

Институт системного анализа РАН

На правах рукописи

УДК 517.958:621.372.8 + 621.375.826

Гвердцители Владимир Ираклиевич

**Модели многослойных волноводов для мощных инжекционных
лазеров**

Специальность 05.27.03 – Квантовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт системного анализа РАН.

Научный руководитель:

академик РАН, доктор технических наук Геловани Виктор Арчилович

Официальные оппоненты:

доктор физ. – мат. наук, профессор Гордиенко Вячеслав Михайлович

кандидат технических наук Зверков Михаил Викторович

Ведущая организация:

РНЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится «___» _____ 2010 г. в _____ час. _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.126.01 в Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН (140700 г. Шатура Московской области, ул. Святоозерская, д.1, Круглый зал.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПЛИТ РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук, ст. н. сотр.

Дубров В.Д.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Одной из основных составляющих технологической революции явилось создание компактных и легко управляемых источников когерентного излучения – полупроводниковых лазеров. Начало быстрого прогресса в разработках таких лазеров было положено в научной группе Ж.И. Алферова, где был создан первый полупроводниковый лазер на гетероструктуре в системе GaAs–GaAlAs, работающий при комнатной температуре. В результате успешного развития технологии создания гетероструктур полупроводниковые лазеры стали самым распространенным в мире источником когерентного излучения. Со времени создания полупроводниковых инжекционных или диодных лазеров (ИЛ, ДЛ) в 1962 г. был пройден большой путь для улучшения их характеристик и изучения теоретических основ этих приборов. Переход от гомолазеров к гетеролазерам, а далее к лазерам на квантово-размерных структурах позволил существенно снизить пороговые токи (от десятков кА/см² до десятков А/см²), увеличить выходную мощность, улучшить спектральные характеристики ИЛ. По сей день ведутся работы по дальнейшему улучшению излучательных и спектральных характеристик ИЛ и полупроводниковых оптических усилителей. Но, несмотря на это, остаётся ряд нерешенных проблем в физике полупроводниковых лазеров и усилителей. Два важнейших параметра требуют дальнейшего совершенствования – это выходная мощность одиночного лазера и ширина диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной p–n-переходу. Наука и производство требуют увеличения мощности и существенного сужения диаграммы направленности излучения. Существуют различные способы увеличения апертуры выходного пучка. Один из наиболее распространённых способов — создание расширенного волновода, то есть увеличение толщины волноводного слоя лазерной структуры или уменьшение разности показателя преломления между волноводными и ограничительными слоями. Для сужения диаграммы направленности также используются структуры с периодически изменяющимися профилями показателя преломления ограничительных слоев и лазерные структуры с системой туннельно связанных волноводов. Дальнейшее уменьшение этим способом расходимости пучка, по-видимому, невозможно, так как большая толщина волноводных слоев приводит к значительному снижению

коэффициента оптического ограничения, т.е. степени показателя пространственного перекрытия активных слоев и светового поля, росту порогового тока и ухудшению теплоотвода от активной области.

В основе прогресса инжекционных лазеров лежало существенное улучшение характеристик лазерных диодов после освоения методов выращивания ультратонких слоев и развития технологий получения полосковых структур различных типов. Большое значение имело преодоление явлений быстрой деградации лазеров и достижение ресурса $10^4 - 10^5$ часов. С развитием гетеролазеров на основе квантово-размерных структур InGaAs/GaAs/AlGaAs, в которых подложка прозрачна для лазерного излучения, появилась возможность по новому взглянуть на создание приборов работающих на вытекающих модах.

Лазер с вытекающим излучением в расширенный волновод был предложен Д. Скайфресом в 1977 г. В подходе Д. Скайфреса в лазере с вытекающей волной узкая область усиления помещена в части структуры с более низким показателем преломления и световым «вытеканием» из области усиления. Недостаток этого подхода заключается в том, что он вызывает дополнительные «потери вытекания» и требует, в целом, более высоких плотностей порогового тока. Потери вытекания могут быть сокращены изменением конструкции. К тому же, если конструкция не оптимизирована, например, очень большой угол вытекания или слишком большое рассеяние света на отражающей поверхности, то свет может попасть на контактный слой, где будет рассеян или поглощен. Этот результат играет наиболее существенную роль в «длинных» устройствах, он обеспечивает неожиданно высокие «внутренние потери».

В 2000 г. Швейкином В.И. была предложена новая конструкция ИЛ. Был проведён теоретический анализ возможности увеличения выходной мощности излучения при использовании принципа вытекания по сравнению с классическими ИЛ. Было показано, что в лазерах традиционной геометрии со структурой типа «вытекающая волна» возможно увеличение мощности до 5 раз.

Известны лишь немногие работы, где предложены и реализованы диодные лазеры (ДЛ) с увеличенным размером излучающей площадки и в которых используется вытекающее излучение. Общим для них является развитие лазерной генерации в тонкой активной области (как в обычных торцевых ДЛ). Выходящим в таких устройствах является вытекающее в полупроводниковую подложку излучение.

Несмотря на высокую направленность выходного излучения, ДЛ с вытеканием излучения в подложку присущи следующие недостатки:

- использование подложки в качестве области распространения излучения ограничивает выбор лазерных длин волн (из-за требования прозрачности подложки), и необходимых углов вытекания, особенно в области их малых значений;
- наличие на одной грани расположенных рядом каналов излучения (вытекающего и традиционного торцевого) приводит к снижению эффективности ДЛ из-за технологической трудности разделения этих излучений.

