

阈值以下半导体激光器端面输出谱的非对称性*

吴正茂 夏光琼

陈建国

(西南师范大学物理系, 重庆, 630715)

(四川大学光电系, 成都, 610064)

摘要: 本文从半导体激光器多模速率方程组出发, 考虑到了半导体激光器实际运行时自发辐射峰值波长与增益峰值波长不一致的情形, 对阈值以下半导体激光器的端面输出谱的非对称性进行了研究。结果表明, 这种非对称分布可以认为是由于自发辐射峰值波长短于增益峰值波长所造成的。理论模拟的结果与实验相符。

关键词: 半导体激光器 输出谱 非对称性

Intensity asymmetry of facet output mode spectrum of a semiconductor laser biased below threshold

Wu Zhengmao, Xia Guangqiong

Chen Jianguo

(Dept. of Phys., South-west Normal Univ.)

(Dept. of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan Univ.)

Abstract: Starting from the multimode rate equations and concerning the fact of wavelength difference of the spontaneous emission peak and gain peak, the intensity asymmetry of the longitudinal mode spectrum of the semiconductor laser biased below threshold is studied. The results indicate that the reason of the asymmetry is from the shorter peak wavelength of the spontaneous radiation than the gain peak wavelength. The experiment confirmed the theoretical prediction.

Key words: semiconductor laser output mode spectrum asymmetry

一、引言

人们在实验中早已观察到了对于阈值以上运行的半导体激光器, 端面输出谱相对于谱上的峰值输出模往往是非对称分布的。对于这种非对称性分布, 人们已开展了大量的理论研究工作。研究表明, 造成这种非对称性有多种原因, 例如腔的不均匀性造成的散射中心的存在^[1,2]、增益峰值波长与腔谐振波长的不一致^[3,4]等等。对于阈值以下运行的半导体激光器, 通过对大量的半导体激光器阈值以下运行时端面输出谱的观察, 我们发现阈值以下端面输出谱相对于谱上的峰值输出模也是非对称分布的, 而且在实验中可以观察到相对于端面输出谱的峰值波长, 短波端高于长波端。但是对阈值以下端面输出谱的这种非对称性的研究, 我们还未见有关报道。

文献[5,6]的实验研究结果表明, 阈值以下运行的半导体激光器增益峰值波长与自发辐射峰值波长的差近似等于线宽的一半。本文考虑到了这种实际情形, 从半导体激光器多模速率方程组的隐式解析解出发, 对阈值以下半导体激光器的输出模谱的非对称性进行了研究。结果表明, 这种非对称分布可以认为是由于自发辐射峰值波长短于增益峰值波长所造成的。理

论模拟的结果与实验结果符合得很好。

二、理论分析

平均场近似下半导体激光器的稳态速率方程组可表示成^[7]:

$$0 = I/(eV) - au \sum (NH_m - N_0) S_m - F(N) \quad (1)$$

$$0 = [au\Gamma(NH_m - N_0) - 1/T_p] S_m + rK_m B N^2 \quad (2)$$

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 代表偏置电流, e 为电子电荷(绝对值), V 为有源层的体积, a 为微分增益系数, u 为介质中光速, T_p 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 为自发辐射耦合进所讨论模式的最大耦合系数(假设激光器基横模运行), S_m 为第 m 模的光子数密度, 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。在速率方程组中, 我们引入了洛仑兹函数来描述增益和自发辐射的分布^[8]。用如下等式定义名义阈值载流子密度 N_t 、名义阈值电流 I_t 以及光子寿命 T_p :

$$N_t = N_0 + [\alpha - \ln(R_1 R_2) / (2L)] / a\Gamma \quad (4a)$$

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

$$T_p = [au\Gamma(N_t - N_0)]^{-1} \quad (4c)$$

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。

结合(1)~(4)式, 经过一系列运算, 可以得到^[7]:

$$I/(eV) = F(N) - J + \frac{\pi r B N^3 (N_t - N_0) Q_g U}{\Delta N N_t^{3/2} (\Delta N)^{1/2} (U^2 + \delta^2)} \quad (5)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为模式间距, 以及

$$\Delta N = (N_t - N) \quad (6a)$$

$$J = \pi r B N^2 N_0 Q_p / [(\Delta\lambda) \Gamma N_t] \quad (6b)$$

$$\delta = (\lambda_p - \lambda_g) / Q_p \quad (6c)$$

$$U = 1 + (Q_g / Q_p) (\Delta N / N_t)^{1/2} \quad (6d)$$

另外结合(2)~(4)式, 第 m 个纵模的光子数密度 S_m 可以表示成:

$$S_m = rK_m B N^2 / [au\Gamma(N_t - NH_m)] \quad (7)$$

这样, 对于给定的偏置电流 I , 通过(5)式可以得到相应的载流子密度 N , 再利用(7)式求出各个纵模的光子数密度, 从而就可以得到半导体激光器在该电流下的输出模谱。

