

На правах рукописи

Светогоров Владимир Николаевич

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ AlGaInAs/InP
С КОМПЕНСАЦИЕЙ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ
ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА
1400-2000 НМ**

Специальность 05.27.03 – Квантовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт
«Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (НИИ «Полюс»)

Научный руководитель: Мармалюк Александр Анатольевич,
доктор технических наук, начальник НТЦ АО «НИИ
«Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Ведущая организация: Научно-производственное предприятие «Инжест»

Защита состоится «___» _____ 2022 г. в 15.00 часов на заседании
диссертационного совета при Московском физико-техническом институте (МФТИ) по
адресу: 141701, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-
технического института (национального исследовательского университета)
<https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>

Работа представлена «___» _____ 2022 г. в Аттестационную комиссию
федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на
соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4
Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Создание лазеров на основе полупроводниковых гетероструктур (ГС) вызвало переворот в электронике и способствовало бурному росту новой области науки и техники – оптоэлектроники [1]. Среди неоспоримых преимуществ лазерных диодов (ЛД) выделяют компактность, высокую эффективность, широкие возможности выбора длины волны генерации, легкость управления излучением и сравнительно низкую стоимость. С началом практического применения теории размерного квантования в оптоэлектронике, благодаря возможности создания квантово-размерных объектов с помощью методов молекулярно-лучевой эпитаксии и эпитаксии с использованием металлоорганических соединений и гидридов (МОС-гидридной эпитаксии), наноразмерные полупроводниковые ГС стали основой современных ЛД. Целенаправленное изменение зонной структуры квантово-размерной активной области позволяет гибко управлять и улучшать приборные характеристики ЛД. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в этом направлении, в настоящее время все еще остается круг задач, которые могут быть решены путем выбора параметров ГС с квантовыми ямами (КЯ) и условий их формирования.

В данной работе рассматриваются способы улучшения мощностных характеристик ЛД, используемых в качестве управляемых источников излучения ближнего ИК-диапазона в интервале длин волн 1400-2000 нм. Подобные ЛД находят применение в системах передачи информации по волоконно-оптическим линиям и открытому лучу, используются в системах спектроскопии, медицине и научном приборостроении.

Вместе с тем, создание рассматриваемых мощных ЛД осложняется рядом причин, среди которых выделяют недостаточную энергетическую глубину КЯ и высокую вероятность протекания процессов Оже-рекомбинации. Первая проблема заключается в том, что носители заряда по мере увеличения тока накачки могут покидать активную область и формировать токи утечки, снижая квантовую эффективность прибора. Оже-рекомбинация дополнительно уменьшает излучательную рекомбинацию, снижает коэффициент полезного действия (КПД) и способствует увеличению тепловыделения. Повышение температуры активной области, в свою очередь, приводит к увеличению выброса носителей из КЯ, дальнейшему падению квантовой эффективности и формированию положительной обратной связи. По указанным причинам для анализируемых ЛД оказался перспективным подход по реализации концепции упруго-напряженной активной области [2], согласно которой использование напряжений различных знаков в барьерах и КЯ позволяет отодвинуть порог генерации дислокаций несоответствия (ДН), увеличить энергетическую глубину КЯ и величину напряжений в них. Увеличение потенциального барьера в КЯ повышает локализацию носителей в активной области, а увеличение упругих напряжений в КЯ способствует снижению влияния процессов Оже-рекомбинации [3].

Применение данной концепции для создания ЛД повышенной мощности требует развития представлений о граничных условиях генерации ДН в напряженно-компенсированных КЯ, выбору их параметров и условий получения, чему и посвящена данная работа.

Цели и основные задачи работы

Диссертационная работа направлена на изучение закономерностей формирования напряженно-компенсированных КЯ, получение методом МОС-гидридной эпитаксии излучающих ГС на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ и создание мощных ЛД спектрального диапазона 1400-2000 нм.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести расчет распределения упругих напряжений в ГС с напряженно-компенсированными КЯ.
2. Изучить влияние упругих напряжений на излучательные характеристики ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с КЯ.
3. Оптимизировать конфигурацию напряженной квантово-размерной активной области лазерных ГС для повышения выходной мощности излучателей спектрального диапазона 1400-1600 нм на их основе.
4. Исследовать возможность внедрения в активную область электрон-блокирующего широкозонного слоя с взаимной компенсацией упругих напряжений для повышения выходных характеристик ЛД на основе ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$.
5. Предложить подходы по созданию активной области для ЛД спектрального диапазона 1900-2000 нм.
6. Проанализировать характеристики ЛД на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженно-компенсированными КЯ.

Научная новизна работы

1. Развита методика по расчетной оценке распределения упругих напряжений в многослойных полупроводниковых ГС. Предложено учитывать не только влияние напряжений уже выращенных слоев на напряжение слоя наращиваемого, но и обратное влияние, которое оказывает наращиваемый слой на напряжения в уже выращенных слоях. Модифицированная модель использована для оценки критических напряжений, вызывающих генерацию ДН в квантово-размерных ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$. Показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

2. Исследована возможность снижения вероятности утечки носителей заряда в эмиттерные слои путем введения широкозонного упруго компенсированного электрон-блокирующего эпитаксиального слоя $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ в лазерную структуру. Продemonстрировано повышение дифференциальной эффективности ЛД с указанными барьерными слоями на 10-20%.

3. Предложена конструкция напряженно-компенсированной активной области с ограничивающими широкозонными барьерными слоями на основе ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, которая позволила создать ЛД с выходной мощностью до 4.2 Вт в непрерывном и до 18 Вт в импульсном режиме работы в спектральном диапазоне 1400-1600 нм.

4. Получены ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженно-компенсированными КЯ, позволившие создать ЛД с длиной волны излучения 1900-2000 нм и выходной мощностью 1 Вт в непрерывном режиме работы.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Учет обратного влияния наращиваемого слоя на напряжения в уже выращенных слоях позволил уточнить модель расчета распределения упругих напряжений в многослойных полупроводниковых ГС с КЯ и добиться хорошего соответствия с экспериментальными результатами по зависимости интенсивности спектров фотолюминесценции от параметров КЯ, излучающих в диапазоне 1400-2000 нм.

2. Введение в активную область лазерной ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ напряженно-компенсированного широкозонного электрон-блокирующего слоя $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ обеспечило увеличение наклона ватт-амперной характеристики (ВТАХ) на 10-20%.

3. Совместное использование напряженно-компенсированных КЯ и широкозонного слоя $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ позволило создать ЛД с выходной мощностью до 4.2 Вт в непрерывном и до 18 Вт в импульсном режиме работы, в спектральном диапазоне 1400 -1600 нм.

