

УДК 51-73

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ С ВНУТРЕННИМ ВЫТЕКАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. И. Гвердцители<sup>1</sup>, А. Г. Ржанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт системного анализа РАН,  
117312, Москва, пр-т 60-летия Октября, д. 9

<sup>2</sup> Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,  
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Представлена математическая модель многослойных инжекционных лазеров, базирующаяся на самосогласованной кинетической задаче с учетом взаимосвязи между оптическими и электрическими характеристиками прибора, измерена ватт-амперная характеристика такого лазера. Предложен быстрый алгоритм расчета комплексных собственных значений волнового уравнения. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментально измеренными ватт-амперными характеристиками изготовленных компанией GNOptics диодных лазеров с вытекающим излучением в оптический резонатор. Найдены профили оптического поля в допороговом и надпороговом режимах для структур мощных инжекционных лазеров с внутренним вытеканием излучения. Получено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, диодные лазеры, многослойные волноводы.

В качестве объекта мы описываем многослойную полупроводниковую лазерную структуру для генерации когерентного излучения большой мощности (до нескольких

<sup>1</sup>e-mail: gverts@yahoo.com

<sup>2</sup>e-mail: rjanov@mail.ru

десятков ватт). Подобная структура может быть рассмотрена как многослойный диэлектрический волновод с усилением, ограниченный с двух сторон зеркалами. Мы рассматриваем сначала задачу, в которой результатом расчета являются постоянные распространения и профили интенсивности волноводных и “вытекающих” мод. Это служит базой самосогласованной лазерной модели, в которой учтены зеркала и нелинейное взаимодействие между лазерным излучением и неравновесными носителями в активном слое лазера. Для учета влияния активных и пассивных слоёв на модовый состав излучения мы используем понятия локального усиления (затухания), комплексных диэлектрической проницаемости и показателя преломления.

В оптической модели многослойной структуры рассмотрено волновое уравнение, которое в приближении гармонической когерентной волны, распространяющейся вдоль оси  $z$ , переходит для ТЕ мод в уравнение типа Гельмгольца:

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

где  $\epsilon = \epsilon(x)$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $c$  – скорость света в вакууме;  $x$  – координата по поперечной оси;  $\omega$  – частота оптического излучения;  $\beta$  – продольная (по оси  $z$ ) постоянная распространения;  $\psi(x)$  – амплитудные профили мод – собственные функции (СФ).

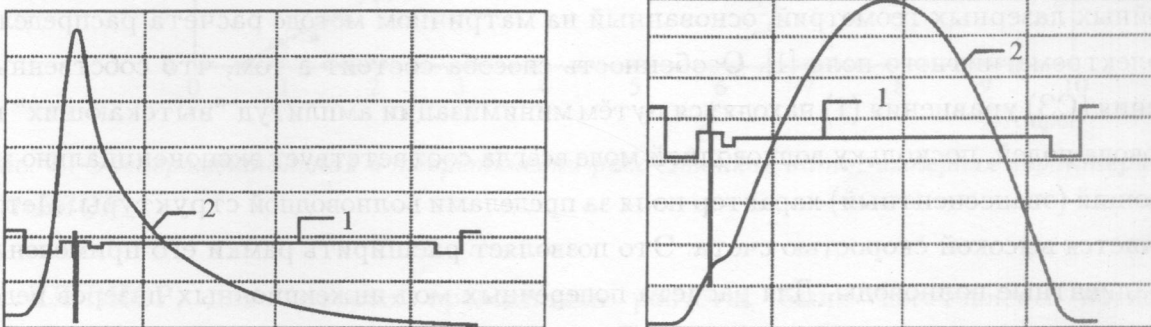


Рис. 1. Профиль показателя преломления многослойной структуры и распределение интенсивности основной поперечной моды ДЛ-ВИОР под порогом при токе накачки  $I = 0.05$  А.

Рис. 2. Профиль показателя преломления многослойной структуры и распределение интенсивности основной поперечной моды ДЛ-ВИОР при токе накачки  $I = 5$  А.

Т а б л и ц а 1

## Характеристики слоев полупроводниковой лазерной структуры

Доля алюминия	Легирование		Толщина слоя (nm)	Показатель преломления	Коэффициент поглощения (см <sup>-1</sup> )
	Тип	Концентрация			
0	P-легированный	3.00E+19	0.1	3.5568	210.0
0.3	P-легированный	4.00E+18	0.3	3.3777	28.0
0.15	P-легированный	3.00E+17	1	3.4637	2.1
0.4	P-легированный	1.00E+16	0.02	3.3204	0.07
0.1	P-легированный	1.00E+16	0.02	3.4925	0.07
0	P-легированный	1.00E+16	0.01	3.5568	0.07
0	Нелигированный	1.00E+16	0.008	3.6420	110.0
0	N-легированный	1.00E+16	0.01	3.5568	0.03
0.1	N-легированный	1.00E+16	0.13	3.4925	0.03
0.15	N-легированный	1.00E+16	8	3.4637	0.03
0.3	N-легированный	2.00E+18	0.3	3.3777	6.0
0 (подложка)	N-легированный	2.00E+18	100	3.5568	6.0

