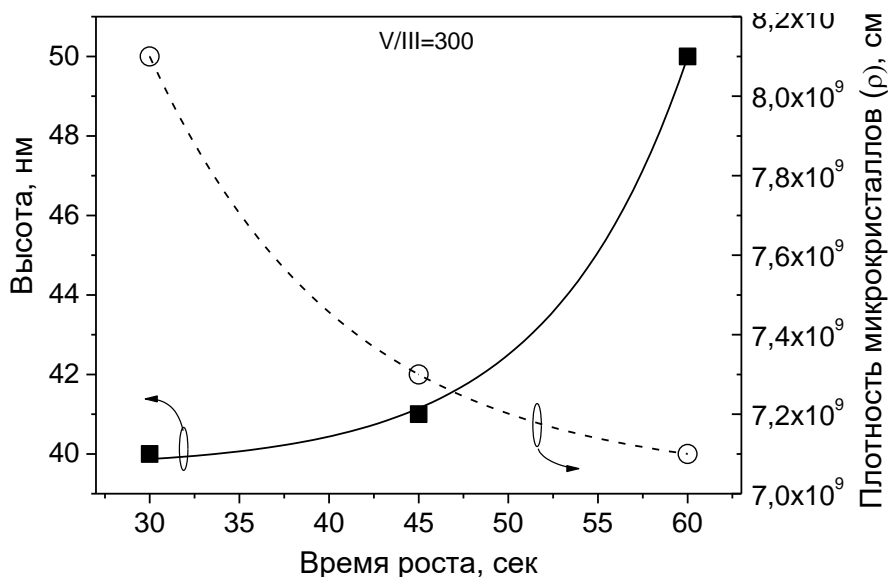


Рисунок 10 - Зависимости: высоты и плотности микрокристаллов GaP выращенных при соотношении V/III=300;

Для проверки работы микрокристаллитов GaP были изготовлены два типа структур, представленные на рис. 11 а - p-n переход на основе InP, n и p слои имели концентрацию $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщину 1 μm ; б - p-n переход на основе InP с кристаллитами GaP, включенными в ООЗ, n и p слои имели концентрацию $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщину 1 μm , а толщина кристаллитов была равна 80 nm .

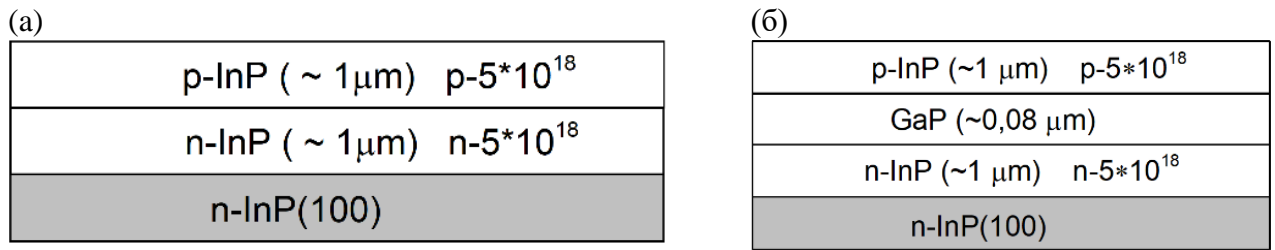


Рисунок 11 - Схематические изображения структур, выращенных на n - InP подложках: (а) - p+-n+ переход; (б) - соединительный p+-n+ переход с кристаллитами GaP в ООЗ.

Измерения ВАХ проводились при комнатной температуре в диапазоне плотностей тока $10^{-8} \sim 4 \cdot 10^1$ А/см² и представлены на рис. 12а где: 1 - ВАХ p-n перехода без кристаллитов в ОПЗ (рис. 12.а-1); 2 - ВАХ p-n перехода с кристаллитами, включёнными в ОПЗ и имеет линейный характер (рис. 12а-2).

На рис. 12б представлены зависимости сигнала ТИЭЗ исследуемых структур, p-n перехода без кристаллитов в ООЗ (рис. 12б-1) и p-n перехода с кристаллитами, включёнными в ООЗ (рис. 12б-2). Из зависимостей видно, что введение кристаллитов в ООЗ приводит к закорачиванию p-n перехода.

