На правах рукописи

ЧЕРНОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ

МЕТАМОРФНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InSb/InAs/In(Ga,Al)As НА ПОДЛОЖКАХ GaAs ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА 2.0–4.5 МКМ

Специальность 01.04.10 — физика полупроводников

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2021 Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:	Иванов Сергей Викторович Доктор физико-математических наук, профессор ФТИ им. А.Ф. Иоффе Директор Института
Официальные оппоненты:	Жуков Алексей Евгеньевич Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург Научный руководитель международной лабора- тории квантовой оптоэлектроники
	Васильевский Иван Сергеевич доктор физико-математических наук, доцент НИЯУ МИФИ

Профессор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ), Санкт-Петербург

Защита состоится "____ 2021 г. в ____ часов ____ минут на заседании диссертационного совета 34.01.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте <u>www.ioffe.ru</u>

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан "____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

<u>Актуальность темы</u>. Средний инфракрасный (ИК) диапазон по-прежнему представляет значительный научный и практический интерес в силу наличия в нём окон прозрачности атмосферы (3–5 и 8–12 мкм), а также интенсивных линий поглощения многих природных и промышленных газов. Особую нишу занимают полупроводниковые источники среднего ИК диапазона 2–5 мкм, широко использующиеся в медицине, экологическом мониторинге окружающей среды, средствах связи и оборонном комплексе [1].

На сегодняшний день основные подходы к созданию таких источников излучения заключаются в использовании светодиодных и дазерных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) типа I или типа II, а также квантово-каскадных лазеров (ККЛ) на межподзонных оптических переходах. В частности, на основе гетероструктур InGaAsSb/AlInGaAsSb типа I в лаборатории Stony Brook University, США, были получены лазерные диоды (ЛД), излучающие в непрерывном режиме на длинах волн 2.00-3.25 мкм с высокой выходной мощностью 1.96-0.36 Вт [2]. Группой из Naval Research Laboratory, США, были реализованы ЛД InAs/InGaSb с W-образной структурой энергетических зон, излучающие в непрерывном режиме на длине волны 3.5 мкм с выходной мощностью вплоть до 592 мВт [3], а группой из University Montpellier II, Франция, разработаны ККЛ на основе гетероструктур InAs/AlSb с длиной волны излучения 3.22 мкм при температуре 423 К [4]. Несмотря на значимые результаты, достигнутые в данном направлении, следует отметить, что каждому из вышеперечисленных подходов присущи некоторые недостатки, ухудшающие выходные характеристики ЛД. Так, например, в случае систем типа I негативную роль играют такие физические процессы как Оже-рекомбинация, поглощение на свободных носителях заряда (НЗ), а также тепловой выброс НЗ с энергетических уровней упругонапряжённых КЯ в состояния континуума волноводных слоёв [5]. Характерной особенностью систем типа II является малое перекрытие электронных и дырочных волновых функций, обусловленное пространственным разделением НЗ в W-активной области, а основными недостатками ККЛ является сложность их технологической реализации и высокие управляющие напряжения. При этом, минимальная длина волны излучения ККЛ на основе традиционной системы GaAs/AlGaAs ограничена 8 мкм [6].

Кроме того, все вышеперечисленные подходы подразумевают использование подложек GaSb или InAs, согласованных по параметру решётки с активной областью. В то же время особый интерес представляет возможность изготовления светодиодов и ЛД среднего ИК диапазона (2–5 мкм) на сильно рассогласованных, но широкодоступных, более прочных и в несколько раз более дешёвых подложках GaAs. Для решения данной задачи применяется технология метаморфного роста, суть которой заключается в использовании относительно толстого (1.0–1.4 мкм) метаморфного буферного слоя (МБС) твёрдого раствора переменного состава для создания низкодефектной упруго ненапряжённой виртуальной подложки (ВП) [7]. ВП необходима для формирования на ней псевдоморфных слоёв излучающей гетероструктуры, включая активную область.

Данная диссертационная работа посвящена разработке нового подхода к созданию источников излучения среднего ИК диапазона (2.0-4.5 мкм) на подложках GaAs(001), основанного на использовании метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs, которые сочетают в себе преимущества волноводных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) InAs/InGaAs/InAlAs типа I с активной областью типа II, представляющей собой одну или несколько суб-монослойных (суб-MC) вставок InSb в КЯ InAs. Такая активная область InSb/InAs, апробированная ранее в работах [8–10], обеспечивает пространственно-непрямые оптические переходы с электронного уровня в КЯ InAs/InGaAs типа I на дырочный уровень в КЯ InSb/InAs типа II с длиной волны излучения, варьируемой в диапазоне 2.0-4.5 мкм. Таким образом, гетероструктуры InSb/InAs/InGaAs/InAlAs обеспечивают хорошее электронное и оптическое ограничение в активной области и состоят лишь из бинарных и тройных соединений In(Ga,Al)As с одним компонентом V группы. Это упрощает технологический контроль состава и упругих напряжений по сравнению с твёрдыми растворами, содержащими два элемента V группы (As, Sb). W-образная активная область в виде КЯ InSb/InAs типа II в КЯ InAs/InGaAs типа I, во-первых, дополнительно усиливает дырочное ограничение, что позволяет снизить вероятность их теплового выброса в КЯ InAs, во-вторых, практически не препятствует эффективному перекрытию электронных и дырочных волновых функций в активной области ввиду малой толщины InSb (~1 MC), и, в-третьих, позволяет варьировать длину волны в широких пределах (2.0-4.5 мкм) только за счёт изменения номинальной толщины вставки InSb (0-1.5 MC) при неизменной конструкции всей остальной гетероструктуры.

Целью работы являлась разработка технологии роста методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs(001) и конструкции низкодефектных (не более 10⁷ см⁻²) метаморфных двойных гетероструктур InAlAs/InGaAs с квантоворазмерной W-образной активной областью InSb/InAs/InGaAs, обладающих высокой эффективностью люминесценции, для источников спонтанного и стимулированного излучения среднего ИК диапазона (2.0–4.5 мкм), а также комплексное исследование их структурных, электронных и люминесцентных свойств.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

 Развитие на подложках GaAs(001) МПЭ технологии МБС In_xAl_{1-x}As с линейным и корневым профилем изменения состава с максимальным содержанием индия x_{max} ≥ 0.75 с целью получения на его основе гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As с малой шероховатостью поверхности и низкой плотностью протяжённых дефектов (не более 10⁷ см⁻²) в активной области. Выбор оптимального профиля изменения состава MБС InAlAs.