4. Предложенные параметры напряженно-компенсированной активной области лазерной ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ и условия её формирования дали возможность создать ЛД с длиной волны излучения 1900-2000 нм и выходной мощностью 1.0 Вт в непрерывном режиме работы.

Практическая значимость результатов работы

1. Определены режимы роста ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ методом МОС-гидридной эпитаксии с оптимальными значениями упругих напряжений в активной области, обеспечивающие высокие излучательные характеристики.

2. Предложена модификация модели оценки распределения упругих напряжений по всей толщине ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, с целью устранения возникновения и распространения ДН.

3. На основе предложенной модели, рассчитана конструкция и получены ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с оптимальными значениями упругих напряжений в активной области, на основе которых созданы ЛД, достигающие в спектральном диапазоне 1400-1600 нм до 4.2 Вт в непрерывном режиме работы.

4. Развита методика по использованию широкозонного электрон-блокирующего слоя в активной области лазерных ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$. Применение составного

блокирующего слоя с компенсацией упругих напряжений позволяет увеличить его ширину запрещенной зоны, что благоприятно сказывается на рабочих характеристиках ЛД.

5. Разработаны ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ и на их основе созданы ЛД, излучающие на длинах волн в спектральном диапазоне 1900-2000 нм с выходной мощностью 1.0 Вт в непрерывном режиме генерации.

Научная обоснованность и достоверность результатов

Достоверность результатов подтверждаются использованием аналитических и экспериментальных методов исследования ГС с применением современного контрольно-измерительного и технологического оборудования. Научная обоснованность основывается на использовании достоверных данных из авторитетных источников, а также воспроизводимых результатах экспериментов. Результаты работы опубликованы в рецензируемых журналах и обсуждались на международных конференциях.

Личный вклад автора

В данной диссертационной работе автор участвовал в постановке целей и основных задач, определял методы анализа, как измерительные, так и вычислительные. В ходе этого автором был проведен анализ литературы, связанной с темой работы, что отображено в литературном обзоре. Также автором выполнены расчеты распределения упругих напряжений, осуществлен рост эпитаксиальных структур и исследованы их характеристики. Лично автором проведена обработка, анализ и оформление полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и выводы по работе.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на VII Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (2017, Москва), XIX Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (2017, Санкт – Петербург), VI Российском симпозиуме с международным участием. Полупроводниковые лазеры: физика и технология. (2018, Санкт – Петербург), XXIII Международном симпозиуме. Нанофизика и наноэлектроника. (2019, Нижний Новгород), XXI Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (2019, Санкт – Петербург), VII Международном симпозиуме по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (2019, Москва), 20th International Conference Laser Optics (2020, Санкт – Петербург), XXV Международном симпозиуме. Нанофизика и наноэлектроника (2021, Нижний

Новгород), VIII Международном симпозиуме по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (2021, Москва).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 19 работ, из которых 7 в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, и 12 в сборниках материалов и трудов конференций. Список работ представлен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 136 страниц, включая 63 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 134 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ полупроводниковых ГС для мощных ЛД ИК-диапазона от 1400 нм до 2000 нм.

Показано, что твердые растворы $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ имеют ряд преимуществ по сравнению с другими системами материалов, используемыми для указанных длин волн. Большее значение разрыва зоны проводимости приводит к улучшению ограничения электронов в активной области, снижает токи утечки и способствует повышению дифференциальной квантовой эффективности. Такие ЛД становятся менее чувствительны к изменениям рабочей температуры и не требуют стабилизации с помощью термоэлектрических охладителей. По указанным причинам, рассматриваемая система материалов $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ широко используется при создании ЛД данного спектрального диапазона.

Установлено, что контролируемое введение упругих напряжений в процессе формирования квантово-размерных лазерных ГС приводит к модификации их зонной структуры и расширяет возможности управляемого воздействия на важнейшие физические параметры создаваемых приборов. В частности, напряженные КЯ позволяют повысить квантовую эффективность и снизить вероятность протекания процессов Оже-рекомбинации, которая является одним из основных факторов, ограничивающих выходную мощность ЛД рассматриваемого диапазона.

Проанализированы модели нахождения общего напряжения в ГС и оценки критических условий генерации ДН. Общепринято, что модель Matthews – Blakeslee (М-В) [4] является хорошей оценкой нижней границы устойчивости ГС по отношению

к генерации ДН. Современным ее развитием является модель [5], основанная на расчете эффективного скалывающего напряжения (τ_{eff}), которое является движущей силой распространения прорастающих дислокаций в напряженных слоях. Данная модель применима для анализа многослойных ГС. Рассмотрены подходы по компенсации упругих напряжений в ГС с напряжениями различного знака.

Рассмотрены способы подавления каналов токов утечки в лазерных ГС путем введения электрон-блокирующих слоев. Такие слои, как правило, помещаются на границе волноводный слой/эмиттер и характеризуется большими значениями ширины запрещенной зоны для удержания носителей. Показано, что применение подобных блокирующих слоев заметно улучшает выходные характеристики изучаемых ЛД.

В главе 2 изложена технология получения ГС методом МОС-гидридной эпитаксии. Приведено описание установки роста, исходные реагенты и особенности получения лазерных структур в условиях данного метода. Представлены методы исследования, использованные для определения параметров выращиваемых ГС.

Третья глава посвящена выбору конструкции активной области лазерных ГС $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As/InP$ с учетом влияния упругих напряжений.

В первом разделе рассмотрены основные физические параметры четверного твердого раствора $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$ и определяющих его тройных растворов $Al_xIn_{1-x}As$ и $Ga_xIn_{1-x}As$. Проведен расчет положения уровней размерного квантования и энергии оптического перехода в КЯ на основе $Al_xGa_yIn_{1-x-y}As$. Расчеты проводились с учетом влияния упругих напряжений на смещение краев энергетических зон. Установлены параметры КЯ, обеспечивающие достижение заданных длин волн излучения при различном уровне вводимых упругих напряжений.