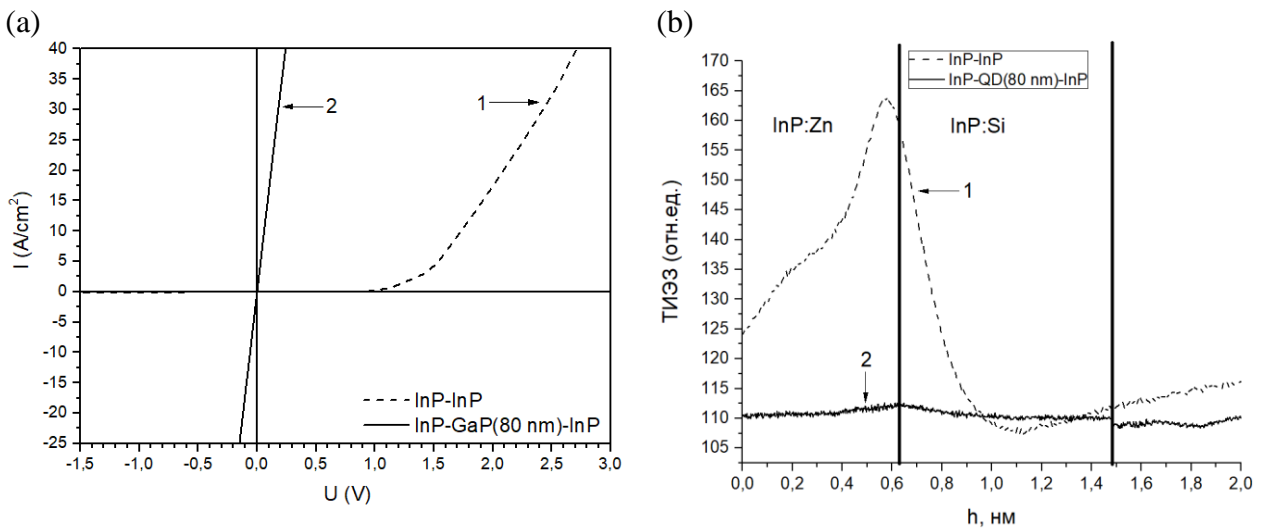


Рисунок 12 – (а) ВАХ; (б) - зависимости ТИЭЗ структур на основе InP, выращенных на n-подложках. 1- p-n переход; 2- p-n переход с GaP- кристаллитами в ООЗ.

Слои InP выращиваемые на поверхности микрокристаллитов обычно имеют большое количество дефектов. Для улучшения качества слоя InP, было предложено выращивать слои InP в виде многослойной структуры, состоящей из слоев InP с толщиной не более 200 нм, что резко уменьшает количество дефектов. (Патент РФ: #2781507 от 12 октября 2022 г.)

Качество слоя на поверхности оценивалось методом фотолюминесценции и результаты представлены на рис. 13а. При исследовании полученных структур методами фотолюминесценции, обнаружено, что при увеличении количества

прерываний в процессе роста слоя InP:Zn, выращенного поверх микрокристаллитов GaP, улучшается качество слоя InP. Об этом говорит уменьшение полуширины спектров фотолюминесценции(рис. 13а), увеличения интенсивности (рис. 13б).

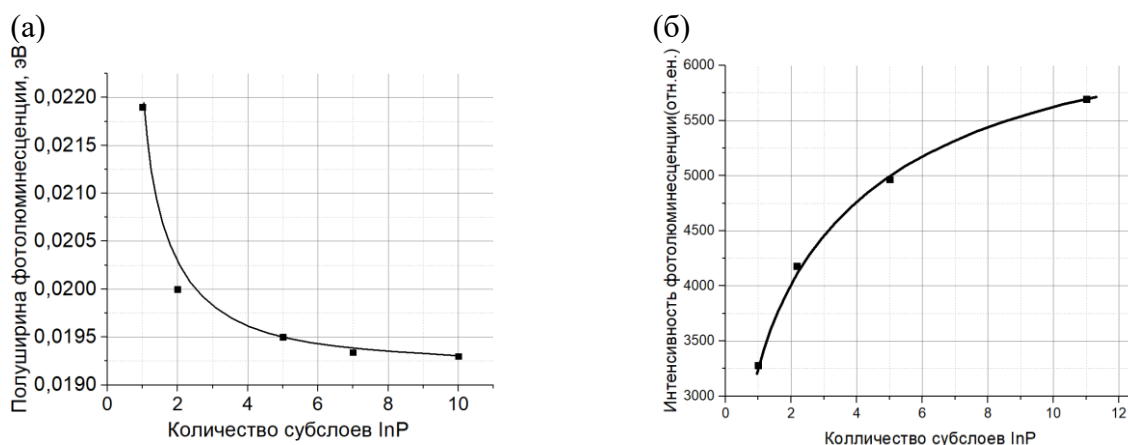


Рисунок 13 - (а) График зависимости полуширины фотолюминесценции от количества субслоев; (б) График зависимости интенсивности фотолюминесценции от количества субслоев.

Для уменьшения высоты барьера и контактного сопротивления к p-InP предложено использовать подконтактный материал с меньшей шириной запрещённой зоны, такой как $\text{In}_{0,47}\text{Ga}_{0,53}\text{As}$. Построена нормированная теоретическая зависимость сопротивления электрических контактов нанесенных на твердые растворы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y$ p-типа с различным составом.