В конструкции ДЛ, заложены предложенные В.И. Швейкиным новые принципы вовлечения в лазерную генерацию излучения, вытекающего при определенных условиях из активной области (оптического волновода). Эти конструкции ДЛ с вытекающим излучением в оптический резонатор обладают многими достоинствами, в том числе и многократно увеличенным размером излучающей площадки на выходной поверхности.

Диссертационная работа относится к области физики инжекционных лазеров и математического моделирования устройств оптоэлектроники, изучающей проблемы одновременного использования оптических и электрических методов обработки, передачи и хранения информации. В работе рассматриваются принципы моделирования многослойных лазерных и волноводных диэлектрических и полупроводниковых структур, которые составляют основу оптоэлектроники. Современные технологии выращивания многослойных структур позволяют создавать полупроводниковые ИЛ, с рекордной мощностью излучения на уровне десятков ватт. Одна из перспективных лазерных структур рассматривается в настоящей работе – диодный лазер с вытекающим излучением в оптический резонатор (ДЛ-ВИОР). Отсутствие достаточно точного математического анализа во многих случаях мешает реализации преимуществ таких устройств и их более широкому внедрению в оптоэлектронные системы. В настоящее время в литературе можно найти примеры лишь самосогласованных моделей инжекционных лазеров и ДЛ-ВИОР в частности. Эти модели, как правило, не могут дать хорошего описания физических процессов, происходящих в устройстве, потому что в них отсутствует решение задачи нахождения

распределения электромагнитного поля внутри структуры. В частности, в рамках единой задачи не рассматриваются важные при оптимизации лазера проблемы нахождения интенсивностей поперечных мод, пороговых токов и определения ватт-амперных характеристик (ВтАХ). Математическая модель, позволяющая проводить подробное теоретическое исследование ДЛ-ВИОР, с одной стороны, необходима для совершенствования конструкций подобных приборов, с другой, может позволить более полно раскрыть возможности таких устройств в современной оптоэлектронике. Это делает возможным замену исследования реальных устройств численным экспериментом, что должно существенно удешевить и ускорить разработку новых структур.

Цели диссертационной работы

Цели диссертационной работы состояли в создании метода теоретического описания, а также в создании инструмента проектирования мощного диодного лазера с вытекающим излучением в оптический резонатор и его применения для исследования и оптимизации излучательных характеристик инжекционных лазеров с вытекающей волной излучения в широкий волноводный слой. Для достижения целей были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка математической модели диодного лазера с вытекающим излучением в оптический резонатор и создание программы для численного моделирования процессов генерации в этих устройствах;
- Определение с использованием созданной модели пороговых токов, ВтАХ, профилей интенсивности ближнего и дальнего поля излучения.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена математическая модель для быстрого и точного вычисления комплексных собственных значений (СЗ) и собственных функций (СФ) одномерного волнового уравнения для многослойных структур мощных инжекционных лазеров. Для этого использованы два метода, с помощью которых находятся, затем уточняются и обобщаются в комплексную область значений приближенные СЗ. В результате реализации модели появляется

возможность расчета активных волноводных и лазерных структур, в том числе с вытекающими модами.

2. Сравнение результатов расчетов СЗ и СФ по предложенной модели для структур, рассчитанных другими авторами с помощью других методов, показало лучшие результаты точности вычислений, особенно в области мнимых частей СЗ, что особенно важно при расчете активных волноводных и лазерных структур с вытеканием.
3. Предложенный метод нахождения СЗ волнового уравнения успешно был использован в самосогласованной модели многослойного инжекционного лазера для нахождения стационарных значений мощности излучения и профилей ближнего поля генерируемых поперечных мод.
4. Создан и опробован оригинальный метод ускорения численного решения самосогласованной задачи нахождения мощностных характеристик инжекционных лазеров.
5. Результаты измерений ВтАХ образцов многослойных инжекционных лазеров со слоем вытекания и результаты расчетов по предложенной модели показали хорошее совпадение.

Научная и практическая значимость работы

Созданная математическая модель может быть использована для улучшения излучательных характеристик ДЛ-ВИОР. Модель позволяет достаточно точно (в большинстве случаев с погрешностью 10–12%) предсказывать значения пороговых токов и ВтАХ конструируемого прибора.

Оптимизация конструкции лазера и модельный расчет позволяют повысить эффективность проектирования инжекционных лазеров для волоконно-оптических линий связи, приборов для считывания или записи информации, накачки твердотельных лазеров и других устройств, составляющих основу современной оптоэлектронной техники.

Достоверность

Представленные в диссертации результаты обоснованы теоретическим анализом, численным моделированием и были верифицированы на экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения.