- 2. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов релаксации упругих механических напряжений в метаморфных гетероструктурах InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001) в зависимости от конструкции МБС, состава ВП и дизайна активной области. Оптимизация конструкции метаморфных гетероструктур, позволяющей достичь баланса упругих напряжений и избежать их релаксации в активной области структур.
- 3. Разработка дизайна и технологии МПЭ роста активной области метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001) с целью получения интенсивной комнатной фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) в среднем ИК диапазоне 2.0–4.5 мкм.
- 4. Исследование электронных и люминесцентных свойств оптимизированных метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001) в зависимости от их конструкции, условий МПЭ роста и структурных свойств.
- 5. Выявление и исследование процессов безызлучательной рекомбинации в метаморфных гетероструктурах InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001), а также выработка способов их подавления с целью повышения внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) структур при комнатной температуре.
- 6. Разработка и реализация методом МПЭ светодиодных и лазерных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001), излучающих в среднем ИК диапазоне (2.0–4.5 мкм). Определение пороговых, мощностных и температурных характеристик лазерной генерации.

Научная новизна полученных результатов:

- Впервые продемонстрировано, что МБС In_xAl_{1-x}As толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава и максимальным составом *x*_{max} ≥ 0.75, выращенные на подложках GaAs(001) методом МПЭ, имеют плотность протяжённых дефектов вблизи интерфейса МБС/ВП (5±2)·10⁷ см⁻², что в 3 раза меньше, чем МБС с линейным изменением состава такой же толщины, выращенные в тех же условиях.
- 2. Впервые обнаружено, что релаксация упругих механических напряжений в метаморфных гетероструктурах In(Ga,Al)As/GaAs(001), содержащих МБС с корневым профилем изменения состава, осуществляется посредством двух механизмов: формирования сетки дислокаций несоответствия и разориентации кристаллической решётки эпитаксиальных слоёв относительно подложки с существенным вкладом второго механизма.
- Впервые экспериментально установлено значение обратной ступени 6 мол.% по In (Δx_{In} = 0.06), необходимое для получения равновесной ненапряжённой ВП In_xAl_{1-x}As (x ≥ 0.7) при использовании MБC InAlAs с корневым профилем изменения состава.
- 4. Впервые на подложках GaAs(001) методом МПЭ получены метаморфные гетероструктуры In(Ga,Al)As, выращенные на MБC InAlAs с корневым

профилем изменения состава, с оригинальной квантоворазмерной активной областью, представляющей собой субмонослойную вставку InSb/InAs типа II внутри КЯ InAs/InGaAs типа I, которые демонстрируют интенсивную ФЛ при 300 К в среднем ИК диапазоне 2.0–4.5 мкм с ВКЭ 5±0.5 % (90±5 % при 10 К). При этом, оптимальное значение обратной ступени МБС, приводящее к существенному подавлению процессов безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла и Оже, составляет $\Delta x_{In} = 0.08-0.10$.

- 5. Показано, что основным фактором гашения ФЛ метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001) при комнатной температуре является тепловой выброс дырок, характеризующийся энергией активации 45– 49 мэВ, с энергетического уровня вставки InSb в КЯ InAs/InGaAs через имеющиеся в InAs акцепторные уровни.
- 6. Впервые для метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001) было показано, что использование одиночного упруго растянутого слоя GaAs толщиной 5 нм, вставленного внутрь МБС In_xAl_{1-x}As с корневым профилем изменения состава при достижении x = 0.37±0.02, приводит к дополнительному снижению плотности протяжённых дефектов (< 10⁷ см⁻²) и повышению интенсивности ФЛ. При этом, сильнонапряжённая вставка GaAs ведёт себя аналогично обратной ступени МБС, формируя под собой область свободную от дислокаций, и таким образом, играет роль дополнительного дислокационного фильтра.
- 7. Впервые на подложках GaAs(001) методом МПЭ получены метаморфные квантоворазмерные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs с W-об-разной активной областью и сверхрешёточным волноводом 10 нм-InGaAs/2 нм-InAlAs, демонстрирующие стимулированное излучение в среднем ИК диапазоне (2.8–3.0 мкм) вплоть до 60 К с пороговой плотностью мощности ~ 5 кВт/см² при прямой оптической накачке волновода на длине волны λ = 1.5 мкм.

Практическая значимость работы:

- Разработан оригинальный двухстадийный режим МПЭ роста на специальным образом отожжённых подложках GaAs(001), позволяющий воспроизводимо получать МБС In_xAl_{1-x}As толщиной 1.0−1.4 мкм с корневым профилем изменения состава (x_{max} ≥ 0.75), а также метаморфные квантоворазмерные гетероструктуры InSb/InAs/InGaAs/InAlAs на его основе с рекордно низкой шероховатостью поверхности (RMS), равной 0.7 и 2.4 нм на площади 10×10 мкм², соответственно. При этом начальные 200 нм МБС выращиваются при повышенной температуре *T*_{подл.} = 370–380 °С и отношении потоков As₄/III = 2.0–2.2, а остальная часть МБС выращивается при пониженной температуре *T*_{подл.} = 330–340 °С и меньшем отношении потоков As₄/III = 1.3–2.0.
- Разработаны эффективные методы снижения плотности протяжённых дефектов (ПД) до значения менее 10⁷ см⁻² в активной области метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As, выращенных методом МПЭ на

подложках GaAs(001) через MБС In_xAl_{1-x}As с $x_{max} \ge 0.75$, заключающиеся в использовании: (1) корневого профиля изменения состава в MБС InAlAs, (2) одиночного упругонапряжённого слоя GaAs толщиной 5 нм, вставленного в MБС In_xAl_{1-x}As с корневым профилем изменения состава при достижении $x = 0.37 \pm 0.02$, и (3) оптимального баланса упругих механических напряжений в волноводных и квантоворазмерных областях гетероструктуры.