При этом наименьшее сопротивление приходится на состав с $E_g - 0,52$ эВ ($\text{In}_{0,79}\text{Ga}_{0,21}\text{As}$) и составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² (рис.14) (Патент РФ: RU 178900 U1 от 2017.12.15).

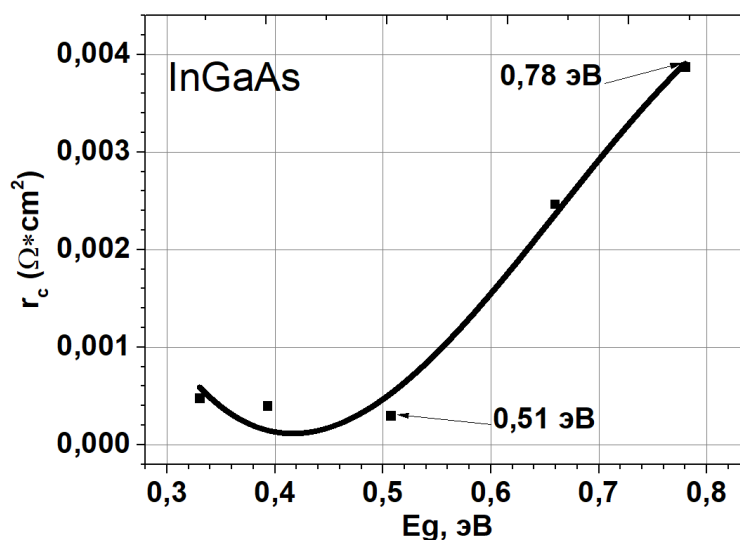


Рисунок 14 - График зависимости удельного сопротивления контактов AgMn/Ni/Au от E_g материала подконтактного слоя. Линия показывает зависимость сопротивления для подконтактного слоя InGaAs.

Контакт к n-InP(подложка) был изготовлен на основе Au-Ni-Au.

Просветление наносили на освещаемую поверхность(подложка InP) методом анодирования, толщиной $\sim 1/4\lambda$ на основе oxide InP.

На основе проведенных ранее исследований и экспериментов по изготовлению ФЭПМЛИ, была предложена каскадная модель ФЭП, состоящий из последовательно соединенных фотоэлектрических преобразователей. На рис. 15 для примера представлена структура такого ФЭП с 2-мя активными p-n переходами и ее характеристики(рис. 16а, рис. 16б).

Данная конструкция ФЭП решает несколько проблем:

Уменьшается вероятность эффекта «насыщения» за счет разделения преобразуемого светового потока. Предложено область разделить на несколько областей. В предлагаемом варианте это 2 области;

Уменьшение электрической ёмкости и, следовательно, повышение частотны характеристик, для цепей передачи сигналов.

Уменьшение потерь на нагрев вследствие уменьшения фототока.

Уменьшение тока будет равно количеству областей поглощения.

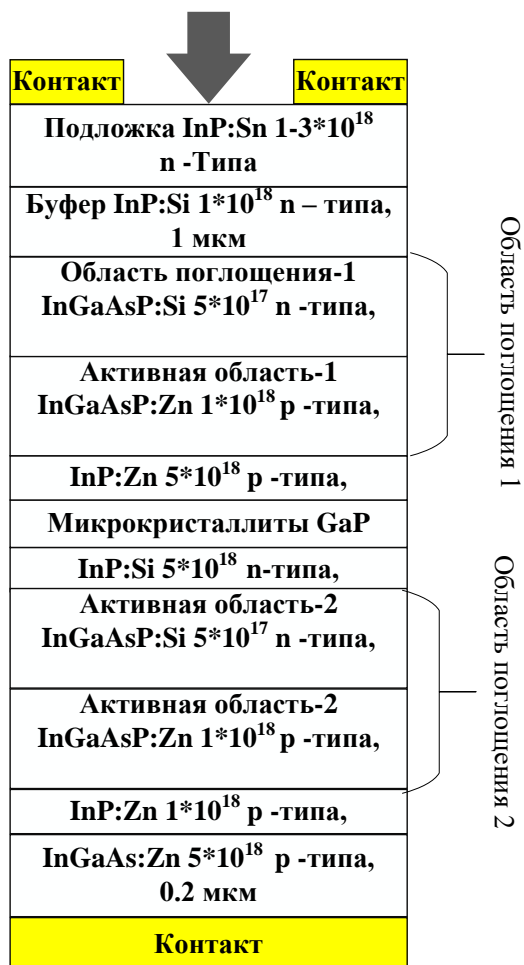


Рисунок 15 - Структура ФЭП с 2-мя p-n переходами на основе InGaAsP (1.05-1,15 эВ). Суммарная толщина области поглощения 1 – 0,52 мкм. Суммарная толщина области поглощения 2 – 3,02 мкм.