1. Методика расчёта постоянных распространения и профилей электромагнитного поля поперечных мод в многослойных активных и пассивных оптических волноводах (волноводная задача).
2. Методика расчёта частотного спектра, модового усиления и профилей поля оптических мод в активных резонаторах с многослойной полупроводниковой структурой (резонаторная задача).
3. Самосогласованная модель расчёта оптических и мощностных характеристик (частоты, профили ближнего и дальнего поля, пороговые токи, наклон ВтАХ) многослойных инжекционных лазеров, которая учитывает взаимное влияние неравновесных носителей в активном слое на оптические характеристики структуры и соответственно пространственное распределение полей.
4. Метод ускорения компьютерного решения самосогласованной задачи по поиску стационарных решений системы дифференциальных уравнений (в частных производных в общем случае), описывающих баланс количества фотонов и неравновесных носителей в структуре, вместе с волновым уравнением, описывающим пространственные, временные и частотные характеристики генерируемых лазерных мод.
5. Результаты расчётов по представленной методике характеристик одноэлементных ДЛ-ВИОР совпадают с экспериментальными данными приборов, изготовленных в компании GNOptics. Наблюдаются близкие значения пороговых токов, максимальных мощностей излучения и наклона характеристик в диапазоне токов накачки до 10 А в приборах с шириной активной области 100 мкм (максимальная расчетная мощность 8.5 Вт, экспериментальная 8 Вт) и до 22 А для ширины 200 мкм (20 Вт и 17 Вт, соответственно). Расчётные и экспериментальные значения пороговых токов составили 0,57 А и 0,6 А

соответственно для ширины полоска 100 мкм; 0,9 А и 1,1 А для ширины полоска 200 мкм. Пороговая плотность тока, таким образом, в рассмотренных ДЛ-ВИОР составляет 450 – 600 А/см². Расчетная расходимость излучения в дальнем поле составила 10°, экспериментальная – 11° при поперечном размере области излучения 5 мкм.

Апробация диссертационной работы

Результаты работы, изложенные в настоящей диссертации, докладывались на следующих научно-технических конференциях: «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (25 – 30 октября 2009 г., Москва–Троицк), «VII Курчатовская молодежная научная школа семинар» (10–12 ноября 2009 г.) и на научных семинарах института системного анализа Российской Академии Наук.

Основные научные результаты опубликованы в 7 печатных работах. Из них 4 статьи в периодических научных изданиях, рекомендованными ВАК [1,3,6,7].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Общий объем составляет 103 страницы, включая 28 иллюстраций, 8 таблиц, список литературы из 105 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** содержится описание области научных исследований, к которой относится настоящая работа. Кратко изложено содержание представленных в литературе работ по данному направлению и обоснована актуальность темы исследований. В конце введения изложены цели диссертационной работы и ее наиболее важные результаты вместе с описанием их новизны и практической значимости. Приведено краткое изложение содержания диссертации.

Глава I представляет собой обзор литературы, в котором рассматривается современное состояние исследований полупроводниковых инжекционных лазеров с вытекающим излучением в волновод в области математического моделирования. Описаны основные различия между лазерами с вытекающим излучением в оптический

волновод и традиционными инжекционными лазерами, Рассматриваются принципиальные преимущества и недостатки диодных лазеров.

Достаточно полно представлен набор основных методов, которыми пользуются исследователи для расчёта СЗ волнового уравнения. Рассмотрены следующие основные методы расчёта многослойных волноводных структур, которые могут быть использованы для моделирования ДЛ: метод интеграла Коши, метод аргумента, метод полюсов коэффициента отражения, метод матриц переноса, метод плотности волновых векторов, метод конечных элементов.

Рассмотрены перспективы решения двумерной волноводной задачи с помощью метода эффективного показателя преломления.

Кроме вопросов моделирования и расчёта, рассматриваются преимущества и недостатки инжекционных лазеров с разными видами вытекания излучения. Проанализирован ряд подходов к оптимизации излучательных характеристик в лазере с вытекающей волной. Рассмотрен ряд исследований по альтернативным способам решения задачи увеличения мощности диодных лазеров при сохранении высокого качества лазерного излучения.

Наряду с описанием современных ДЛ с вытекающей волной излучения проведен анализ основных тенденций развития таких приборов. Подробно рассмотрено состояние дел в направлениях развития теории и технологии ДЛ–ВИОР.

В **Главе II** приведено описание предложенной математической модели ДЛ - ВИОР и дано ее обоснование. Оптическая часть модели базируется на использовании комбинации нескольких методов решения волнового уравнения. Это обеспечивает:

- высокую для скалярного метода точность;
- быстроту расчета, позволяющую проводить решение уравнений оптической части модели в итерационном цикле;
- возможность расчёта как волноводных, так и лазерных структур, в которых СЗ волнового уравнения являются комплексными числами.

Основная идея метода (реализации модели) состоит в решении одномерного скалярного уравнения Гельмгольца, описывающего поперечную модовую структуру оптической волны для ТЕ мод. Выбор ТЕ мод оправдан тем, что рассматривается многослойная структура, в которой моды данной поляризации оказываются

существенно более добротными, чем моды ТМ типа. Лазерная геометрия многослойного ДЛ-ВИОР показана на рис.1.

