

07

О моделировании спектральных, ватт-амперных и пороговых характеристик инжекционного лазера

© М.Г. Ноппе

Новосибирский государственный технический университет

Поступило в Редакцию 17 сентября 1997 г.

В окончательной редакции 13 апреля 1998 г.

Описан метод моделирования спектральных, ватт-амперных и пороговых характеристик инжекционного лазера, основанный на эффекте зависимости коэффициента усиления от плотности энергии. Результаты моделирования позволяют описать ряд экспериментальных наблюдений.

1. На основе эффекта зависимости коэффициента усиления от плотности энергии $g(P_E)$ [1] развит метод расчета спектральных, ватт-амперных характеристик (ВАХ) и пороговых характеристик инжекционного полупроводникового лазера [2,3], позволяющий провести моделирование ряда экспериментальных наблюдений. В настоящем сообщении приведены основные положения метода и некоторые результаты компьютерного моделирования ряда экспериментов.

2. Эффект зависимости коэффициента усиления $g(P_E)$ от плотности энергии [1] работает, когда эффект насыщения несуществен. Указанная зависимость $g(P_E)$ приводит к нелинейности уравнений относительно плотности энергии. Из этих уравнений получаются [3] фазовое условие и условие стационарной генерации для нелинейной модели лазера в следующей форме:

$$\int_{\sqrt{R_1(\omega_m)}}^{1/\sqrt{R_2(\omega_m)}} \frac{dx}{[g(P_{0m}(x + 1/x)) - \alpha]x} = L_Z, \quad (1)$$

где $R_1(\omega_m)$, $R_2(\omega_m)$ — коэффициенты отражения слева и справа; $g(P_{0m}(x + 1/x))$ — коэффициент усиления на частоте ω_m , рассчитываемый по формуле (4) из [2]; g зависит от функций распределения,

рассчитываемых по [3] при условии электронейтральности, и плотностей состояний в зонах [3]; α — коэффициент потерь, вычисляемый по формулам (3.8.25), (3.8.24) из [4]; L_z — длина лазера. Коэффициент для вынужденного перехода рассчитывается с помощью формулы, полученной из уравнений матрицы плотности для двухуровневой модели с релаксацией:

$$(H_{21}/\hbar)^2 T_2/2, \quad (2)$$

где T_2 оценивается по формуле $T_2 = 1.27 \cdot 10^{-11}$ сК/Г, полученной в [5]; матричный элемент гамильтониана H_{21} рассчитывается с помощью формул (3.6.10), (3.6.13), (3.6.19) из [14]. Определив P_{0m} из (1), найдем мощность когерентного излучения направо на частоте ω_m по формуле из [3]:

$$P^+(\omega_m, j) = cP_{0m}(1 - R_2(\omega_m))L_x L_y / \sqrt{R_2(\omega_m)}. \quad (3)$$

ВАХ направо определяем по формуле:

$$P_s^+(j) = \sum_M P^+(\omega_M, j). \quad (4)$$

3. В экспериментальных работах, цитируемых ниже, не представлены все данные, необходимые для расчетов. Поэтому в работе использована одна модель лазера — $(p - \text{In}_{0.71}\text{Ga}_{0.29}\text{As}_{0.61}\text{P}_{0.39}/\text{InP})$ — лазер с параметрами и формулой для накачки из [8]. Для учета температурной зависимости ширины спектральной линии (см. экспериментальные данные на рис. 2.11; 2.12 в [12] для другого типа лазеров) использована аппроксимационная формула с поправочной постоянной, точное значение которой должно быть уточнено для конкретного лазера, так как ширина линии может изменяться на два порядка [12]. Цель моделирования — сравнить функциональное поведение рассчитанных кривых в зависимости от различных параметров с результатами экспериментов, проведенных с лазерами различных типов. а) На рис. 1, а построены рассчитанная мощность по формуле (3) для двух мод с $\lambda_1 = 1.31369 \mu\text{m}$ и $\lambda_2 = 1.31666 \mu\text{m}$ при $T = 293$ К в зависимости от тока. Отметим: скорость роста мощности моды с ростом тока снижается, что соответствует эксперименту [6]. Таким образом, результат счета на основе построенной физической модели позволяет объяснить характер кривых, полученных в [6]. б) На рис. 1, б построена ВАХ по формуле (4) и два спектра для токов $j_1 = 30$ мА и $j_2 = 33$ мА при $T = 293$ К, что находится в соответствии с экспериментом (см. рис. 6 в [7]).