Во втором разделе выполнены расчеты критических толщин (h_c) слоев исследуемых твердых растворов, наращиваемых на подложку InP . Расчеты проводились по модели М-В во всем интервале температур, от температуры роста до комнатной температуры, согласно формуле [4]:

$$\frac{h_c}{b} = \frac{1 - \frac{\nu}{4}}{k \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot (1 + \nu) \cdot \varepsilon} \cdot \left[\ln\left(\frac{\sqrt{2} \cdot h_c}{b}\right) + 1 \right], \quad (1)$$

где $\nu = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{11}}$ – коэффициент Пуассона, C_{ij} – константы упругости, $\varepsilon = \frac{a_l - a_s}{a_s}$ –

двумерная упругая деформация, возникающая из-за разницы параметров решетки эпитаксиального слоя (ЭС) (a_l) и подложки (a_s), b – вектор Бюргерса (при росте ЭС в направлении $\langle 100 \rangle$ для 60° дислокаций $b = \frac{a}{\sqrt{2}}$), k – константа, равная 1, 2 и 4 для сверхрешеток, множественных квантовых ям и одиночного напряженного слоя, соответственно.

Показано, что по мере сужения КЯ, расширяются возможности по увеличению упругих напряжений в них без генерации ДН при условии обеспечения заданной длины волны излучения.

Для расчета критической толщины совокупности напряженно-компенсированных слоев использован метод среднего параметра решетки, согласно которому в модели М-В используется усредненное значение параметра решетки [6]:

$$a^{ГС} = \frac{\sum_n a_n h_n}{\sum_n h_n}, \quad (2)$$

где n – количество ЭС в структуре, a_n – период решетки ЭС; h_n – толщина ЭС.

На практике удобно использовать не усредненное значение параметра решетки, а связанное с ним усредненное значение степени рассогласования всех рассматриваемых слоев ($\varepsilon^{ГС}$):

$$\varepsilon^{ГС} = \frac{\sum_n \varepsilon_n h_n}{\sum_n h_n}, \quad (3)$$

где ε_n – степень рассогласования параметров решетки ЭС (для каждого слоя учитывается с соответствующими знаками).

Очевидно, что за счет усреднения напряжений разных знаков появляется возможность использования отдельных слоев в составе таких напряженно-компенсированных систем, напряжения в которых превышают значения для индивидуальных слоев, но генерации ДН не происходит. Это расширяет диапазон целенаправленного использования упругих напряжений для управления свойствами отдельных ЭС.

В настоящей работе, взаимная компенсация упругих напряжений использовалась при формировании квантово-размерных активных областей ЛД и электрон-блокирующих барьеров.

Стоит отметить, что в данной модели [6] при взаимной компенсации достаточно больших напряжений существует очень небольшой запас погрешностей соблюдения составов и толщин, допустимых при формировании свободных от дислокаций напряженно-компенсированных ГС. В такой ситуации, каждый монослой способен значительно изменить общую энергию напряжения в ГС и привести к генерации ДН. Это может сделать реализацию такой напряженно-компенсированной ГС затруднительной, ввиду практически невозможной задачи достижения точности роста на уровне монослоя. Таким образом, в ряде случаев метод среднего параметра решетки и остальные близкие ему не могут быть достаточно точными для практического применения. При этом, стандартная модель М-В разработана для случая роста на подложке одиночного ЭС и не учитывает взаимного влияния напряжений, возникающих в многослойных ГС.

В третьем разделе проведена оценка распределения упругих напряжений по всей толщине многослойных ГС и критических условий генерации ДН в них. Она основывается на применении модели расчета эффективного скалывающего напряжения τ_{eff} [5]. Этот расчет способен избежать недостатков других моделей взаимной компенсации напряжений и оценить их допустимые величины, превышение которых ведет к генерации ДН. Критерием этого выступает условие $\tau_{eff} > 0$.

Согласно модели, эффективное скалывающее напряжение в прямом направлении выражено формулой:

$$\tau_{eff}^{PP} = \tau_{eff}^z = \cos \lambda \cos \phi \frac{2G(1+\nu)}{(1-\nu)} \left[\frac{\sum_x^z \varepsilon_n h_n}{\sum_x^z h_n} \right] - \frac{Gb(1-\nu \cos^2 \alpha) \cos \phi}{4\pi \sum_x^z h_n (1-\nu)} \left[\ln \left(\frac{\beta \sum_x^z h_n}{b} \right) + 1 \right], \quad (4)$$

где G – модуль сдвига, λ – угол между вектором Бюргерса и лежащим в плоскости границы раздела перпендикуляром к пересечению плоскости скольжения дислокации и поверхности подложки, ϕ – угол между плоскостью скольжения и нормалью к границе раздела, α – угол между вектором Бюргерса и линией дислокации, β – параметр ядра дислокации.

В целом, формула (4) представляет собой баланс двух сил, ответственных за возникновение и препятствие росту ДН. Таким образом, из равенства этих двух сил и связанных с ними напряжений, можно определить критические условия образования ДН. Общий смысл формулы (4) подразумевает, что при положительных значениях τ_{eff} в анализируемой структуре появятся ДН.

Для экспериментальной проверки применимости представленной модели выращены и исследованы фотолюминесцентные характеристики следующих специально спроектированных трех образцов $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с одинаковыми КЯ и различными толщинами и напряжениями растяжения в барьерных слоях (БС). Все образцы выращивались в идентичных условиях и содержали по 12 напряженно-компенсированных КЯ, излучающих на длине волны 1530 нм. Параметры КЯ и БС образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры КЯ и БС исследованных ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ со взаимной компенсацией упругих напряжений.

$\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$	ε (КЯ) [%]	h (КЯ) [Å]	ε (БС) [%]	h (БС) [Å]
Тип А	+1.4	55	-0.8	90
Тип Б	+1.4	55	-0.8	120
Тип В	+1.4	55	-0.5	90

На рис. 1 показаны результаты расчета распределения τ_{eff} (кривая 1) в образцах типа А, Б и В, соответственно.