Уравнение Гельмгольца имеет вид

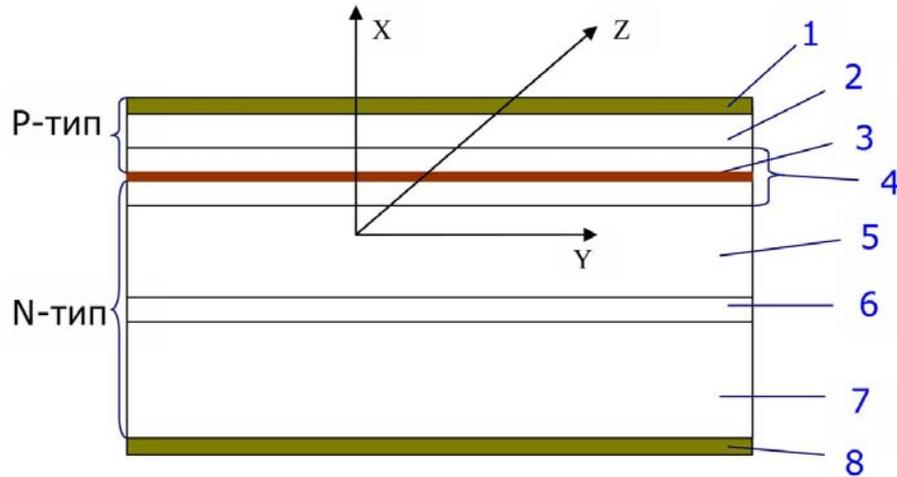


Рис.1. Вариант многослойной структуры ДЛ.

- (1) - Металлизация P-стороны (2) - Ограничительный слой со стороны P-типа
 (3) - Активный слой (4) - Волноводная область (5) - Слой втекания излучения (3-12 мкм)
 (6) - Ограничительный слой со стороны N-типа (7) - Подложка N-типа
 (8) - Металлизация N-стороны

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(x) - \beta^2 \right) \psi(x) = 0, \quad (1)$$

где $\psi(x)$ - амплитудные профили мод – собственные функции (СФ); x – координата по поперечной к слоям оси, ω - частота оптического излучения; c – скорость света; $\varepsilon(x) = n^2(x)$ - комплексная диэлектрическая проницаемость; $n(x)$ - комплексный показатель преломления; β - продольная (по оси z) постоянная распространения (СЗ).

Граничные условия для уравнения (1) в зависимости от конкретной задачи и конкретной структуры могут быть выбраны двух видов.

Первый вид – это условия равенства нулю СФ и их первых производных на бесконечности, что соответствует локализованным СФ (волноводным модам):

$$\psi(\pm\infty) = 0;$$

(2)

$$\frac{d\psi}{dx}(\pm\infty) = 0.$$

Второй вид – условия излучения, которые пригодны не только для волноводных, но и для вытекающих мод:

$$\left[\frac{d}{dx} \pm j\hat{\kappa}_{\pm} \right] \psi(\pm\infty) = 0, \quad (3)$$

где $\hat{\kappa}_{\pm}$ – поперечные постоянные распространения в полупространствах, ограничивающих многослойную структуру.

Условия (3) более удобны в расчетах, так как, во-первых, позволяют использовать меньший интервал области определения функции $\psi(x)$; во-вторых, допускают незатухающие на бесконечности решения, что соответствует вытекающим модам.

Нахождение СЗ в таких волноводах является необходимым для решения лазерной задачи. Для этого используется комбинация двух методов: метода характеристических матриц (или матриц переноса) и метода конечных разностей. Особенность способа состоит в том, что СЗ волнового уравнения (1) находятся путём минимизации амплитуд вытекающих из волновода полей, поскольку волноводной моде всегда соответствует экспоненциально затухающий характер поля за пределами волноводной структуры.

Расчёт проводится следующим образом. Задаётся амплитуда электрического и магнитного полей на одной из внешних границ структуры (например, граница 8–4 на рис.1) и для заданного значения СЗ β методом матриц переноса рассчитывается амплитуда полей на противоположной границе структуры (граница 2–3 на рис.1). Вдоль действительной оси проводится сканирование постоянной распространения β во всей области допустимых значений с малым шагом. Таким способом, замечая значения β_j , при которых амплитуды полей на выходе имеют локальные минимумы, мы находим набор приближений к СЗ. После расчёта спектра СЗ методом матриц переноса найденные значения используются в качестве начальных приближений для расчёта более точным методом конечных разностей. В методе конечных разностей решается однородная комплексная система линейных уравнений с матрицей очень

большого ранга (до 10^4). Предварительный расчёт приближенных СЗ существенно сокращает количество итераций при нахождении корней этого матричного характеристического уравнения. Затем рассчитываются СФ методом обратных итераций. Такой подход позволяет рассчитывать постоянные распространения и конфигураций поля волноводных мод для большого количества слоев. Метод характеризуется высокой скоростью счета. Это позволяет его использовать в самосогласованной и динамической моделях инжекционных лазеров, где процедура расчёта полей и постоянных распространения требует многократного повторения.

Для расчета поперечных мод инжекционных лазеров недостаточно решения волноводной задачи. Пространственное распределение оптического поля в лазерной моде определяется не только геометрией волновода, но наличием зеркал и активной среды. Инжекционный лазер формирует спектр излучения, тогда как в волноводе спектр излучения определяется извне. С математической точки зрения условия возбуждения мод означают, что для резонаторной задачи в уравнении (1) собственными значениями будут являться частоты генерации ω_j , а не постоянные распространения β_j . Исходя из параметров резонатора, можно задать одну постоянную распространения, соответствующую единственной продольной моде:

$$\hat{\beta}_0 = \frac{M\pi}{L} + j \frac{1}{2} \left[\alpha_{int} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right],$$

где M – номер продольной моды; L - длина резонатора; α_{int} - внутренние диссипативные (нерезонансные) потери в резонаторе; R_1 , R_2 - коэффициенты отражения зеркал по мощности.