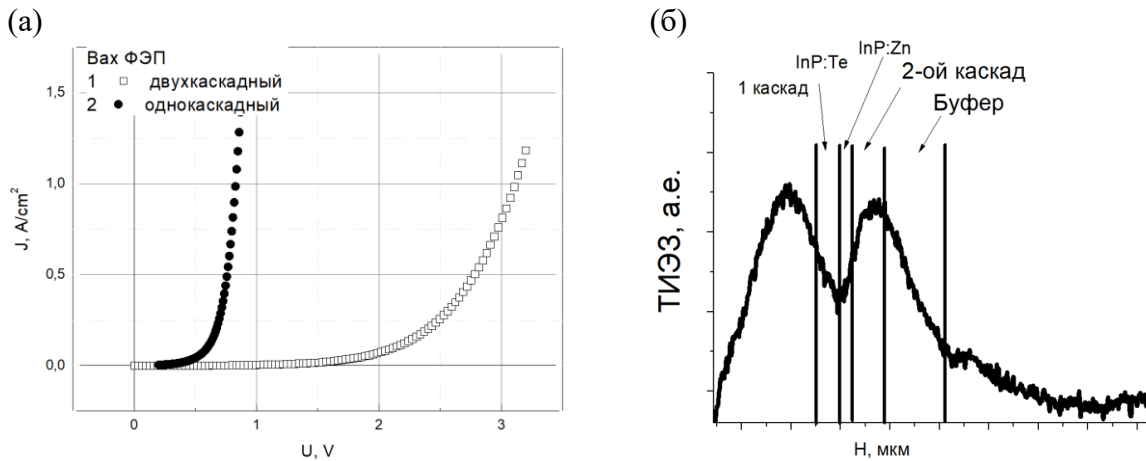


Рисунок 16 – (а) ВАХ ФЭП с 2-мя р-п переходами на основе InGaAsP (1.05-1.15эВ); (б) Спектр ТИЭЗ двухкаскадного фотоприемника.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

- 1) Разработана технология изготовления твёрдых растворов InGaAsP ($E_g = 1.0 - 1.2$ эВ) вблизи области спинодального распада n и p типа методом МОСГФЭ на подложках InP.
- 2) Релаксация напряжений путем образования рельефа на поверхности позволяет избежать спинодального распада твёрдого раствора;
- 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/см^2 .
- 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 р-п переходов, с использованием соединительных элементов на основе микрокристаллитов GaP.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

- 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
- 2) **Marichev АЕ**; 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), 23–27 November 2015, St. Petersburg, Russia
- 3) **Marichev АЕ**; 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), 28–30 March 2016, St Petersburg, Russia
- 4) **Marichev АЕ**; 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
- 5) **Marichev АЕ**; 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
- 6) **Marichev АЕ**; 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
- 7) Epoletov VS; **Marichev АЕ**; 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; 22–24 October 2019
- 8) Epoletov VS; **Marichev АЕ**; 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
- 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

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

Патенты:

- 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 многопереходного 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..

Список используемой литературы

- 1) https://scintillators.ru/booc/Si_photodiode.pdf
- 2) http://particle.korea.ac.kr/doc/Si_photodiode.pdf
- 3) <http://www.advante.ru/docs/hamamatsu/Si%20photodiodes.pdf>
- 4) <https://avenston.com/ru/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells>
- 5) Зуев В. Е., Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей, М., 1966
- 6) H.D.Law, W.W.NG, K.Nakano, Dapkus, “High Wfficiency InGaAsP Photovoltaic Power Converter” IEEE Electron Device Letters, vol. EDL-2, No.2, February 1981
- 7) Jizhao Zang, Zhanyu Yang, Xiaojun Xie, Min Ren, Yang Shen, Zack Carson, Olivier Pfister, Andreas Beling, and Joe C. Campbell, “High quantum efficiency uni-traveling-carrier photodiode”, 1041-1135 (c) 2016 IEEE.
- 8) Jizhao Zang, Zhanyu Yang, Xiaojun Xie, Min Ren, Yang Shen, Zack Carson, Olivier Pfister, Andreas Beling, and Joe C. Campbell, “High quantum efficiency uni-traveling-carrier photodiode”, 1041-1135 (c) 2016 IEEE.
- 9) Emziane M., Nicholas R.J., Rogers D.C., Dosanjh J. Investigation of InGaAsP-based solar cells for double-junction photovoltaic devices// Thin Solid Films, 2008, v. 516, p.6744–6747
- 10) Onabe K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1982. V. 21. N 5. P. 797–798
- 11) Гегузин Я.Е.// Диффузионная зона. М.: Наука.1979. 343С
- 12) К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ, О.Н. КРОХИН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия