

半导体激光器阈值行为的研究*

吴正茂 夏光琼 陈建国 卢玉村

(四川大学光电系, 成都 610064)

提要 采用平均场近似,用洛仑兹函数来描述增益曲线和自发辐射,得到了多模速率方程组的隐式解析解。在此基础上,着重对阈值附近半导体激光器的载流子密度、输出功率以及阈值电流等重要特性进行了研究。理论和实验结果吻合得很好。

关键词 半导体激光器, 阈值, 洛仑兹函数

1 引言

在众多用来研究半导体激光器的理论模型中,速率方程是应用最广的。一般来说,由于速率方程组是一组非线性方程,所以不存在普适形式的解析解。然而,在某些情况下,采用合理的近似,还是可以找出速率方程的隐式或显式解析解,并用它来研究半导体激光器的特性^[1,2]。

迄今为止,即使在平均场近似下,所有这些近似要么忽略自发辐射的贡献(阈值以上),要么忽略光子与载流子的相互作用(阈值以下),或者假设半导体激光器单模运行。否则就只有借助于计算机模拟进行数值求解。Lee等人^[3]的研究表明,由于激光来源于受激自发辐射,在研究半导体激光器的某些重要特性时,尤其是研究阈值特性时,自发辐射对不同振荡模式的贡献是不能忽略的。基于这种考虑, Lee等人通过对速率方程组进行数值求解来研究半导体激光器的模式特性以及其它重要特性。

本文采用平均场近似对速率方程组进行求解。我们所采用的速率方程组中包含了自发辐射对不同的振荡模式的贡献,并考虑了阈值附近的多模运行特性。通过用洛仑兹函数来描述增益曲线和自发辐射,解析完成了表征载流子与光子相互作用的因子的积分,得到了关于载流子密度的多项式方程,从而导出了偏置电流 I 与载流子密度 N 的对应函数式,即获得载流子密度速率方程的隐式解。

从这一多项式方程出发,我们着重在阈值附近对半导体激光器的载流子密度、输出功率、阈值电流等特性进行了研究和讨论。实验结果与理论预计相符合。

2 理论分析

在平均场近似下,半导体激光器的稳态速率方程组可表示成

* 国家教委留学回国人员博士点基金和四川省科委资助项目。

收稿日期: 1994年4月19日; 收到修改稿日期: 1994年5月30日

$$0 = \frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - au \sum (NH_m - N_0)S_m - F(N) \quad (1)$$

$$0 = \frac{dS_m}{dt} = \left[au\Gamma(NH_m - N_0) - \frac{1}{T_r} \right] S_m + rK_mBN^2 \quad (2)$$

其中

$$H_m^{-1} = 1 + (\lambda_m - \lambda_g)^2/Q_g^2 \quad (3a)$$

$$K_m^{-1} = 1 + (\lambda_m - \lambda_p)^2/Q_p^2 \quad (3b)$$

$$F(N) = AN + BN^2 + CN^3 \quad (3c)$$

式中 I 代表注入电流, e 为电子电荷, V 为有源层的体积, a 为微分增益系数, u 为介质中光速, T_r 代表光子寿命, Γ 为限制因子, N 为载流子密度, N_0 为透明载流子密度, r 为自发辐射耦合进振荡模式的最大耦合系数, S_m 为第 m 模的光子数密度。(3) 式中, λ_m 为第 m 模的波长, λ_g 和 λ_p 分别是增益曲线和自发辐射的中心波长, Q_g 和 Q_p 表征增益和自发辐射的线宽, A 、 B 和 C 分别表征无辐射复合、辐射复合以及俄歇效应。用如下等式定义名义阈值载流子密度 N_t 以及名义阈值电流 I_t

$$a\Gamma(N_t - N_0) = \alpha - \ln(R_1R_2)/(2L) \quad (4a)$$

$$I_t = eVF(N_t) \quad (4b)$$

式中 α 为半导体激光器的分布损耗系数, L 为腔长, R_1 和 R_2 分别为半导体激光器两个端面的反射率。光子寿命 T_r 定义为 $1/[au\Gamma(N_t - N_0)]$ 。结合(2)~(4)式, 令(1)式中的求和为 W , 可以导出

$$S_m = rK_mBN^2/\{au\Gamma(N_t - NH_m)\} \quad (5a)$$

$$W = \sum_m \frac{rK_mBN^2[(N - N_0) - N_0(\lambda_m - \lambda_g)^2/Q_g^2]}{\Gamma[(N_t - N) + N_t(\lambda_m - \lambda_p)^2/Q_p^2]} \quad (5b)$$