На этот раз мы находим спектр собственных комплексных частот $\hat{\omega}_j$ – модовый спектр активного резонатора. Задача в такой постановке позволяет включить в модель кинетические уравнения, описывающие баланс фотонов и инжектированных неравновесных носителей в объеме активного слоя лазерного резонатора:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_{sp}} - \sum_j S_j G_j;$$

(4)

$$\frac{dS_j}{dt} = S_j \cdot \left(G_j - \frac{1}{\tau_{ph}} \right) + \eta \frac{N}{\tau_{sp}},$$

где N – концентрация неравновесных электронно-дырочных пар носителей в активном слое; J – плотность тока накачки, d – толщина активного слоя; η – фактор спонтанного излучения (10^{-3} - 10^{-5}); τ_{ph} – время жизни фотонов в «холодном» резонаторе (несколько пикосекунд); τ_{sp} – время спонтанной рекомбинации носителей (несколько нано секунд); S_j – плотность фотонов в j -й моде; G_j – модовое усиление (зависит от концентрации носителей через решение волнового уравнения).

Таким образом, формируется самосогласованная резонаторная задача, что означает учёт как воздействия среды и геометрии лазерного резонатора на характеристики оптического поля, так и влияние поля на параметры среды, наполняющей резонатор. Самосогласованная резонаторная задача требует нахождения частот лазерных мод и модового усиления G_j при итерациях:

$$G_j = -2 \operatorname{Im}(\hat{\omega}_j). \quad (5)$$

В результате самосогласованная задача состоит из резонаторной (оптической) части (уравнение (1) с граничными условиями (2) или (3)) и кинетических уравнений (4), которые решаются с помощью итераций, чтобы в конечном итоге найти параметры стационарного режима генерации. Между собой уравнения (1) и (4) связаны материальным соотношением для комплексного показателя преломления активного слоя:

$$\hat{n}_{act} = n_{act_0} - \left| \frac{dn}{dN} \right| \cdot N + j \frac{1}{2k_0} \frac{dg}{dN} (N - N_{tr}), \quad (6)$$

где \hat{n}_{act} – комплексный показатель преломления активного слоя; n_{act_0} – действительная часть комплексного показателя преломления активного слоя без накачки; $\left| \frac{dn}{dN} \right|$ – дифференциальный коэффициент преломления; $\frac{dg}{dN}$ – дифференциальное усиление

материала активного слоя; N_{tr} —концентрация нулевого усиления или затухания (концентрация «просветления») активного слоя.

Такой подход использовался в статических и динамических моделях инжекционных лазеров, однако он не подразумевал учета пространственного распределения оптического поля мод в лазерном резонаторе. Компьютерное моделирование позволяет решить эту проблему. Для этого используется резонаторная задача как элемент алгоритма самосогласованной задачи.

Исходными параметрами расчетной модели являются толщина d_i и комплексные показатели преломления n_i (или диэлектрическая проницаемость ϵ_i) слоев лазерной структуры, дифференциальное усиление $\frac{dg}{dN}$ и концентрация “просветления” N_{tr} материала активного слоя, зависимость показателя преломления того же слоя от концентрации неравновесных носителей $\frac{dn}{dN}$, геометрические размеры лазера L, d_i, W , плотность тока накачки J .

В процессе реализации алгоритма решения самосогласованной задачи применили оригинальный способ ускорения счёта. Большая часть счётного времени в цикле итераций переменных N и S_j от значения на k -ом шаге к значению на $k+1$ -ом, так как требуется очень громоздкий расчёт значений модового усиления G_j через параметры структуры (резонаторная задача). Исследование показало, что на некотором этапе расчёта можно избавиться от громоздких вычислений G_j , заменив их линейной аппроксимацией:

$$G_j = A_j \cdot (N - \tilde{N}_{trj}), \quad (7)$$

где A_j —дифференциальное модовое усиление; \tilde{N}_{trj} —аппроксимирующий коэффициент (концентрация нулевого модового усиления). После этого система (4) превращается в обычную систему нелинейных уравнений первого порядка, которую можно решать, например, методом Рунге-Кутты. Мы не усложняли алгоритм и решали систему методом Эйлера, что и до упрощения. Коэффициенты A_j и \tilde{N}_{trj} вычислялись, исходя из

значений G_j , взятых на разных итерационных шагах. Критерием перехода на ускоренный расчёт служила стабилизация параметров аппроксимации.

Изложенная методика дает возможность рассчитывать следующие характеристики многослойных лазерных структур: пороговый ток генерации I_{th} , модовый спектр излучения $\hat{\omega}_j$, пространственное распределение интенсивности излучения лазера $S(x) = \sum_j S_j \cdot |\psi_j(x)|^2$ (в том числе для каждой моды в отдельности $|\psi_j(x)|^2$), ВТАХ $S(I) = \sum_j S_j(I)$ без учета тепловых, частотных и прочих нелинейных эффектов, диаграмму направленности излучения (дальнее поле):

$$I_l(\theta) = \cos^2(\theta) \cdot \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_l(x) \cdot \exp[j \cdot \sin(\theta k_0 x)] dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_l(x) dx \right|^2}, \quad (8)$$

где θ – угол относительно оси резонатора, $k_0 = \omega_0/c$ – волновое число в вакууме.