Мы представляем эффективный способ численного расчёта параметров мод для многослойных лазерных геометрий, основанный на матричном методе расчёта распределения электромагнитного поля [1]. Особенность способа состоит в том, что собственные значения (СЗ) уравнения (1) находятся путём минимизации амплитуд “вытекающих” из волновода полей, поскольку волноводной моде всегда соответствует экспоненциально затухающий (эванесцентный) характер поля за пределами волноводной структуры. Метод отличается высокой скоростью счета. Это позволяет расширить рамки его применения на градиентные волноводы. Для расчета поперечных мод инжекционных лазеров недостаточно решения волноводной задачи. Пространственное распределение оптического поля в лазерной моде определяется не только геометрией волновода, но присутствием 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) СЗ будут являться не постоянные распространения  $\beta_j$ , а частоты генерации  $\omega_j$ . Исходя из параметров резонатора, мы находим спектр комплексных частот – модовый спектр. Задача в такой постановке соответствует возможности использования кинетических уравне-

ний, описывающих баланс фотонов и инжектированных носителей в объеме лазерного резонатора. Самосогласованная резонаторная задача в такой постановке требует нахождения модового усиления [2, 3], частот и профилей лазерных мод при итерациях для нахождения параметров стационарного режима генерации.

По изложенной методике были проведены расчеты профилей мод и ватт-амперных характеристик для мощных инжекционных лазеров ДЛ-ВИОР (диодный лазер с вытекающим излучением в оптическом резонаторе), которые представлены на рис. 1–3. Параметры слоёв лазера приведены в табл. 1.

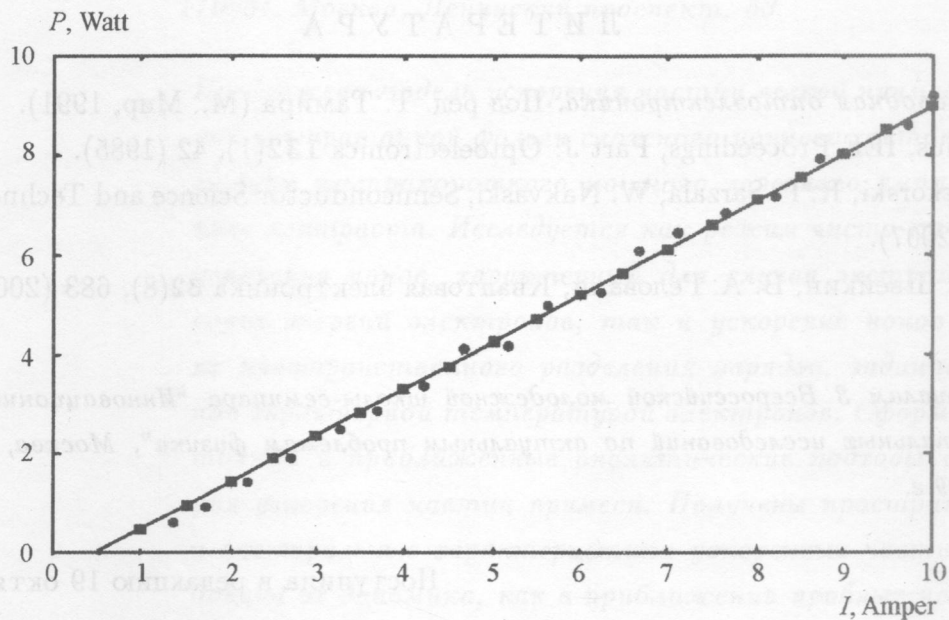


Рис. 3. Экспериментальная и теоретически рассчитанная ватт-амперная характеристика ДЛ-ВИОР.

ДЛ-ВИОР, для которых проводились расчёты, были изготовлены компанией GNOptics. Экспериментальное исследование лазеров проводилось там же. В эксперименте велись измерения ватт-амперных и вольт-амперных характеристик четырёх различных структур ДЛ-ВИОР [4]. На каждой из гетероструктур формировались полосковые лазерные диоды различной ширины (от 10 до 200 мкм) с различными отступами от полоска до ограничивающей канавки, а также с различной глубиной канавки.

Сравнение показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов для ватт-амперной характеристики лазера с шириной полоска 100 мкм. Расчет показал, что при достижении порога генерации (0.6 А) и последующем увеличении тока

накачки происходит существенная трансформация профиля основной поперечной моды от состояния, изображенного на рис. 1, к состоянию, изображенному на рис. 2. При больших токах накачки происходит снижение показателя преломления активного слоя, в результате чего максимум генерируемой моды смещается в широкий волноводный слой (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.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Волноводная оптоэлектроника*. Под ред. Т. Тамира (М., Мир, 1991).
- [2] J. Buus, IEE Proceedings, Part J: Optoelectronics **132**(1), 42 (1985).
- [3] L. Piskorski, R. P. Sarzala, W. Nakvasi, Semiconductor Science and Technology **22**(6), 593 (2007).
- [4] В. И. Швейкин, В. А. Геловани, Квантовая электроника **32**(8), 683 (2002).

*По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики", Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.*

Поступила в редакцию 19 октября 2009 г.