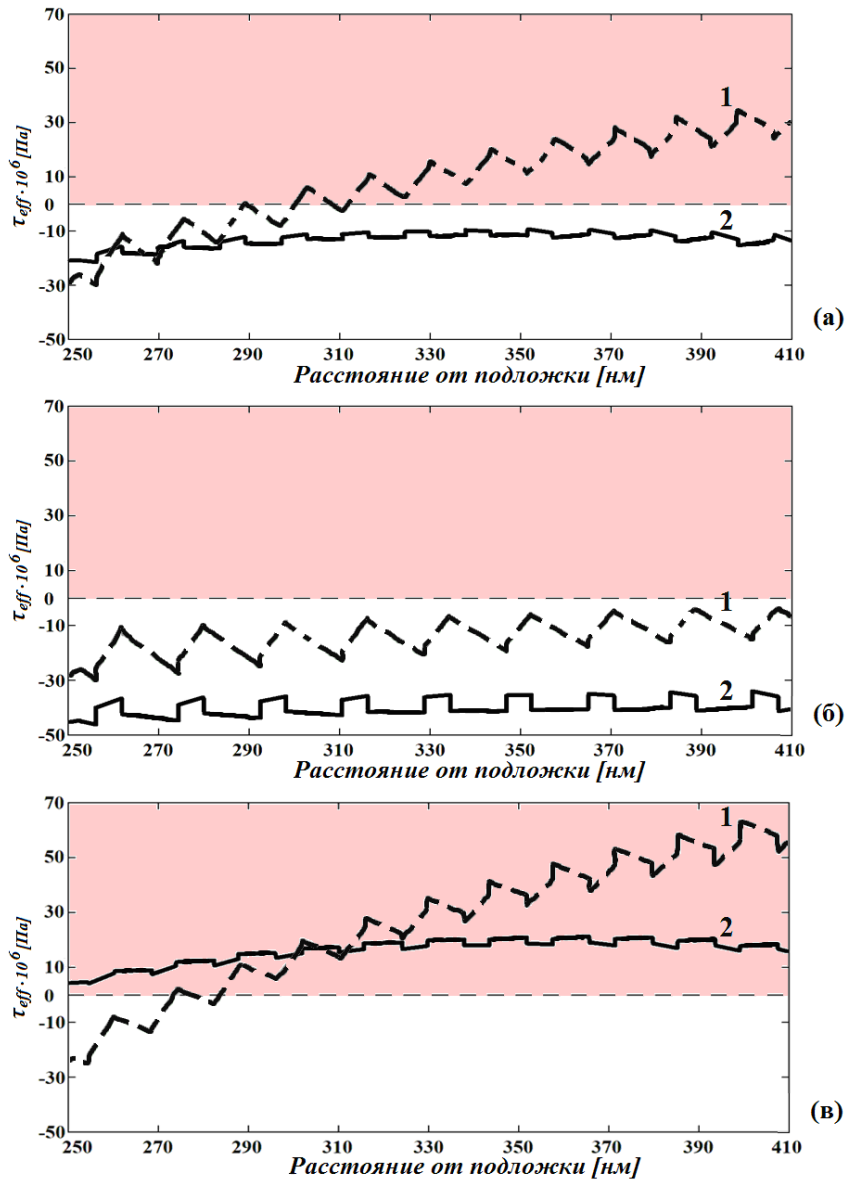


Рис. 1. Расчётная зависимость изменения эффективного скалывающего напряжения по толщине активной области в ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ со взаимной компенсацией упругих напряжений типа А (а), типа Б (б), типа В (в); 1 – стандартная модель (штрихпунктирная линия), 2 – модель с учетом «обратного» напряжения (сплошная линия).

Согласно расчету, в ГС типа Б не происходит генерации ДН, тогда как ГС типа А и В, характеризуются положительными значениями скалывающего напряжения, что ведет к образованию ДН в активной области данных образцов. На рис. 2 представлены результаты измерения интенсивности фотолюминесценции исследуемых образцов. Видно, что образец Б (кривая 2) характеризуется высокой интенсивностью сигнала фотолюминесценции, а образец типа В (кривая 3) – слабым сигналом, что соответствует результатам расчета. Однако, образец А (кривая 1) демонстрирует высокую интенсивность, как и образец Б, что указывает на его высокое кристаллическое совершенство, что противоречит расчету.

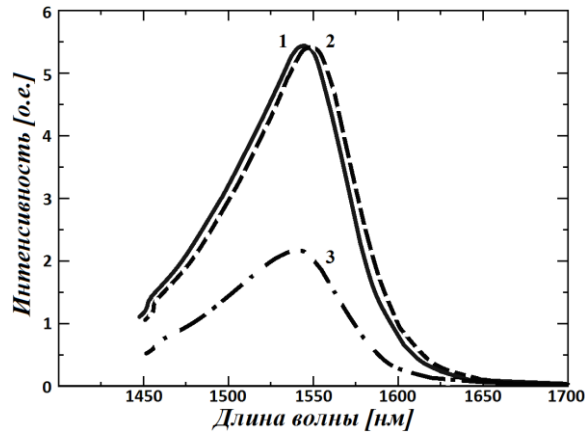


Рис.2. Спектры фотолюминесценции (300K) гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с 12 КЯ (черная сплошная линия (1) – гетероструктура типа А; штрихпунктирная линия (2) – гетероструктура типа Б; штрихпунктирная линия с точкой (3) – гетероструктура типа В).

Возможной причиной этому могут быть допущения, принятые при составлении рассматриваемой модели. В частности, представленная модель обладает возможностью учитывать воздействия напряжений уже выращенных слоев на напряжение слоя наращиваемого. Однако, не учитывает обратного влияния, которое оказывает наращиваемый слой на напряжения в уже выращенных слоях. Схематично, это показано на рис.3.

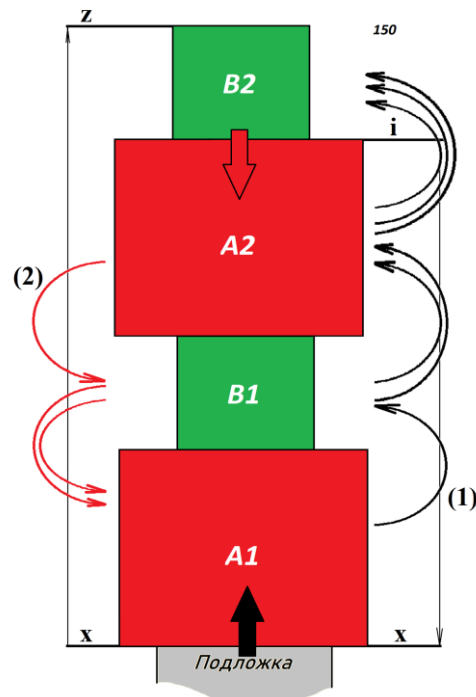


Рис. 3. Схематичное изображение ЭС $\text{Al}_{0.352}\text{Ga}_{0.230}\text{In}_{0.418}\text{As}/\text{Al}_{0.186}\text{Ga}_{0.073}\text{In}_{0.741}\text{As}/\text{InP}$. 1 – «Прямое» напряжение, 2 – «Обратное» напряжение.