考虑到半导体激光器的模式间距 $\Delta\lambda$ 远小于增益和自发辐射的线宽, 则(5b)中的求和可以用积分代替。通过积分, (1)式化成

$$\frac{I}{eV} = F(N) - J + \frac{\pi rBN^3(N_t - N_0)Q_gU}{\Delta\lambda\Gamma N_t^{3/2}(\Delta N)^{1/2}(U^2 + \delta^2)} \quad (6)$$

式中载流子密度偏差 ΔN 定义为 $(N_t - N)$, 以及

$$J = \pi rBN^2N_0Q_p/[(\Delta\lambda)\Gamma N_t] \quad (7a)$$

$$\delta = (\lambda_p - \lambda_g)/Q_p \quad (7b)$$

$$U = 1 + (Q_g/Q_p)(\Delta N/N_t)^{1/2} \quad (7c)$$

求得的总光子数密度 $S (= \sum S_m)$ 为

$$S = \pi rBN^3(N_t - N_0)T_rQ_gU/[(U^2 + \delta^2)\Delta\lambda N_t^{3/2}(\Delta N)^{1/2}] \quad (8)$$

假设输出功率与光子数密度之间的线性常数为 b , 利用(6)和(8)式可以得到

$$P = bS = b\Gamma T_r [I/(eV) - F(N) + J] \quad (9)$$

到此为止, 我们得到了 N 和 I 之间的隐式解析关系式, 由(6)式求出 N 后, 就可以得到 S 或 P 。

3 结果与讨论

3.1 载流子密度

首先我们分析(6)式。该式右边最后一项与 $(\Delta N)^{1/2}$ 成反比, 可见 N 总是小于 N_t , 式中右边

第二项可以看成是自发辐射的贡献。

如果偏置电流比阈值电流高得多时, J 这个量可以忽略。这样(9)式变成通常半导体激光器的输出功率表达式。假如激光器偏置在阈值附近, 因子 J 不能忽略。

图 1 中, 给出了半导体激光器 (编号 LD₀₁) 载流子密度偏差 ΔN 与偏置电流的关系曲线。作图时使用的数据如下: $V = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$, $L = 0.02 \text{ cm}$, $R_1 = 0.31$, $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $N_0 = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $Q_s \sim Q_r = 30 \text{ nm}$, $\Gamma = 0.3$, $\alpha = 16 \text{ cm}^{-1}$, $\Delta\lambda = 1.2 \text{ nm}$, $\delta = -1.3$, $A = 5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $B = 1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$, $C = 5 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$, $r = 1.8 \times 10^{-4}$, 图中曲线 (a) 的 $R_2 = 0.31$, (b) 的 $R_2 = 0.07$, 箭头指明外推阈值电流 i_1 (见(10)式)。从图中可以看到, 随着 I 的增加, 在阈值附近 ΔN 呈陡降的趋势。一般来说, 对于低损耗的半导体激光器 [见曲线 (a)], 在阈值附近 ΔN 陡降的趋势更为显著。

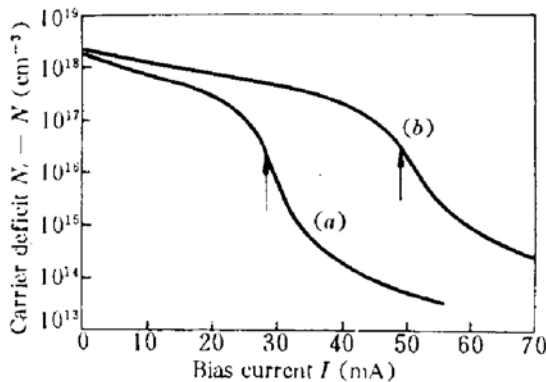


Fig. 1 Variation of the carrier deficit ΔN with bias current for (a) $R_2 = 0.31$ and (b) $R_2 = 0.07$, respectively. R_2 reflective index of the rear end facet of LD. The arrows indicate the extrapolated threshold current i_1 [expressions(10)]

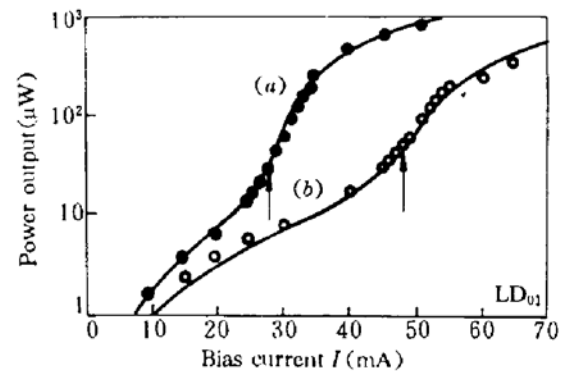


Fig. 2 Dependence of the total output power of the laser diode on bias current with (a) $R_2 = 0.31$ and (b) $R_2 = 0.07$, respectively