Глава III посвящена экспериментальному исследованию образцов мощных ДЛ-ВИОР. Рассмотрены принципы работы и отличительные особенности структур этих лазеров.

В обычных современных диодных лазерах и ДЛ-ВИОР, вытекающее излучение снижают до минимума, так как оно равноценно потерям. В ДЛ-ВИОР, напротив, в области рабочих токов контролируют достаточно высокий уровень вытекания излучения из активного слоя в слой втекания (рис. 2). Этот контроль осуществляется таким выбором состава и толщины слоёв лазерной гетероструктуры, в том числе и слоя втекания, при котором показатель преломления слоя втекания $n_{вт}$ превышает эффективный показатель преломления $n_{эфф}$. При этом вытекающее излучение, распределённое по всей поверхности активного слоя, следовательно с малым углом расходимости, будет втекать вдоль продольной оси оптического резонатора под определённым углом расходимости $\varphi = \pm \cos(n_{эфф}/n_{втекания})$.

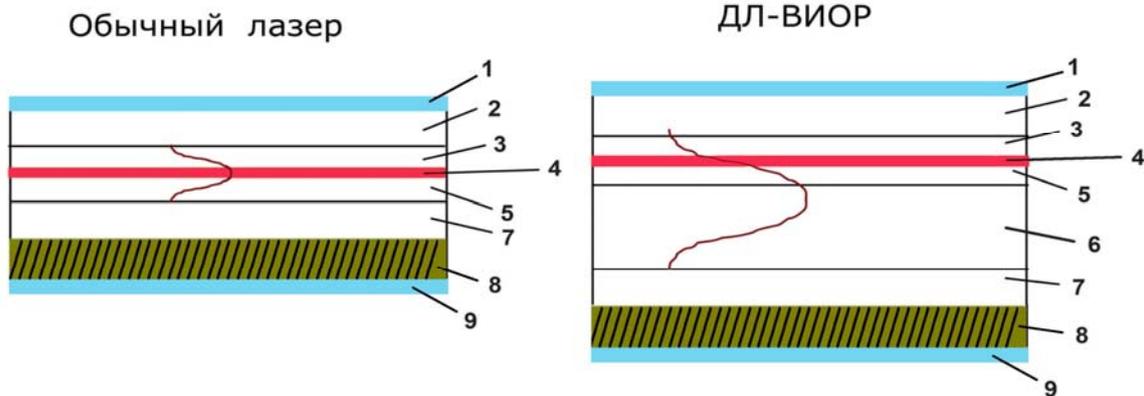


Рис 2. Схема продольного сечения гетероструктуры для обычного лазера и ДЛ ВИОР: (1) – контактный p-слой (2,7) – ограничительные слои, (3-5) - барьерные слои GaAs, (4) - активный слой InGaAs, (6) – слой втекания, (8) – n- подложка из GaAs, (9) контактный n –слой.

Приведены таблицы параметров исследуемых структур, ВТАХ и вольт - амперные экспериментальные характеристики для нескольких типов лазеров с разными геометрическими параметрами.

Средняя мощность излучения ДЛ-ВИОР измерялась прибором OPHIR NOVA II (с комплектом измерительных головок OPHIR PE10-SH-V2, OPHIR PE50-SH-V2 и OPHIR L30A-SH-V1) с паспортной точностью $\pm 15\%$. Напряжение и ток были измерены ампервольтметром APPA_107 с точностью $\pm 0.1\%$.

В главе IV по методике, изложенной в главе II, сравниваются с экспериментом результаты расчета структур, рассмотренных в главе III. Для этого взяты параметры гетероструктур (ГС) 940-15 и 940-25S, изготовленных компанией GNOptics.

Проведены расчеты профилей мод и ВТАХ для мощных инжекционных лазеров ДЛ-ВИОР. Результаты показаны на рис. 3, 4. Параметры слоёв структуры (ГС) 940-15

Номер слоя	Доля алюминия	Легирование Слоя	Легирование слоя	Тип слоя	Толщина слоя, мкм	Показатель преломления	Коэффициент поглощения, см ⁻¹
		Тип	Концентрация, см ³				
1	0	P	3,00E+19	Неактивный	0,1	3,5568	210,0
2	0,3	P	4,00E+18	Ограничительный	0,3	3,3777	28,0
3	0,15	P	3,00E+17	волноводный	1	3,4637	2,10
4	0,4	P	1,00E+16	волноводный	0,02	3,3204	0,07
5	0,1	P	1,00E+16	волноводный	0,02	3,4925	0,07
6	0	Н/Л	-----	волноводный	0,02	3,5568	0,07
7	0	Н/Л	-----	Активный	0,008	3,6420	110,0
8	0	Н/Л	-----	волноводный	0,01	3,5568	0,030
9	0,1	N	1,00E+16	волноводный	0,13	3,4925	0,030
10	0,15	N	1,00E+16	Вытекание	8	3,4637	0,030
11	0,3	N	2,00E+18	Ограничительный	0,3	3,3777	6,0
12	0	N	2,00E+18	Неактивный	100	3,5568	6,00

приведены в таблице. Активный слой выращивается в виде тройного кристаллического полупроводникового соединения $In_xGa_{1-x}As$, в котором содержание атомов индия $x = 10\%$, галлия – 90% , мышьяка – 100% , т.е. 10% галлия заменено индием.