Упругие напряжения, вызванные рассогласованием с подложкой, воздействуют на последующий ЭС, что указано стрелками (1). Такое воздействие в дальнейшем будет рассматриваться как воздействие «прямого» напряжения (τ_{eff}^{PP}). Его направление идет от границы X до границы Z. «Обратное» напряжение (τ_{eff}^{OBP}) оказывает влияние от верхнего слоя на всю нижележащую эпитаксиальную структуру, и изображено стрелками (2). Именно оно будет учитывать воздействие, которое оказывает наращиваемый слой на напряжения в уже выращенных слоях, от границы i до X. Поскольку в реальных гетероструктурах все слои взаимно влияют друг на друга, то и при расчете упругих напряжений целесообразно учитывать этот факт.

В связи с этим, в данной работе предложена модификация модели расчета эффективного скалывающего напряжения τ_{eff} (4) путем учета обратного влияния слоев. Тогда для расчета эффективного скалывающего напряжения в прямом направлении $\tau_{eff}^{ПП}$ выражение (4) останется без изменений, а для расчета напряжений в обратном направлении $\tau_{eff}^{ОБП}$ можно использовать следующее выражение:

$$\tau_{eff}^{ОБП} = \tau_{eff_i}^x = \cos \lambda \cos \phi \frac{2G(1+\nu)}{(1-\nu)} \left[\frac{\sum_i^x \varepsilon_n h_n}{\sum_i^x h_n} \right] - \frac{Gb(1-\nu \cos^2 \alpha) \cos \phi}{4\pi \sum_i^x h_n (1-\nu)} \left[\ln \left(\frac{\beta \sum_i^x h_n}{b} \right) + 1 \right] \quad (5)$$

В этом случае, за подложку принимается верхний слой эпитаксиальной структуры и расчет ведется в обратном направлении. Алгоритм вычислений подразумевает первоначальное определение распределения эффективного скалывающего напряжения в прямом направлении $\tau_{eff}^{ПП}$ по (4), а затем его корректировку с учетом определения $\tau_{eff}^{ОБП}$ в обратном направлении по (5).

Предложено, в первом приближении, рассчитывать общее эффективное напряжение как сумму напряжений в «прямом» и «обратном» направлениях:

$$\tau_{eff}'' = \tau_{eff}^{ПП} + \tau_{eff}^{ОБП} \quad (6)$$

При этом условие генерации ДН в структуре ($\tau_{eff}'' > 0$) остается неизменным.

На рис. 1 (кривая 2) показаны результаты расчета распределения общего эффективного напряжения (τ_{eff}'') по толщине исследованных образцов (А, Б и В). Видно, что для образца Б значения τ_{eff}'' остаются меньше нуля для всех слоев, указывая на низкую вероятность образования ДН. Это подтверждается экспериментальными данными по интенсивности фотолюминесценции (рис. 2 (кривая 2)) и совпадает с выводами по расчету τ_{eff} , согласно (4). Аналогичный результат наблюдается и для образца В, где генерация ДН предсказывается, как по величине τ_{eff}'' , так и τ_{eff} . Эксперимент на рис. 2 (кривая 3) подтверждает полученные выводы. В случае образца А имеем $\tau_{eff}'' < 0$, тогда как $\tau_{eff} > 0$. Фотолюминесцентные измерения подтверждают высокое кристаллическое совершенство образца А (рис. 2 (кривая 1)), что говорит о большей достоверности значений τ_{eff}'' для прогнозирования образования ДН в многослойных структурах.

Предложенная модификация модели эффективного скалывающего напряжения, несмотря на все приближения, способна служить ориентиром для оценки параметров КЯ и БС с компенсацией упругих напряжений в ГС, свободных от ДН.

На основе проведенного анализа для интервала длин волн 1400-1600 нм выбраны КЯ $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ шириной 55 Å с взаимной компенсацией напряжений с помощью БС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ ($\varepsilon = -0.8$ %). Напряжения сжатия в КЯ варьировались в интервале от +1.25 % до +1.45 %. Для длин волн вблизи 2000 нм предложена активная область, состоящая из КЯ $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ с расчетным напряжением сжатия +2.0 – +2.5 % и

барьерные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ с расчетным напряжением растяжения $-0.5 - -0.4\%$. Толщина КЯ равна $55 \text{ \AA}$.

В четвертой главе представлены рабочие характеристики полупроводниковых излучателей, созданных на основе ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с компенсацией упругих напряжений.

В первом разделе приводятся результаты сравнения ВТАХ ЛД на основе ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженными КЯ и напряженно-компенсированными КЯ. В первом случае уровень напряжения сжатия в КЯ составлял $\varepsilon = +1.0 \%$, а во втором случае данная величина была увеличена до $\varepsilon = +1.4 \%$ за счет компенсации напряжением растяжения $\varepsilon = -0.4 \%$ барьере. Изучались многомодовые ЛД с шириной полоскового контакта 100 мкм . Показано, что использование компенсации напряжений позволило повысить выходную мощность на $20\text{-}25\%$ при том же токе накачки. Максимальные значения достигали 3.2 Вт при токе 11 А в непрерывном режиме работы, после чего ВТАХ насыщалась.

Подход по взаимной компенсации упругих напряжений в соседних слоях применим не только для формирования КЯ, но может также быть использован для улучшения свойств электрон-блокирующих слоев, призванных снизить токи утечки в эмиттерные слои.

Для снижения насыщения ВТАХ при больших токах накачки предложено дополнительно к напряженно-компенсированным КЯ в лазерной ГС использовать составной электрон-блокирующий барьер с взаимной компенсацией напряжений для увеличения его ширины запрещенной зоны. Данный подход позволил получить ЛД с мощностью излучения в непрерывном режиме генерации 4.2 Вт при токе накачки 15 А . В импульсном режиме получена мощность излучения до 18 Вт при длительности импульса 100 нс , частоте следования 1 кГц и токе накачки не более 80 А . Все измерения проводились при комнатной температуре. Результаты показаны на рис. 4.

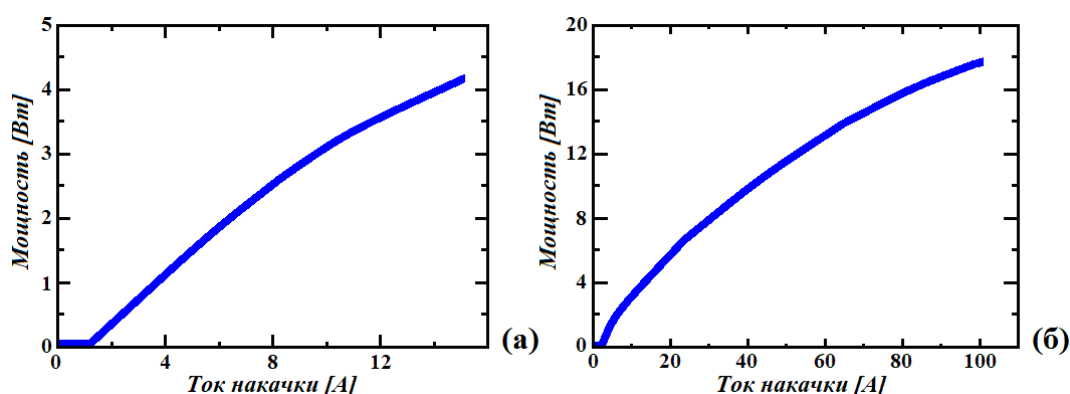


Рис. 4. Ватт-амперная характеристика ЛД на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$: а) в непрерывном режиме; б) в импульсном режиме (100 нс, 1 кГц).