- 3. Впервые для детального анализа процессов релаксации упругих напряжений в метаморфных гетероструктурах In(Ga,Al)As/GaAs(001) продемонстрирована применимость комбинированного метода структурного анализа – профилированных по глубине структуры карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве, который включает построение карт рентгеновской дифракции в обратном пространстве в сочетании с данными локальной электронной дифракции, измеренной методом просвечивающей электронной микроскопии вдоль направления роста по поперечному сечению гетероструктуры.
- 4. На примере метаморфных низкоразмерных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001), излучающих в диапазоне 2.0–4.5 мкм, показано, что измерение зависимости интегральной интенсивности ФЛ от мощности возбуждения при низких температурах является удобным и эффективным методом независимого количественного определения внутренней квантовой эффективности таких структур, а также эффективности процессов безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла и Оже в зависимости от конструкции гетероструктур.
- 5. На подложках GaAs(001) методом МПЭ получены метаморфные светодиодные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As, излучающие в диапазоне 3.1– 3.8 мкм с ВКЭ 5±0.5 %, а также лазерные гетероструктуры, демонстрирующие стимулированное излучение на длине волны 2.86 мкм с пороговой плотностью мощности накачки 5 кВт/см² при температуре до 60 К, перспективные для развития оптоэлектроники среднего ИК диапазона на платформе GaAs.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метаморфный буферный слой (МБС) $In_xAl_{1-x}As$ толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава и максимальным содержанием In $x_{max} \sim 0.75 \div 0.87$, выращиваемый методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001), позволяет получать втрое меньшую плотность протяжённых дефектов ((5±2)·10⁷ см⁻²) в виртуальной подложке $In_xAl_{1-x}As$ ($x \ge 0.7$), чем МБС с линейным профилем изменения состава такой же толщины, выращенный при тех же условиях. Снижение плотности прорастающих дислокаций обусловлено наличием в МБС с корневым профилем изменения состава дополнительного, помимо формирования сетки дислокаций

несоответствия, механизма релаксации упругих напряжений за счёт разориентации кристаллической решётки МБС относительно подложки.

- Свободный от упругих напряжений слой (виртуальная подложка) In_xAl_{1-x}As (x ≥ 0.7) реализуется на подложке GaAs(001) с помощью МБС In_xAl_{1-x}As с корневым профилем изменения состава при значении обратной ступени Δx_{In} = 0.06.
- 3. Формирование на виртуальной подложке GaAs(001)/MEC/In_xAl_{1-x}As (x ≥ 0.7) гетероструктуры In(Ga,Al)As с активной областью, представляющей собой субмонослойную вставку InSb/InAs типа II внутри квантовой ямы InAs/InGaAs типа I, требует увеличения Δx_{in} до 0.08–0.10 с целью подавления каналов безызлучательной рекомбинации для достижения максимальной внутренней квантовой эффективности фотолюминесценции на длине волны ~3.5 мкм.
- 4. Упруго растянутый слой GaAs толщиной 5 нм, вставленный в MБC $In_xAl_{1-x}As$ с корневым профилем изменения состава при достижении $x = 0.37 \pm 0.02$, действует подобно дополнительной обратной ступени, так же формируя под собой область, свободную от протяженных дефектов, что приводит к снижению их плотности в виртуальной подложке и повышению интенсивности фотолюминесценции метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As, полученных на основе такого MБС.

Апробация работы:

Материалы диссертационной работы были представлены на следующих российских и международных конференциях и симпозиумах: международной конференции ФизикА.СПб (Санкт-Петербург, 2019); 30-й международной конференции по дефектам в полупроводниках (Сиэтл, 2019); международной конференции по эпитаксии (Амстердам, 2019); международной междисциплинарной конференции «Передовые рубежи физики 21 века и ФТИ им. А.Ф. Иоффе» (Санкт-Петербург, 2018); 25-ой международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2018); 20-ом и 22-ом международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2016, 2018); 18-й международной конференции «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2018); 8-й международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2017); 13-й и 14-й Российской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017; Новосибирск, 2019); 19-й Европейской конференция по молекулярно-пучковой эпитаксии (Санкт-Петербург, 2017); 19-й международной конференции по молекулярно-пучковой эпитаксии (Монпелье, 2016); 5-ом Российском симпозиуме с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2016); международной зимней школе по физике полупроводников (Зеленогорск, 2016). **Публикации.** По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 26 печатных работ, в том числе 14 статей и 12 трудов конференций, список которых представлен в Заключении.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 126 страниц, включая 62 рисунка, 4 таблицы и список цитируемой литературы, состоящий из 154 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведённых в работе исследований, сформулированы цель и основные задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором рассматриваются основные подходы к созданию полупроводниковых лазерных гетероструктур, излучающих в спектральном диапазоне 2–5 мкм. Рассматриваются различные типы псевдоморфных гетероструктур (с квантовыми ямами типа I и типа II, квантово-каскадные структуры на межподзонных оптических переходах), традиционно использующиеся в качестве активных областей лазеров среднего ИК диапазона. Обсуждаются их преимущества и недостатки. Проведён сравнительный анализ лазерных характеристик таких структур. Отдельное внимание уделяется метаморфной технологии эпитаксиального роста, позволяющей реализовывать узкозонные гетероструктуры на сильно рассогласованных по параметру решётки подложках GaAs. Рассмотрены различные аналитические модели релаксации упругих механических напряжений в метаморфных буферных слоях (МБС) с линейным градиентом изменения состава. Обсуждается перспективность использования MБС с нелинейным профилем изменения состава.

Вторая глава посвящена разработке конструкции и технологии МПЭ метаморфных буферных слоёв InAlAs, получаемых на подложках GaAs(001), а также исследованию их структурных свойств.

В параграфе 2.1. рассматривается уникальная процедура низкотемпературного ($T_{\text{подл.}} = 450 \text{ °C}$) отжига подложек GaAs в потоке атомов Ga, позволяющая реализовывать изотропную поверхность с рекордно низким значением шероховатости (RMS) менее 0.15 нм на площади 10×10 мкм² [A1].

В параграфе 2.2. представлены результаты структурных исследований МБС $In_xAl_{1-x}As (x = 0.05-0.87)$ толщиной ~1.4 мкм с линейным (*Рисунок la*) и корневым (*Рисунок lb*) профилем изменения состава, проведённые методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с целью минимизации плотности дефектов в слое виртуальной подложки (ВП) $In_xAl_{1-x}As (x > 0.7)$, выращиваемой поверх МБС. Сообщается, что МБС с корневым профилем позволяет получать втрое меньшую плотность протяжённых дефектов (ПД) в метаморфных структурах $(5\pm 2)\cdot 10^7$ см⁻² (*Рисунок ld*), чем МБС с линейным профилем (*Рисунок lc*).



Рисунок 1 — Светлопольные ПЭМ-изображения поперечного сечения (a, b) и поверхности (c, d) метаморфных гетероструктур с МБС с линейным (a, c) и корневым (b, d) профилем изменения состава

Изучается характер распределения дислокаций по толщине МБС. Было установлено, что дислокации в «линейном» МБС распределены равномерно по его толщине вплоть до, так называемой, бездислокационной области, располагающейся вблизи интерфейса МБС/ВП (область остаточных упругих напряжений, $d_{\rm free} = 180$ нм) (*Рисунок 1a*), в то время как в «корневом» МБС InAlAs, характеризующимся быстрым изменением состава по In в начале роста и слабым изменением в конце, подавляющее число дислокаций сконцентрировано вблизи интерфейса подложка GaAs/MБС, а толщина бездислокационной области достигает значения $d_{\rm free} \sim 290$ нм (*Рисунок 1b*) [A1, A2].

В параграфе 2.3. рассматривается оригинальный двухстадийный режим МПЭ роста МБС $In_xAl_{1-x}As$ толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава и $x_{max} \ge 0.75$, позволяющий получать рекордно низкую шероховатость поверхности (RMS) метаморфных структур равную 2.4 нм на площади 10×10 мкм² (*Рисунок 2a*). При таком режиме роста начальные 200 нм МБС выращиваются при повышенной температуре $T_{подл.} = 370-380$ °C и отношении потоков As₄/III = 2.0–2.2, а остальная часть МБС выращивается при пониженных температуре $T_{подл.} = 330-340$ °C и отношении потоков As₄/III = 1.3–2.0 [A1]. Выбор оптимальных значений $T_{подл.}$ и As₄/III на начальном этапе роста осуществлялся исходя из длительности осцилляций картины дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ), наблюдаемых в момент начала роста МБС. В то время как $T_{подл.}$ и As₄/III на втором этапе роста определялись путём исследования шероховатости поверхности метаморфных структур методом атомно-силовой микроскопии (ACM).



Рисунок 2 — а) ACM изображения поверхности ВП Ino.75Alo.25As (RMS = 2.4 нм), выращенной поверх MБC InAlAs с корневым профилем изменения состава; b) Локальные профили рассогласования параметра решётки (m[∥] и m[⊥]), а также угол разориентации (α) кристаллографических плоскостей MБС (002) и (220), полученные методом ДЭВО вдоль оси роста метаморфной структуры

В параграфе 2.4. представлены результаты детального анализа процессов релаксации упругих механических напряжений в метаморфных гетероструктурах In(Ga,Al)As/GaAs(001), содержащих МБС InAlAs с корневым профилем изменения состава. С помощью комбинированного метода структурного анализа, включающего в себя построение карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве и измерения дифракции электронов от выделенной области (ДЭВО) вдоль направления роста [001] по поперечному сечению гетероструктуры, было показано, что релаксация упругих механических напряжений в метаморфных гетероструктурах In(Ga,Al)As/GaAs, содержащих МБС с корневым профилем изменения состава, осуществляется посредством двух механизмов: формирования ортогональной сетки ДН (вдоль направлений [-110] и [110]) и разориентации кристаллической решётки эпитаксиальных слоёв относительно подложки GaAs с существенным вкладом второго механизма (*Pucyнok 2b*) [A3].

Третья глава посвящена исследованию фотолюминесцентных свойств метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs, полученных методом МПЭ на подложках GaAs(001) через МБС InAlAs с корневым профилем изменения состава.

В параграфе 3.1. рассматривается конструкция активной области таких структур, сбалансированная по упругим напряжениям и представляющая собой монослойную (MC) вставку InSb/InAs типа II в КЯ InAs/InGaAs типа I (*Pucy-нок 3a*). В предложенной активной области реализуются пространственно-непрямые оптические переходы с электронного уровня в КЯ InAs/InGaAs на дырочный уровень во вставке InSb, обеспечивающие излучение в широком

спектральном диапазоне 2.0–4.5 мкм только за счёт изменения толщины вставки InSb (0.0–1.5 MC) [A4–A8].



Рисунок 3 — а) Схематичная зонная диаграмма метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs. Вставка демонстрирует оптические переходы e1-hh1 в активной области InSb/InAs. b) Распределение упругих механических напряжений сжатия и растяжения вдоль оси роста z метаморфных гетероструктур с различным значением обратной ступени Дх1n = 0.02, 0.06, 0.10

В параграфе 3.2. обсуждается влияние значения обратной ступени Δx_{ln} , представляющей собой разницу между конечным составом МБС и составом ВП (*Pucyнok 3a*), на фотолюминесцентные и структурные свойства метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs. По полученным ω -20 кривым рентгеновской дифракции было установлено, что при использовании $\Delta x_{ln} = 0.06$ реализуется упруго ненапряжённая ВП, в то время как использование $\Delta x_{ln} > 0.06$ приводит к упругим напряжениям растяжения в активной области структуры в целом, а $\Delta x_{ln} < 0.06 - к$ напряжениям сжатия (*Pucyнok 3b*). При этом, максимальную интенсивность ФЛ вблизи 3.3 мкм при T = 80 К (*Pucyнok 4a*) и минимальную плотность ПД в активной области продемонстрировали образцы с $\Delta x_{ln} = 0.08-0.10$, что объясняется необходимостью дополнительной компенсации упругих напряжений, локализованных в верхней части МБС (область остаточных упругих напряжений).

В параграфе 3.3. представлены результаты исследований зонной структуры метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs различной конструкции, проведённые теоретически методом слабой связи в рамках 8-зонной модели Кейна, а также экспериментально методом фурье-спектроскопии фотоотражения (ФО) [А9].