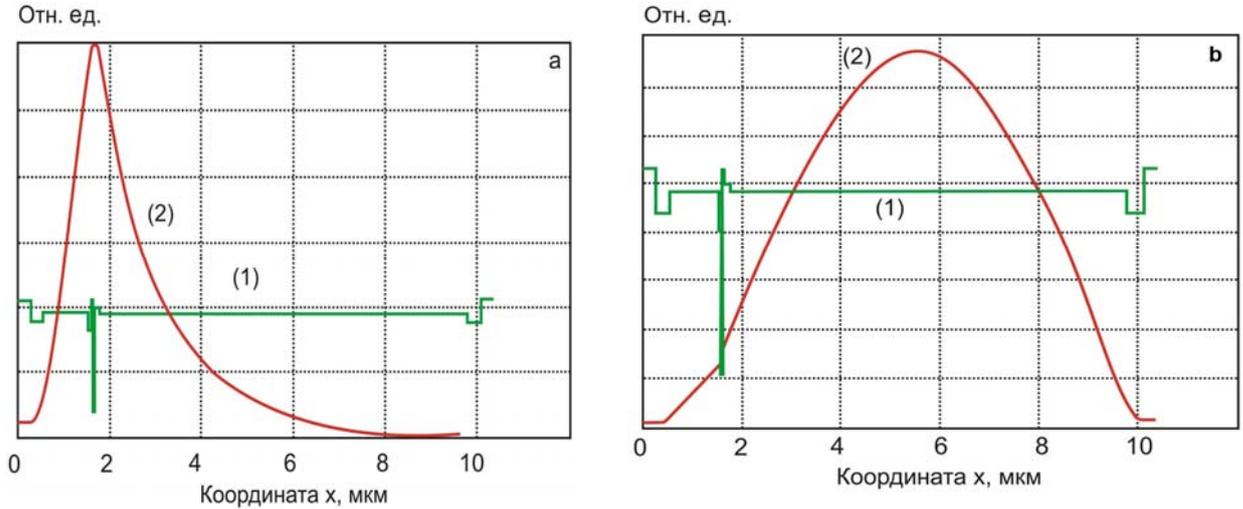


Рис.3 Профиль показателя преломления структуры (1) ГС 940-15 и распределение интенсивности нулевой поперечной моды ДЛ-ВИОР (2) под порогом (а) $I=0,05 A$ и при токе накачки $I=5A$ (б).

Сравнение показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных ВТАХ. Расчет подтвердил, что при достижении порога генерации и последующем увеличении тока накачки существенно трансформируется профиль основной поперечной моды от состояния, показанного на рис.3а, к состоянию, изображенному на рис.3б. При больших токах накачки происходит снижение показателя преломления активного слоя, в результате чего максимум генерируемой моды смещается в широкий волноводный слой (5 - 8 мкм). Этот процесс можно интерпретировать как вытекание излучения из активного слоя. Такая ситуация благоприятствует достижению больших мощностей излучения, так как основная часть мощности распространяется в толстом волноводном слое.

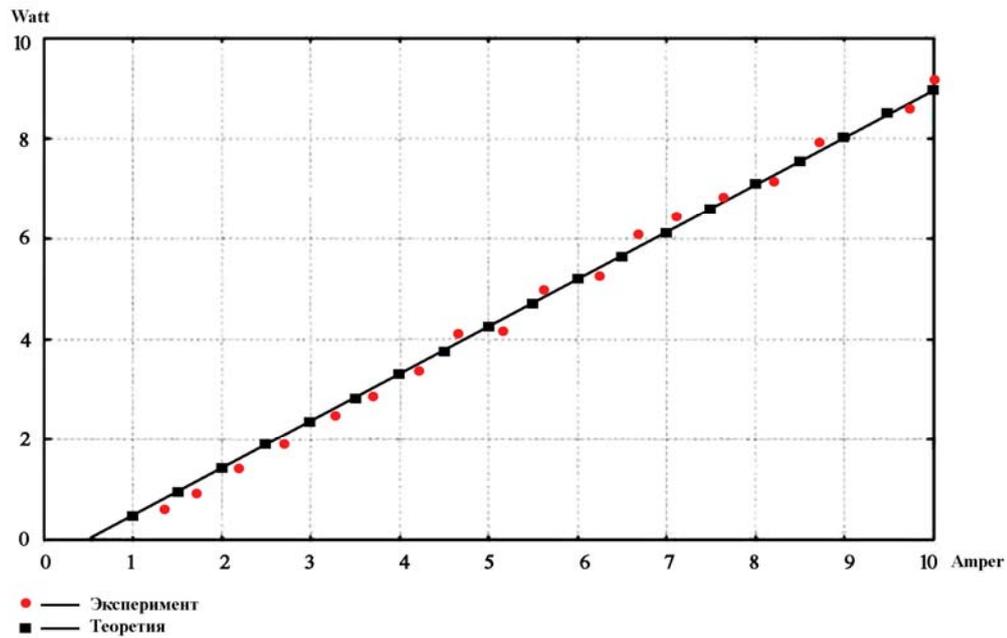


Рис. 4. Экспериментальная и расчетная ВтАХ ГС 940_15.