Помимо лазерных излучателей, в настоящее время все более широкое применение находят суперлюминесцентные диоды (СЛД) – полупроводниковые источники

низкокогерентного излучения с повышенной яркостью и широкой спектральной линией. Для ряда практических приложений помимо высокой выходной мощности требуется работоспособность СЛД при повышенных температурах и зачастую увеличенная ширина их спектра. Характерной особенностью СЛД является высокая концентрация носителей заряда в активной области, особенно в предельных режимах эксплуатации, что делает процессы Оже-рекомбинации более вероятными.

В связи с этим, для активной области СЛД использовались напряженно-компенсированные КЯ. Уровень вводимых упругих напряжений противоположного знака в КЯ ($\varepsilon = +1.4\%$) и барьере ($\varepsilon = -0.4\%$) рассчитывался с точки зрения увеличения оптического усиления при сохранении высокого кристаллического совершенства, что подтверждалось достижением максимальной интенсивности сигнала фотолюминесценции образцов. При комнатной температуре приборы излучали более 5 мВт на выходе из волоконного световода, что достаточно для различных практических применений. С повышением температуры квантовая эффективность излучателя снижается и выходная мощность закономерно падает. Тем не менее при температуре 45 °С выходная мощность достигает 2 мВт, что позволяет использовать СЛД для решения многих задач без использования принудительной термостабилизации.

Видно, что использование напряженно-компенсированных КЯ в активной области обеспечивает возможность создания СЛД с мощностью более 5 мВт на выходе одномодового волоконного световода, полушириной спектра 50 – 70 нм и степенью поляризации выходного излучения 25 – 30 дБ.

Во втором разделе предприняты шаги по поиску способов увеличения ширины запрещенной зоны электрон-блокирующих слоев с исключением генерации в них ДН. Логично предположить, что повышение потенциальной высоты такого слоя возможно путем перехода к составам слоев, обеспечивающим увеличение ширины запрещенной зоны, но при этом нарушающим условие изопериодичности с подложкой (рис. 5).

С использованием предложенных составных электрон-блокирующих слоев с увеличенной шириной запрещенной зоны выращены ГС и изготовлены одномодовые ЛД. Ширина мезаполоска составляла 2 мкм. Сборка осуществлялась активной областью вверх на медном основании. Измерения проведены в непрерывном режиме без нанесения

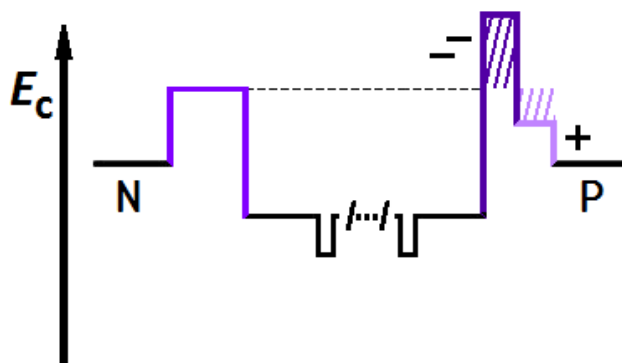


Рис. 5. Схематическое изображение диаграммы зоны проводимости лазерных гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженно-компенсированным барьерным слоем $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (+— напряжения сжатия, — — напряжения растяжения).

отражающих и просветляющих покрытий на грани резонатора.

Установлено, что наклон ВТАХ ЛД на основе ГС с упруго компенсированным электрон-блокирующим слоем на 10-20% больше по сравнению с аналогичной характеристикой лазеров с согласованным барьером $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ (рис. 6 (а)). При этом наблюдалось и незначительное снижение пороговых токов, однако, наличие дополнительного барьера отразилось в ухудшении вольт-амперной характеристики (рис. 6 (б)). В итоге, лазеры с широкозонным барьером продемонстрировали более высокую выходную мощность, подтверждая эффективность использованного подхода по снижению токов утечки в р-эмиттер.

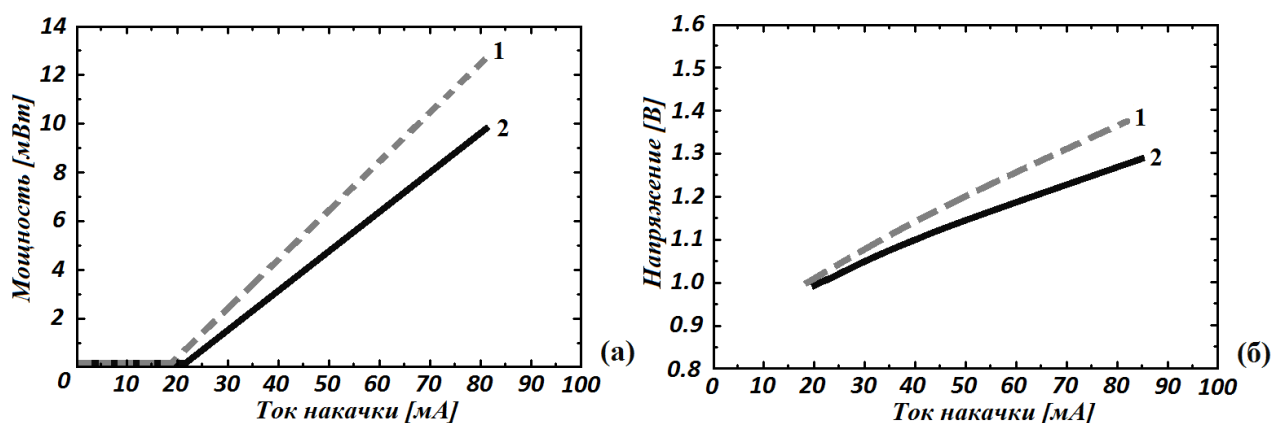


Рис. 6. Ватт-амперные (а) и вольт-амперные характеристики (б) ЛД на основе гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с напряженно-компенсированным (1) и согласованным (2) электрон-блокирующим слоем.