Рисунок 4 — а) Спектры ФЛ активной области InSb/InAs метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs с различным значением обратной ступени Δxin при T = 80 K; b) Зависимость ВКЭ от Δxin при T = 10 K

В параграфе 3.4. описывается методика определения вкладов излучательной и безызлучательной рекомбинации структур по мощностным зависимостям ФЛ. С использованием данной методики в параграфе 3.5. были определены значения ВКЭ (*Рисунок 4b*), а также вклады Шокли-Рида-Холла и Оже рекомбинации для метаморфных гетероструктур с различным значением обратной ступени $\Delta x_{\text{In}} = 0.02-0.14$. Установлено, что структуры с $\Delta x_{\text{In}} = 0.08-0.10$ характеризуются максимальным значением ВКЭ (вплоть до ~90 % при T = 10 K), а также минимальными вкладами безызлучательной рекомбинации, что хорошо согласуется с результатами, приведёнными в параграфе 3.2. [A10].

В параграфе 3.6. анализируются температурные зависимости нормализованной интегральной интенсивности ФЛ $I_{PL}(T)$ метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs с целью определения возможных каналов безызлучательной рекомбинации. Соответствующие энергии активации E_A определялись путём подгонки экспериментальных температурных зависимостей кривой Аррениуса [A10]. Было установлено, что безызлучательная рекомбинация в исследуемых метаморфных гетероструктурах характеризуется двумя энергиями активации $E_{A1} \sim 8$ мэВ и $E_{A2} \sim 45-49$ мэВ. При этом, процесс безызлучательной рекомбинации с E_{A1} превалирует при низких температурах (T < 120 K) и обусловлен термической делокализацией НЗ из потенциальных ям, образующихся вследствие флуктуаций состава и толщины слоёв в течение их роста. Процесс безызлучательной рекомбинации с E_{A2} более выражен при T > 120 K и является двухстадийным, при котором сначала осуществляется переход дырок, локализованных в InSb, на акцепторные уровни в InAs, а затем происходит их термический выброс в валентную зону InAs.

Четвёртая глава посвящена исследованию влияния одиночных упругонапряжённых слоёв GaAs и InAs, расположенных внутри MБC InAlAs суммарной толщиной ~1.4 мкм с корневым профилем изменения состава, на структурные и оптические свойства метаморфных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs.



Рисунок 5 — Светлопольные ПЭМ-изображения активной области и верхней части МБС для образца B, содержащего вставку GaAs в MБС InAlAs (a) и для образца C, содержащего вставку InAs в MБС InAlAs (b). Спектры ФЛ образцов A (образец без вставок в MБС), B и C при T = 12 K (c) и 300 K (d).

Методом ПЭМ было установлено, что использование одиночного упруго растянутого слоя GaAs толщиной 5 нм, вставленного внутрь МБС In_xAl_{1-x}As с корневым профилем изменения состава при достижении x = 0.37 + 0.02, приводит к снижению плотности ПД (< 10^7 см⁻²) (*Рисунок 5a*) [A11, A12]. При этом, упруго растянутая вставка GaAs ведёт себя аналогично обратной ступени МБС, формируя под собой область свободную от дислокаций, и, таким образом, играет роль дополнительного дислокационного фильтра (вставка на Рисунке 5а). Напротив, в образце, содержащем МБС InAlAs с одиночной упруго сжатой вставкой InAs толщиной 5 нм, наблюдалась высокая плотность дефектов в каждом из слоёв структуры, а бездислокационная область (d_{free}) полностью отсутствовала (Рисунок 5b). Полученные результаты хорошо согласуются с результатами оптических исследований. Так, образец С, содержащий вставку InAs в МБС и характеризующийся наибольшей плотностью дефектов, обладает наименьшей интенсивностью ФЛ (*Рисунок 5с, d*), в то время как наиболее интенсивную ФЛ при 300 К (вдвое превышающую интенсивность ФЛ образца А с МБС без вставок) демонстрирует образец В со вставкой GaAs

МБС (*Рисунок 5d*). Увеличение интенсивности ФЛ в последнем случае объясняется меньшей плотностью дефектов в активной области, а также большей энергией локализации дырок (*E*_{loc}) во вставке InSb, достигаемой за счёт изменения баланса и величины упругих механических напряжений в активной области [A11].

Пятая глава посвящена разработке конструкции и технологии МПЭ метаморфных волноводных гетероструктур InSb/InAs/InGaAs/InAlAs с целью получения стимулированного излучения с оптической накачкой, а также электролюминесценции в спектральном диапазоне 2.0–4.5 мкм.

В параграфе 5.1. рассматривается конструкция метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As с волноводом, представляющим собой сверхрешётку (СР) InGaAs/InAlAs (*Рисунок 6*). Использование СР в качестве волновода вместо объёмных слоёв In_{0.82}Ga_{0.18}As обусловлено сложностью получения планарной морфологии поверхности последнего методом МПЭ вследствие повышенной подвижности адатомов In по сравнению с адатомами Ga при используемой температуре роста. Как волноводная СР, так и активная область была сбалансирована по упругим механическим напряжениям во избежание процессов их релаксации. Высокое кристаллическое совершенство метаморфных гетероструктур с такой конструкцией было подтверждено методом ПЭМ (*Рисунок 7a*) [A13].



Рисунок 6 — Схематичная зонная диаграмма метаморфных волноводных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As

Кроме того, в параграфе 5.1. представлены результаты исследований зонной структуры метаморфных волноводных гетероструктур, проведённые теоретически методом слабой связи в рамках 8-зонной модели Кейна и экспериментально с помощью фурье-спектроскопии ФО [A13].

В параграфе 5.2. представлены результаты оптических исследований волноводных гетероструктур, конструкция которых была рассмотрена в параграфе 5.1, на предмет стимулированного излучения с оптической накачкой. Было установлено, что при использовании больших мощностей импульсной накачки ($P_{\rm exc} > 21$ кВт/см², $\lambda_{\rm las} = 1.064$ мкм) спектры ФЛ от активной области структур существенно изменяются и остаётся лишь узкая линия с энергией вблизи 435 мэВ при T = 10 К (*Рисунок 7b*). При этом, ряд признаков, таких как резкий рост интенсивности излучения при увеличении накачки, пороговый характер зависимости интегральной ФЛ от плотности мощности возбуждения (*вставка на Рисунке 7b*), резкое сужение спектра излучения по сравнению со случаем слабой накачки, позволяет утверждать о реализации стимулированного излучения в данных структурах [A14]. Также было показано, что при накачке структур лазером с длиной волны $\lambda_{\rm las} \sim 1.064$ мкм, который поглощается преимущественно в широкозонном барьерном слое In_{0.75}Al_{0.25}As, пороговая плотность мощности накачки составила ~ 20 кВт/см², а при накачке лазером с длиной волны $\lambda_{\rm las} \sim 1.5$ мкм – ~ 5 кВт/см² (*вставка на Рисунке 7b*).