Выводы

1. Создана методика расчёта постоянных распространения и профилей электромагнитного поля поперечных мод в многослойных активных оптических волноводах.
2. Создана методика расчёта частотного спектра, модового усиления и профилей поля резонаторных мод в лазерных резонаторах с многослойной полупроводниковой структурой. В алгоритме использованы следующие методы: конечных разностей, матриц переноса, минимизации вытекающих полей, секущих (Ньютона), обратных итераций с прогонкой. Для точного вычисления комплексных частот сложных структур лучше всего себя проявил метод конечных разностей с последующим решением матричного комплексного характеристического уравнения методом секущих.
3. На основе резонаторной оптической модели разработана самосогласованная модель инжекционных лазеров, которая учитывает взаимное влияние неравновесных носителей в активном слое на оптические характеристики структуры и соответственно на распределение полей в модах.

Самосогласованная модель полупроводникового лазера содержит в себе, во-первых, волновое уравнение для определения пространственного распределения амплитуд и фаз оптических полей мод в поперечном сечении лазера. Во-вторых, в систему входят два уравнения баланса неравновесных носителей в активной области (областях) и фотонов в поперечных модах (кинетические или скоростные уравнения).

4. Предложен метод ускорения компьютерного решения самосогласованной задачи по поиску стационарных решений системы дифференциальных уравнений (в частных производных в общем случае), описывающих баланс количества фотонов и неравновесных носителей в структуре, вместе с волновым уравнением, описывающим пространственные, временные и частотные характеристики генерируемых лазерных мод.
5. Метод ускорения счёта показал возможность сократить время решения самосогласованной задачи в 100 – 1000 раз в зависимости от количества слоёв и тока накачки структуры. Показана возможность замены трудоёмкого расчёта модового усиления на расчёт с помощью линейной аппроксимирующей функции концентрации неравновесных носителей. Коэффициенты указанной функции взяты из предшествующих итерационных шагов метода Эйлера.
6. Расчёт распределения интенсивности поперечных мод структур ДЛ-ВИОР показал, что из возможных 10 мод под порогом генерации при переходе через порог «выживает» одна, что связано исключительно с выбором толщины буферных слоёв, ограничивающих волноводный слой. Математически это выражается в том, что собственные значения (комплексные частоты) подпороговых мод трёх низших порядков при переходе через порог приобретают одинаковые значения. Моды более высоких порядков становятся энергетически невыгодными и не участвуют в процессе генерации.
7. Расчёт показал существование в ДЛ-ВИОР механизма вытекания излучения из активного слоя в широкий волноводный слой. Расчет подтвердил увеличение степени вытекания с ростом накачки, вызванное изменением оптических параметров волноводной структуры.
8. Сравнение результатов расчёта по представленной методике ватт-амперных характеристик структур одноэлементных ДЛ-ВИОР с экспериментальными

данными приборов, изготовленных в компании GNOptics, показало совпадение пороговых токов, максимальных мощностей излучения и наклона характеристик в диапазоне токов накачки до 10 А в приборах с шириной активной области 100 мкм (максимальная расчетная мощность 8.5 Вт, экспериментальная 8 Вт) и до 22 А для ширины 200 мкм (20 Вт и 17 Вт, соответственно). Расчётные и экспериментальные значения пороговых токов составили 0,57 А и 0,6 А соответственно для ширины полоска 100 мкм; 0,9 А и 1,1 А для ширины полоска 200 мкм. Пороговая плотность тока, таким образом, в рассмотренных ДЛ-ВИОР составляет 450 – 600 А/см². Расчетная расходимость излучения в дальнем поле составила 10°, экспериментальная – 11° при поперечном размере области излучения 5 мкм.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Гвердцителли В.И., Ржанов А.Г., Арбаш А.М., Метод ускорения расчёта самосогласованной задачи моделирования инжекционного лазера. Вестник РУДН, серия: Математика, Информатика, Физика. 2009, №3, с. 65-69.
2. Гвердцителли В.И., Современное состояние исследований и разработок в области реализации инжекционных лазеров. Существующие альтернативные решения и подходы. Молодой ученый. 2009, №10, с. 7-14.
3. Гвердцителли В.И., Ржанов А.Г., Моделирование многослойных инжекционных лазеров с внутренним вытеканием излучения, Краткие сообщения по физике ФИАН, 2009, №11, с. 36-40.
4. Гвердцителли В.И., Модель диодного лазера с вытекающим излучением в оптический резонатор. Молодой ученый. 2009, №11. с. 9-10.
5. Гвердцителли В.И., Алгоритм решения самосогласованной модели диодного лазера с вытекающим излучением в оптический резонатор. Молодой ученый. 2009, №11, с.11-13.
6. Гвердцителли В.И., Экспериментальная и расчетная модель диодного лазера с вытекающим излучением в оптический резонатор, Альтернативная энергетика и экология. 2009, №11.с.114-118.

7. Гвердцители В.И., Результаты применения алгоритма решения самосогласованной модели диодного лазера с вытекающим излучением в оптический резонатор, Альтернативная энергетика и экология. 2009, №11. с.119-122.