В третьем разделе представлены результаты создания ЛД, ориентированных на длины волн в интервале от 1900 нм до 2000 нм, с применением предложенной модели расчета распределения напряжения по всей толщине ГС, а также взаимно компенсированного электрон-блокирующего слоя. Для формирования активной области указанных ЛД выбраны квантовые ямы $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ с расчетным напряжением сжатия +2.0 – +2.5 % и барьерные слои $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ с расчетным напряжением растяжения -0.5 – -0.4%. Состав КЯ варьировался для изменения длины волны излучения в пределах изучаемого диапазона 1900-2000 нм.

ВТАХ исследованных лазеров представлены на рис. 7. Видно, что хотя и лазеры обоих типов продемонстрировали выходную мощность 1 Вт,

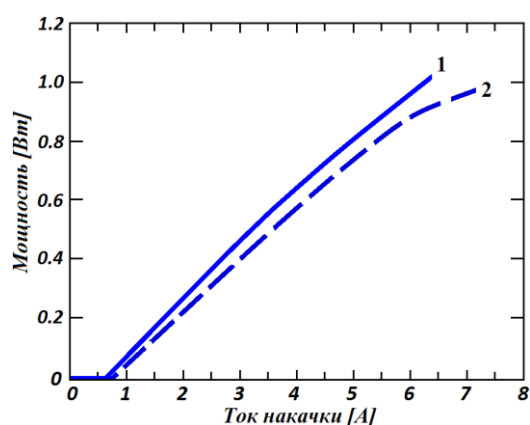


Рис. 7. Ватт-амперные характеристики ЛД $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ со сверхузким волноводом, излучающих на длине волны 1900 нм (1) и 2000 нм (2) в непрерывном режиме генерации.

дифференциальная эффективность длинноволновых образцов, ориентированных на длину волны 2000 нм, закономерно ниже. Такие лазеры характеризуются и повышенным значением порогового тока 0.75 А по сравнению с 0.60 А для образцов с длиной волны излучения 1900 нм. Помимо этого, наблюдается сильное насыщение выходной мощности в длинноволновых ЛД при увеличении тока накачки, особенно при значениях больше 6 А.

Использование компенсации упругих напряжений в ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ позволило улучшить выходные характеристики полупроводниковых излучателей спектрального диапазона 1400-2000 нм.

В заключении кратко описаны результаты работы и приведены выводы.

Основные результаты работы.

В итоге, на основе проведенных расчетов методом МОС-гидридной эпитаксии получены ГС с напряженно-компенсированными КЯ, изготовлены и исследованы ЛД спектрального диапазона 1400-2000 нм на их основе. При этом были получены следующие результаты:

1. Исследованы особенности получения ГС с напряженными и напряженно-компенсированными КЯ в условиях МОС-гидридной эпитаксии.

2. Разработан процесс получения методом МОС-гидридной эпитаксии ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, пригодных для создания мощных ЛД спектрального диапазона 1400 нм - 1600 нм.

3. Предложена модификация метода расчета распределения упругих напряжений по всей толщине ГС, позволившая сделать оптимальный выбор геометрии активной области ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для повышения выходной оптической мощности ЛД.

4. На основе полученных ГС $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ изготовлены ЛД с мощностью излучения в непрерывном режиме генерации 4.2 Вт при токе накачки 15 А. В импульсном режиме получена мощность излучения до 18 Вт при длительности импульса 100 нс, частоте следования 1 кГц и токе накачки не более 80 А.

5. Рассмотрено применение напряженно-компенсированного составного электрон-блокирующего слоя, с максимально допустимыми широкозонными слоями. В результате, данная методика позволила улучшить наклон ВтАХ на 10-20%.

6. Методом МОС-гидридной эпитаксии получены гетероструктуры $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$, излучающие на длинах волн более 1900 нм.

7. Использование напряженно-компенсированных КЯ и электрон-блокирующих слоев позволили создать ЛД с выходной мощностью до 1 Вт в непрерывном режиме работы с длиной волны генерации вблизи 2000 нм.

8. Разработанные подходы использованы при создании СЛД спектрального диапазона 1400-1600 нм. Выходные характеристики СЛД на основе гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ показали, что использование напряженно-компенсированных КЯ в активной области обеспечивает возможность создания СЛД с мощностью более 5 мВт

на выходе одномодового волоконного световода, полушириной спектра 50 – 70 нм и степенью поляризации выходного излучения 25 – 30 дБ.

Список цитированной литературы

- [1] Носов Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов – Москва : Радио и связь, 1989. — 360 с.
- [2] Tandon A., Bour D.P., Chang Y., Lin C., Corzine S.W., Tan M.R. Low threshold, high T_0 and high efficiency 1300 nm and 1500 nm lasers with AlInGaAs active region grown by MOCVD // SPIE. — 2013. — V. 5349. — P. 206.
- [3] Андреев А.Ю., Зегря Г.Г. Оже-рекомбинация в напряженных квантовых ямах // Физика и техника полупроводников. — 1997. — Т. 31. № 3. — С. 358.
- [4] Peter S, Zory Jr. Quantum well lasers / Zory Peter S. Jr. – Academic Press, 1993. — 504 p.
- [5] Болховитянов Ю.Б., Гутаковский А.К., Дерябин А.С., Соколов Л.В. Краевые дислокации несоответствия в гетероструктурах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ ($x \sim 1$): роль промежуточного буферного слоя $\text{Ge}_y\text{Si}_{1-y}$ ($y < x$) в их образовании // Физика твердого тела. — 2011. — Т. 53. № 9. — С. 1699.
- [6] Ekins-Daukes N.J., Kawaguchi K., Zhang J. Strain-balanced criteria for multiple quantum well structures and its signature in X-ray rocking curves // Crystal growth & desing. — 2002. — V. 2. — P. 287.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Яроцкая И.В. Расчет гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с квантовыми ямами для эффективных лазерных излучателей с учетом механических напряжений // Тезисы VII Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов». Москва, Россия. 2-5 Октября 2017 г. С. 181
2. Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х. Моделирование параметров низкоразмерной гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для лазерных диодов с $\lambda_{\text{изл}} = 1.55$ мкм // Тезисы XIX-ой Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто - и наноэлектронике. Санкт-Петербург. Россия. 27 Ноября - 1 Декабря 2017 г. С. 102
3. Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Яроцкая И.В. Расчет упругонапряженной гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ с квантовыми ямами для эффективных лазерных излучателей // Российский технологический журнал. 2018 г. Т. 6. № 2. С. 46-55
4. Мармалюк А.А., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Ладугин М.А., Лобинцов А.В., Рябоштан Ю.Л., Падалица А.А., Романцевич В.И., Сапожников С.М., Светогоров В.Н., Симаков В.А. Полупроводниковые лазеры $\text{AlGaInAs}/\text{InP}$ с повышенным электронным барьером // Тезисы VI Российского симпозиума с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». Санкт-Петербург, Россия. 13-16 Ноября 2018 г. С. 27

5. Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Рябоштан Ю.Л., Яроцкая И.В. Совершенствование гетероструктуры AlGaInAs/InP для лазерных диодов с длиной волны излучения 1.55 мкм // Тезисы VI Российского симпозиума с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». Санкт-Петербург, Россия. 13-16 Ноября 2018 г. С. 71

6. Мармалюк А.А., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Ладугин М.А., Лобинцов А.В., Падалица А.А., Романцевич В.И., Рябоштан Ю.Л., Сапожников С.М., Светогоров В.Н., Симаков В.А. Полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP с повышенным электронным барьером // Квантовая электроника. 2019 г. Т. 49. № 6. С. 519-521

7. Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Ладугин М.А., Падалица А.А., Эйстрих-Геллер В.Ю., Кудрявцев К.Е., Юрасов Д.В., Новиков А.В. Красильник З.Ф. Метаморфные лазерные гетероструктуры на основе AlGaInAs // Труды XIII Международного симпозиума. Нанопизика и нанопэлектроника. Нижний Новгород, Россия. 11 - 14 Марта 2019 г. С. 746

8. Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Ладугин М.А., Падалица А.А., Лобинцов А.В., Сапожников С.М., Курносов В.Д., Романцевич В.И., Курносов К.В., Иванов А.В. Полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP с одномерным фотонным кристаллом в волноводе // Тезисы VII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. Москва, Россия. 18-20 Ноября 2019 г. С. 21

9. Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А., Ладугин М.А., Рябоштан Ю.Л., Яроцкая И.В. Упруго-напряженная активная область мощных лазерных диодов на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ // Тезисы VII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. Москва, Россия. 18-20 Ноября 2019 г. С. 34

10. Рябоштан Ю.Л., Мармалюк А.А., Светогоров В.Н., Ладугин М.А., Падалица А.А., Лобинцов А.В., Сапожников С.М., Курносов В.Д., Романцевич В.И., Курносов К.В., Багаева О.О., Иванов А.В. Гетероструктура AlGaInAs/InP с одномерным фотонным кристаллом для полупроводниковых лазеров с узкой диаграммой направленности // Труды XXIV международного симпозиума «Нанопизика и нанопэлектроника». Нижний Новгород, Россия. 10-13 Марта 2020 г.: сборник трудов, Т.2. С. 725

11. Светогоров В.Н., Акчурин Р.Х. Модель расчета распределения напряжений по всей толщине гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ для лазерных диодов // Тезисы XXI Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто - и нанопэлектронике. Санкт-Петербург, Россия. 25-29 Ноября 2019 г. С. 100

12. Svetogorov V.N., Ryaboshtan Yu.L., Ladugin M.A., Bagaeva O.O., Romantsevich V.I., Kurnosov K.V., Kurnosov V.D., Ivanov A.V. Strain-compensated active region of

high-power laser diodes on $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ // Proceedings of 20-th International Conference Laser Optics. St. Petersburg, Russia. 2-6 November 2020. P. 31

13. Сабитов Д.Р., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Падалица А.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Васильев М.Г., Васильев А.М., Костин Ю.О., Шелякин А.А. Суперлюминесцентные диоды спектрального диапазона 1.5-1.6 мкм на основе напряженно-компенсированных квантовых ям $\text{AlGaInAs}/\text{InP}$ // Квантовая электроника. 2020 г. Т. 50. № 9. С. 830-834

14. Светогоров В.Н., Рябоштан Ю.Л., Ладугин М.А., Падалица А.А., Волков Н.А., Мармалюк А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. Полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур $\text{AlGaInAs}/\text{InP}$ со сверхузким волноводом и повышенным электронным барьером // Квантовая электроника. 2020 г. Т. 50. № 12. С. 1123-1125

15. Багаева О.О., Данилов А.И., Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В., Курнявко Ю.В., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Романцевич В.И., Рябоштан Ю.Л., Симаков В.А., Светогоров В.Н., Чернов Р.В. Полупроводниковые лазеры с асимметричным периодическим оптически связанным волноводом на длину волны излучения 1.5-1.6 мкм // Квантовая электроника. 2020 г. Т. 50. № 6. С. 600-602

16. Светогоров В.Н., Рябоштан Ю.Л., Сабитов Д.Р., Ладугин М.А., Мармалюк А.А. Расчет упруго-напряженной активной области $\text{AlGaInAs}/\text{InP}$ полупроводниковых излучателей спектрального диапазона 1.3-1.6 мкм // Труды XV Международного симпозиума. Нанотехника и наноэлектроника. Нижний Новгород, Россия. 9 - 12 Марта 2021 г. С. 838

17. Волков Н.А., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Рябоштан Ю.Л., Светогоров В.Н., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. Полупроводниковые $\text{AlGaInAs}/\text{InP}$ -лазеры ($\lambda = 1450\text{-}1500$ нм) с сильно асимметричным волноводом // Квантовая электроника. 2021 г. Т. 51. № 2. С. 133-136

18. Светогоров В.Н., Рябоштан Ю.Л., Волков Н.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Бахвалов К.В., Веселов Д.А., Лютецкий А.В., Стрелец В.А., Слипченко С.О., Пихтин Н.А. Мощные полупроводниковые лазеры $\text{AlGaInAs}/\text{InP}$ спектрального диапазона 1.9-2.0 мкм со сверхузким волноводом // Квантовая электроника. 2021 г. Т. 51. № 10. С. 909-911

19. Светогоров В.Н., Рябоштан Ю.Л., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Бахвалов К.В., Веселов Д.А., Лютецкий А.В., Стрелец В.А., Слипченко С.О., Пихтин Н.А. Гетероструктуры $\text{GaInAsAlGaInAs}/\text{InP}$ с компенсацией упругих напряжений для мощных лазерных диодов спектрального диапазона 1.9-2.0 мкм // Тезисы VIII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. Москва, Россия. 23-25 Ноября 2021 г. С. 47