Рисунок 7 — а) ПЭМ-изображение метаморфной волноводной гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As в геометрии поперечного сечения; b) Спектры стимулированного излучения волноводной метаморфной гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As, измеренные при импульсной накачке лазером с $\lambda_{las} = 1.064$ мкм при разных плотностях мощности накачки и T = 10 K

В параграфе 5.3. приводятся результаты исследований диодных метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As с различным составом волноводного слоя (CP InGaAs/InAlAs) и толщиной вставки InSb, полученных методом МПЭ на подложках GaAs:Zn *p*-типа. Обсуждаются вольт-амперные характеристики (BAX) таких структур (*Рисунок 8a*), определяются напряжения отсечки, характеризующие энергетические барьеры при протекании тока. Спектры ЭЛ всех полученных структур содержат ярко выраженный пик с длиной волны излучения более 3.5 мкм при комнатной температуре (*Рисунок 8b*), обусловленный пространственно непрямыми оптическими переходами с электронного уровня размерного квантования в КЯ InAs на уровень тяжёлых дырок во вставке InSb.



Рисунок 8 — BAX (a) и спектры ЭЛ (b) метаморфных светодиодных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As с различным составом волноводной CP In_xGa_{1-x}As/In_{0.75}Al_{0.25}As (x = 0.82 (образцы A и B), x = 0.83 (образец C)) и толщиной вставки InSb (~1 MC (образцы A и C), ~0.7 MC (образец B)) при 300 К

По ватт-амперным характеристикам было показано, что интенсивность ЭЛ от активной области InSb/InAs спадает при изменении температуры от 80 к 300 К лишь в 17 раз.

В Заключении приводятся основные результаты работы:

- 1. Разработан метод отжига подложек GaAs, позволяющий получать рекордно низкую шероховатость поверхности со значением RMS = 0.15 нм на площади 10×10 мкм².
- 2. Показано, что МБС InAlAs толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава, выращиваемый методом МПЭ на подложках GaAs(001), позволяет получать втрое меньшую плотность протяжённых дефектов в упруго ненапряженной ВП In_xAl_{1-x}As с x ≥ 0.7 ((5±2)·10⁷ см⁻²), чем МБС с линейным профилем изменения состава такой же толщины, выращенный в тех же МПЭ условиях.
- 3. Разработан двухстадийный режим МПЭ роста МБС InAlAs толщиной до 1.4 мкм с корневым профилем изменения состава, позволяющий получать на подложках GaAs(001) слои In_xAl_{1-x}As с *x* ≥ 0.7, а также квантоворазмерные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As на его основе с рекордно низкой шероховатостью поверхности 0.7 и 2.4 нм, соответственно (10×10 мкм²).
- 4. Разработан комбинированный метод структурного анализа, включающий построение карт рассеянной рентгеновской интенсивности в обратном пространстве в сочетании с данными локальной электронной дифракции, позволяющий послойно анализировать релаксацию упругих напряжений в метаморфных гетероструктурах.

- 5. Показано, что релаксация упругих напряжений в MБС InAlAs с корневым профилем изменения состава осуществляется посредством двух механизмов: образования ортогональной сетки дислокаций несоответствия и разориентации кристаллической решётки МБС относительно подложки GaAs(001), что снижает плотность образующихся протяжённых дефектов.
- 6. Методом МПЭ на подложках GaAs(001) с использованием MБC InAlAs с корневым профилем изменения состава реализованы квантоворазмерные гетероструктуры с уникальной сбалансированной по упругим напряжениям активной областью, представляющей собой субмонослойную вставку InSb/InAs типа II, расположенную в КЯ InAs/InGaAs типа I, излучающей в среднем ИК диапазоне 2.0–4.5 мкм с внутренней квантовой эффективностью 90±5 % при 10 К.
- Проведённые расчёты энергетического спектра метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs различной конструкции с учётом упругих механических напряжений в рамках 8-зонной модели Кейна экспериментально подтверждены методом фурье-спектроскопии фотоотражения в среднем ИК диапазоне.
- Определено значение обратной ступени Δ*x*_{In} = 0.06 в случае MБC InAlAs с корневым профилем изменения состава, при котором реализуется упруго ненапряжённая виртуальная подложка In_xAl_{1-x}As при *x* ≥ 0.7.
- 9. Показано, что одиночный упруго растянутый слой GaAs толщиной 5 нм, вставленный в MБC In_xAl_{1-x}As с корневым профилем изменения состава при $x = 0.37 \pm 0.02$, играет роль дополнительной обратной ступени и позволяет снизить плотность протяжённых дефектов в виртуальной подложке InAlAs до значения < 10^7 см⁻².
- 10. Установлено, что максимальное значение ВКЭ метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs(001), излучающих в среднем ИК диапазоне 2.0–4.5 мкм, составляет 5±0.5 % при комнатной температуре и достигается при значении обратной ступени ∆x_{In} = 0.08–0.10.
- 11. Установлено, что основной причиной гашения ФЛ метаморфных гетероструктур InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs, излучающих в среднем ИК диапазоне 2.0–4.5 мкм, является тепловой выброс дырок с энергетического уровня в субмонослойной вставке InSb в КЯ InAs, через имеющиеся в ней акцепторные уровни.
- 12. На подложках GaAs:Zn *p*-типа методом МПЭ реализованы метаморфные светодиодные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As, демонстрирующие электролюминесценцию в диапазоне 3.1–3.8 мкм, интенсивность которой спадает от температуры жидкого азота к комнатной лишь в 17 раз.
- 13. На полуизолирующих подложках GaAs(001) методом МПЭ получены метаморфные гетероструктуры InSb/InAs/In(Ga,Al)As со сверхрешёточным волноводом InGaAs/InAlAs, демонстрирующие стимулированное излучение в среднем ИК диапазоне (2.8–3.0 мкм) вплоть до 60 К с пороговой плотностью мощности ~5 кВт/см².