3.2 光输出功率

通过 I 确定了 N , 则利用(8)式我们就能得到 S 。利用图 1 所给数据, 可以算出 b , 通过(9)式就能得到输出功率。为简便起见, 反射率为 R_2 的端面称为后端面, 反射率为 R_1 的端面称为前端面。在图 2 中, 我们作出后端面镀减反射膜前 [曲线 (a)] 后 [曲线 (b)], 激光器前端面的输出功率 P 和偏置电流 I 的关系曲线。测量表明镀减反射膜后, 后端面的反射率降为 0.07^[4]。图中曲线为理论曲线, 所使用的数据与图 1 相同, 箭头代表外推阈值 i_1 。实心圆点和空心圆点分别代表镀前和镀后输出功率的实验测量值。从图中可以看出理论和实验吻合得很好。

3.3 阈 值

在上边的推导中 N_t 是通过激光器的损耗来确定的, I_t 是通过(4b)式由 N_t 来确定的。而在实验中往往采用更便于操作的办法确定阈值。

有时, 阈值电流定义为 $P-I$ 曲线阈值以上的线性部分与电流轴的交点处的电流 (用 i_1 表示)。按照这种定义, 在阈值以上时, P 可表示为

$$P = b\Gamma T_p(I - i_1)/(eV) \quad (10)$$

(10)式所表示的直线是(9)式所表示的曲线的渐近线。于是可以得到

$$i_1 \cong eV[F(N_t) - J(N_t)] \quad (11)$$

有时把 $P-I$ 曲线的两个线性部分(一条为 $I < I_t$, 另一条为 $I > I_t$) 的交点处定义为阈值(用 i_2 表示)。仔细分析(9)式可以发现, 阈值以下 $P-I$ 曲线并不是一条直线, 而且在 $I = 0$ 处 dP/dI 等于 0。因此在理论上 i_2 并不存在。但是在线性坐标中, 由于阈值以下输出功率很小, 在实际中可以当成一条“直线”。

实际中也可以把 dP/dI 上升到半极大处的电流 i_3 称为阈值。此时, 载流子密度(用 N_3 表示)应满足下式

$$A + 2BN_3 + 3CN_3^2 - 2\pi rBN_3N_0Q_p/(\Delta\lambda\Gamma N_t) = (dS/dN)/(IT_t) \quad (12)$$

只要求出 N_3 就能得到 i_3 。

计算表明对于 $I_t \sim 30$ mA, I_t 与以上几种阈值电流(i_1, i_2, i_3) 相差在 ± 1 mA 以内。当偏置在这些电流时, 输出的频谱宽度在几个纳米(nm)量级。

参 考 文 献

- 1 B. J. Thedrez, C. H. Lee. A Reassessment of Standard Rate Equations for Low Facet Reflectivity Semiconductor Lasers Using Travelling Wave Rate Equations. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, **QE-28**(22): 2706~2713
- 2 J. Chen, D. Li, Y. Lu. Experimental and Theoretical Studies on Monitored Signals from Semiconductor Diodes Undergoing Antireflection Coatings. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(31): 4554~4558
- 3 T. Lee, C. A. Burrus, J. A. Copeland *et al.*. Short-cavity InGaAsP Injection Lasers: Dependence of Mode Spectra and Single-longitudinal-mode Power on Cavity Length. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, **QE-18**(7): 1101~1112
- 4 B. Luo, L. Wu, J. Chen *et al.*. Determination of Wavelength Dependence of the Reflectivity at AR Coated Diode Facets. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, **5**(11): 1279~1281

Studies on Semiconductor Lasers Threshold Features

Wu Zhengmao Xia Guangqiong Chen Jianguo Lu Yucun

(*Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Abstract Within the frame of the mean field, using Lorentzian functions to model the gain and spontaneous emission, implicit analytical solutions to the mutli-mode rate equations, including the contributions of spontaneous emission to various diode modes, have been obtained. As a result, with the emphasis on the threshold region, several laser characteristics of importance, such as the carrier density, photon density, etc. have been investigated theoretically and experimentally.

Key words semiconductor laser, threshold, Lorentzian function