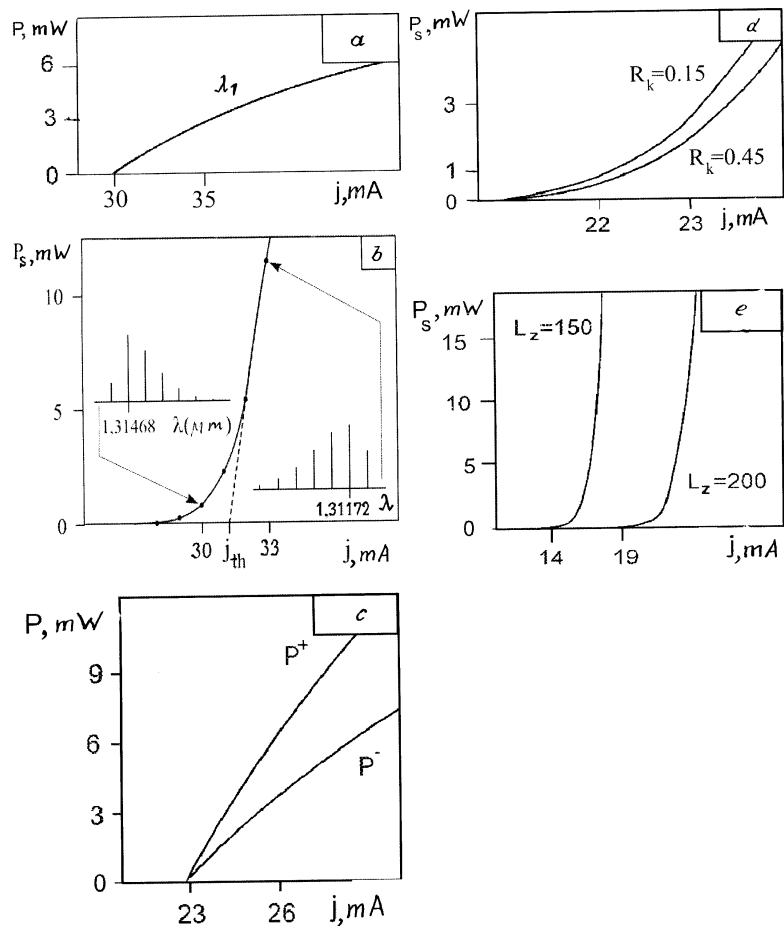


Рис. 1. ВАХ, спектры и мощности отдельных мод в зависимости от тока.

в) Рассчитав ВАХ для $T = 273 \text{ K}$ и $T = 293 \text{ K}$, найдем пороговый ток j_{th} для указанных ВАХ с помощью линейной аппроксимации. Описывая зависимость порогового тока от температуры с помощью функции $j(T) = j_0 \exp(T/T_0)$, найдем значение характеристического параметра

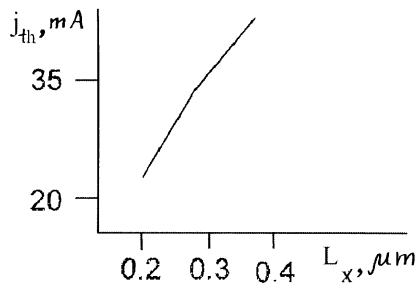


Рис. 2. Пороговый ток в зависимости от толщины активной зоны.

T_0 : $T_0 = 69$, что коррелирует с наблюдаемым значением $T_0 = 60$ из [8].
 г) Мощность излучения для одной частоты через левую и правую грани лазера при $R_1 = 0.3005$ и $R_2 = 0.1505$ представлена на рис. 1, *c*, что находится в соответствии с экспериментом [9]. д) На рис. 1, *d* представлены ВАХ для двух лазеров: I — при $R_x = 0.45$ ($x = 1.2$); II — при $R_k = 0.15$ ($k = 1.2$). Полученные ВАХ находятся в соответствии с экспериментом [10]. е) На рис. 1, *e* представлены ВАХ для $L_z = 200 \mu\text{m}$ и $L_z = 150 \mu\text{m}$, что коррелирует с экспериментом [11]. ж) Пороговый ток в зависимости от толщины активной зоны $j_{th}(L_x)$ представлен на рис. 2 и находится в соответствии с экспериментом (см. рис. 64 в [7]).

4. Таким образом, сравнение функционального поведения рассчитанных кривых в зависимости от различных параметров с результатами экспериментов, проведенных с лазерами различных типов, показало хорошее качественное соответствие, что указывает на актуальность развиваемого метода.

Автор приносит благодарность Я.С. Гринбергу за иницирующее обсуждение и Л.М. Ноппе за помощь при оформлении рисунков.

Список литературы

- [1] *Honne M.G.* // Тр. XI Междунар. Вавиловской конф. по нелинейной оптике. Новосибирск, 1997.
- [2] *Honne M.G.* // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. АПЭП-96. Т. 3. Новосибирск, 1996. С. 91–92.

- [3] *Hoppe M.G.* Физические основы нелинейной теории инжекционных полупроводниковых лазеров. Новосибирск, 1995. 113 с.
- [4] *Кейси Х., Паниш М.* Лазеры на гетероструктурах. Т. 1. М.: Мир, 1981. 299 с.
- [5] *Алферов Ж.И., Гореленок А.Т., Мамутин В.В.* и др. // ФТП. 1984. № 11. С. 1999–2005.
- [6] *Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 1. С. 72–76.
- [7] *Елисеев П.Г.* // Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983. 294 с.
- [8] *Su C.B., Olshansky R., Manning J., Powazinik W.* // Appl. Phys. Lett. V. 44. N 11. June 1984. P. 1030–1032.
- [9] *Bouadma N., Riou J., Kampfer A.* // Electr. Lett. 1985. V. 231. N 13. P. 566–567.
- [10] *Dutta Niloy K., Deimel Peter P.* // IEEE J. 1983. QE-19. N 4. P. 496.
- [11] *Levine B.F., Van Der Ziel J.P., Bethea C.G.* // Electr. Lett. 1982. V. 18. N 16. P. 690–691.
- [12] *Физика полупроводниковых лазеров* / Под ред. Х. Такумы. М.: Мир, 1989. 310 с.