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

[A1] Соловьёв, В.А. Оптимизация структурных свойств и морфологии поверхности метаморфного буферного слоя $In_xAl_{1-x}As$ с корневым профилем изменения состава (x = 0.05-0.83), выращиваемого методом молекулярно-пучковой эпитаксии на GaAs(001) / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, А.А. Ситникова, П.Н. Брунков, Б.Я. Мельцер, С.В. Иванов // ФТП. — 2018. — Т. 52. — С. 127.

[A2] Побат, Д.В. Распределение дислокаций несоответствия и упругих механических напряжений в метаморфных буферных слоях InAlAs разной конструкции / Д.В. Побат, В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, С.В. Иванов // ФТТ. — 2021. — Т. 63. — С. 85.

[A3] Solov'ev, V.A. Strain relaxation in convex-graded $In_xAl_{1-x}As$ (x = 0.05-0.79) metamorphic buffer layers grown by molecular beam epitaxy on GaAs(001) / V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, M.V. Baidakova, D.A. Kirilenko, M.A. Yagovkina, A.A. Sitnikova, T.A. Komissarova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov // Superlat. & Microstr. — 2017. — Vol. 113. — P. 777.

[A4] Chernov, M.Yu. Enhanced room-temperature 3.5 µm photoluminescence in stress-balanced metamorphic In(Sb,As)/In(Ga,Al)As/GaAs quantum wells / M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, B.Ya. Meltser, M.A. Yagovkina, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov // Appl. Phys. Express. — 2017. — Vol. 10. — P. 121201.

[A5] Komissarova, T.A. Electrical and optical properties of convex-type metamorphic In_{0.75}Ga_{0.25}As/In_{0.7}Al_{0.3}As quantum well structures / T.A. Komissarova, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, B.Ya. Meltser, P.N. Brunkov, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov // Mater. Res. Express. — 2017. — Vol. 4. — P. 105902.

[A6] Chernov, M.Yu. InSb/InAs/InGa(Al)As/GaAs(001) metamorphic nanoheterostructures grown by MBE and emitting beyond 3 μ m / M.Yu. Chernov, O.S. Komkov, D.D. Firsov, B.Ya. Meltser, A.N. Semenov, Ya.V. Terent'ev, P.N. Brunkov, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov, V.A. Solov'ev // J. Cryst. Growth. — 2017. — Vol. 477. — P. 97.

[A7] Соловьёв, В.А. Метаморфные квантовые ямы InAs/InGaAs/InAlAs с субмонослойными вставками InSb, излучающие в среднем инфракрасном диапазоне / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семёнов, Я.В. Терентьев, Д.Д. Фирсов, О.С. Комков, С.В. Иванов // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42. — С. 33. [A8] Ivanov, S.V. Metamorphic InAs(Sb)/InGaAs/InAlAs nanoheterostructures grown on GaAs for efficient mid-IR emitters / S.V. Ivanov, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, P.N. Brunkov, D.D. Firsov, O.S. Komkov // Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. — 2019. — Vol. 65. — P. 20.

[A9] Komkov, O.S. Peculiarities of the energy spectrum of InSb/InAs/InGaAs/ InAlAs/GaAs nanoheterostructures revealed by room temperature photomodulation FTIR spectroscopy / O.S. Komkov, D.D. Firsov, A.D. Andreev, M.Y. Chernov, V.A. Solov'ev, S.V. Ivanov // Jpn. J. App. Phys. — 2019. — Vol. 58. — P. 050923. [A10] Komkov, O.S. Radiative versus non-radiative recombination in high-efficiency mid-IR InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs metamorphic nanoheterostructures / O.S. Komkov, D.D. Firsov, M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2018. — Vol. 51. — P. 055106.

[A11] Соловьёв, В.А. Влияние сильнонапряжённых вставок GaAs и InAs в буферном слое InAlAs на структурные и оптические свойства метаморфных квантоворазмерных гетероструктур / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, О.С. Комков, Д.Д. Фирсов, А.А. Ситникова, С.В. Иванов // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Т. 109. — С. 381.

[A12] Fominykh, N.A. In situ study of elastic strain relaxation in metamorphic InAs(Sb)/In(Ga,Al)As/GaAs heterostructures by using reflection high energy electron diffraction / N.A. Fominykh, V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, S.V. Ivanov // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1400. — P. 055035.

[A13] Chernov, M.Yu. Effect of design and stress relaxation on structural, electronic, and luminescence properties of metamorphic InAs(Sb)/In(Ga,Al)As/GaAs mid-IR emitters with a superlattice waveguide / M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, A.D. Andreev, A.A. Sitnikova, S.V. Ivanov // J. Appl. Phys. — 2020. — Vol. 127. — P. 125706.

[A14] Соловьёв, В.А. Стимулированное излучение на длине волны 2.86 мкм из метаморфных In(Sb,As)/In(Ga,Al)As/GaAs квантовых ям в условиях оптической накачки / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, С.В. Морозов, К.Е. Кудрявцев, А.А. Ситникова, С.В. Иванов // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Т. 110. — С. 297.

Труды конференций:

[B1] Чернов, М.Ю. Метаморфные наногетероструктуры InSb/InAs/InGa(Al)As среднего ИК диапазона на подложках GaAs / М.Ю. Чернов, В.А. Соловьёв, О.С. Комков, Д.Д. Фирсов, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семёнов, Я.В. Терентьев, С.В. Иванов // Труды международной зимней школы по физике полупроводников «Передовые технологии создания полупроводниковых наногетероструктур и приборов на их основе». — 2016.

[B2] Соловьёв, В.А. Метаморфные наногетероструктуры InSb/InAs/ InGa(Al)As/GaAs, излучающие в среднем инфракрасном диапазоне / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семёнов, Я.В. Терентьев, П.С. Копьёв, С.В. Иванов // Труды XX международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». — 2016. — С. 730.

[В3] Соловьёв, В.А. Эффективная комнатная фотолюминесценция в среднем ИК диапазоне / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, П.Н. Брунков, А.А. Ситникова, Б.Я. Мельцер, А.Н. Семёнов, С.В. Иванов // Труды 5-го российского симпозиума с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». — 2016. — С. 39.

[B4] Solov'ev, V.A. Optimization of structural quality and surface morphology of convex graded $In_xAl_{1-x}As$ (x = 0.05-0.83) metamorphic buffer layer on GaAs(001) / V.A. Solov'ev, M.Yu. Chernov, A.A. Sitnikova, P.N. Brunkov, B.Ya.

Meltser, S.V. Ivanov // Proc. 19th European Workshop on Molecular Beam Epitaxy (EuroMBE19). — 2017. — C. 84.

[B5] Соловьёв, В.А. Перспективные метаморфные гетероструктуры InAs(Sb)/ InGaAs/InAlAs/GaAs для СВЧ электроники и оптоэлектроники среднего ИК диапазона / В.А. Соловьёв, М.Ю. Чернов, Т.А. Комиссарова, О.С. Комков, Д.Д. Фирсов, Б.Я. Мельцер, П.С. Копьёв, С.В. Иванов // Труды XIII всероссийской конференции по физике полупроводников. — 2017. — С. 151.

[B6] Чернов, М.Ю. Взаимосвязь дизайна метаморфных структур с КЯ InAs/In_{0.75}Ga_{0.25}As/In_{0.75}Al_{0.25}As, выращенных методом МПЭ на GaAs, с их электрическими и оптическими свойствами / М.Ю. Чернов, Т.А. Комиссарова, В.А. Соловьёв, Б.Я. Мельцер, П.С. Копьёв, С.В. Иванов // Труды 8-ой международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения». — 2017. — С. 34.

[B7] Chernov, M.Yu. Metamorphic InSb/InAs/In(Ga,Al)As/GaAs QWs emitting beyond 3 μm: luminescence efficiency versus MBE growth conditions and design / M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, B.Ya. Meltser, Ya.V. Terent'ev, P.S. Kop'ev, S.V. Ivanov // Proc. 19th European Workshop on Molecular Beam Epitaxy (EuroMBE19). — 2017. — C. 85.

[B8] Комков, О.С. Исследование энергетического спектра узкозонных наногетероструктур InSb/InAs методом фотомодуляционной фурье-спектроскопии отражения / О.С. Комков, Д.Д. Фирсов, М.Ю. Чернов, В.А. Соловьёв, А.Д. Андреев, С.В. Иванов // Труды XIV всероссийской конференции по физике полупроводников. — 2019. — С. 227.

[B9] Chernov, M.Yu. In(As,Sb)/InGaAs/InAlAs QW heterostructures for efficient mid-IR emitters grown by MBE on GaAs / M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, S.V. Ivanov // Proc. of 19th International Conference Laser Optics. — 2018. — P. 39.

[В10] Иванов, С.В. Метаморфные наногетероструктуры InAs(Sb)/InGaAs/ InAlAs для лазеров среднего ИК диапазона на подложках GaAs // С.В. Иванов, М.Ю. Чернов, В.А. Соловьёв, Д.Д. Фирсов, О.С. Комков, П.Н. Брунков // Труды XXV международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — 2018. — С. 313.

[В11] Иванов, С.В. Метаморфные наногетероструктуры InAs(Sb)/InGaAs/ InAlAs для эффективных излучателей среднего ИК диапазона на подложках GaAs / С.В. Иванов, М.Ю. Чернов, В.А. Соловьёв, Д.Д. Фирсов, О.С. Комков // Труды XXII международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». — 2018. — С. 633.

[B12] Chernov, M.Yu. Metamorphic InAs(Sb)/In(Ga,Al)As heterostructures grown by MBE on GaAs: toward mid-IR lasing / M.Yu. Chernov, V.A. Solov'ev, O.S. Komkov, D.D. Firsov, P.N. Brunkov, S.V. Ivanov // Proc. EMN conf. (Epitaxy 2019). — 2019. — P. 58.

Список цитируемой литературы

[1] Editorial. Extending opportunities / Editorial // Nat. Photon. — 2012. — Vol. 6. — P. 407.

[2] Shterengas, L. Cascade type-I quantum well GaSb-based diode lasers / L. Shterengas, G. Kipshidze, T. Hosoda, M. Wang, T. Feng, G. Belenky // Photonics. — 2016. — Vol. 3. — P. 27.

[3] Kim, M. High-power continuous-wave interband cascade lasers with 10 active stages / M. Kim, W.W. Bewley, C.L. Canedy, C.S. Kim, C.D. Merritt, J. Abell, I. Vurgaftman, J.R. Meyer // Opt. Express. — 2015. — Vol. 23. — P. 9664.

[4] Laffaille, P. High temperature operation of short wavelength InAs-based quantum cascade lasers / P. Laffaille, J.C. Moreno, R. Teissier, M. Bahriz, A.N. Baranov // AIP Adv. — 2012. — Vol. 2. — P. 022119.

[5] Belenky, G. Type-I diode lasers for spectral region above 3 μ m / G. Belenky, L. Shterengas, G. Kipshidze, T. Hosoda // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. — 2011. — Vol. 17. — P. 1426.

[6] Sirtori, C. GaAs-based quantum cascade lasers / C. Sirtori, H. Page, C. Becker // Philos. Trans. R. Soc. Lond. A. — 2001. — Vol. 359. — P. 505.

[7] Tersoff, J. Dislocations and strain relief in compositionally graded layers / J. Tersoff // Appl. Phys. Lett. — 1993. — Vol. 62. — P. 693.

[8] Solov'ev, V.A. Room-temperature 3.9–4.3 μm photoluminescence from InSb submonolayers grown by molecular beam epitaxy in an InAs matrix / V.A. Solov'ev, O.G. Lyublinskaya, A.N. Semenov, B.Ya. Meltser, D.D. Solnyshkov, Ya.V. Terent'ev, L.A. Prokopova, A.A. Toropov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 86. – P. 011109.

[9] Lyublinskaya, O.G. Temperature-dependent photoluminescence from type-II InSb/InAs quantum dots / O.G. Lyublinskaya, V.A. Solov'ev, A.N. Semenov, B.Ya. Meltser, Ya.V. Terent'ev, L.A. Prokopova, A.A. Toropov, A.A. Sitnikova, O.V. Rykhova, S.V. Ivanov, K. Thonke, R. Sauer // J. Appl. Phys. — 2006. — Vol. 99. — P. 093517.

[10] Carrington, P.J. Room temperature mid-infrared electroluminescence from InSb/InAs quantum dot light emitting diodes / P.J. Carrington, V.A. Solov'ev, Q. Zhuang, A. Krier, S.V. Ivanov // Appl. Phys. Lett. — 2008. — Vol. 93. — P. 091101.