三、结果与讨论

为了对运行在阈值以下某一电流处的半导体激光器的自发辐射谱和增益谱有个定量的认识, 采用文献[5]所提供的方法, 利用实验测得的一只 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 半导体激光器偏置

在 22.5mA 时的端面输出谱(这只激光器的阈值为 28.5mA),我们确定出了该电流下的净增益谱和自发辐射谱的分布,如图 1 所示,图中方块代表净增益,圆点代表自发辐射。从图中可以看出,该电流下的增益和自发辐射可以近似看作洛仑兹分布,增益峰值波长 λ_g 约比自发辐射的峰值波长 λ_p 长 30nm。

为方便以下讨论,我们用 $m = 1$ 来标识输出模谱的峰值模,用 $m = 2$ 标识次强模,依次排列下去。相应地,它们的谐振波长用 λ_1, λ_2 等来标识。

考虑到在实际的半导体激光器中,由于注入电流引起的 p-n 结温度的变化会使增益峰值波长 λ_g 与峰值谐振波长 λ_i 之间发生移动^[3],因此只有在某几个分立的电流下,半导体激光器的增益峰值波长才与峰值谐振波长相一致^[4]。可见,对于实际的半导体激光器有必要考虑增益峰值波长 λ_g 与峰值谐振波长 λ_i 不一致的情形。为简便起见,令 $|\lambda_i - \lambda_g| / \Delta\lambda = W$ 。

图 2 中我们给出了在不同的 W 下,峰值模 S_1 和边模 S_2, S_3 等的光子数密度随偏置电流的变化曲线。作图时我们参考了图 1 中所得数据,因此取 $\delta = -1$ 。作图所用其它数据如下:

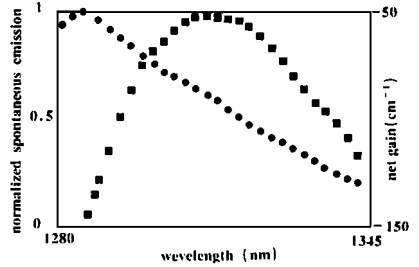


Fig. 1 Measured spontaneous emission spectrum (circles) and net gain spectrum (squares) for a diode biased at 22.5mA

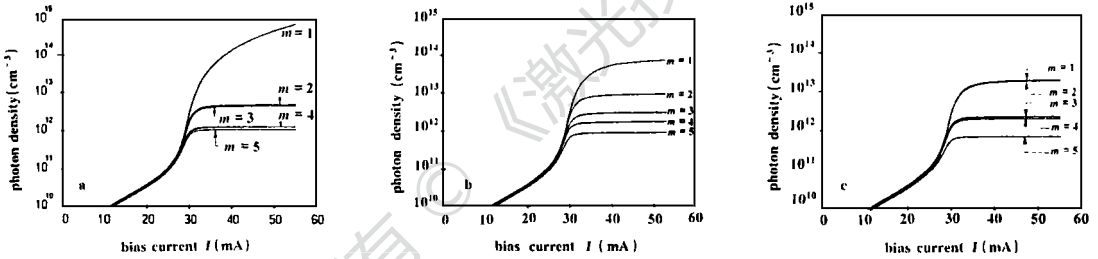


Fig. 2 Dependence of photon densities of different modes on bias current
a- $W = 0$ b- $W = 0.25$ c- $W = 0.5$

$V = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3, L = 0.02 \text{ cm}, R_1 = R_2 = 0.31, a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2, N_0 = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, \Gamma = 0.3, Q_g \sim Q_p = 30 \text{ nm}, \alpha = 16 \text{ cm}^{-1}, \Delta\lambda = 1.2 \text{ nm}, A = 5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}, B = 1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}, C = 5 \times 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}, r = 1 \times 10^{-4}, \lambda_g = 1.31 \mu\text{m}$ 。在图 1 中, a, b 和 c 分别对应 W 取 0, 0.25, 0.5。从图中可以看出,量 W 在决定能量在各个模式之间的分布中起了很大的作用。当 $W = 0$ 时, S_2 和 S_3 近似相等,但是整个模谱相对于 S_1 并不对称。同时随着下标 m 的增加, S_{2m} (在短波端) 下降得比 S_{2m-1} (在长波端) 缓慢。从物理上可以把这种非对称分布归结为自发辐射的峰值波长 λ_p 短于 λ_g 。如果取 $\delta = 0$, 从(7)式可以看出这种非对称性将消失。对于 $W = 0.5$, 从图中可以看出, 模谱分布仍然是非对称的。在这种情况下, S_1 与 S_2 近似相等, S_3 略大于 S_4, S_{2m} (在长波端) 比 S_{2m-1} (在短波端) 下降得更快。这些事实都说明了相对于输出模谱的峰值波长,短波端要高于长波端。顺便说明一下, 本文的讨论为了突出物理实质, 我们进行了一些简化。随着偏置电流的变化, 在作图中我们把 δ 和 W 取成了定值。而在实际中随偏置电流的变化, W 要发生变化^[4], 另外由于自发辐射峰值波长和增益峰值波长要发生变化^[5], δ 也将发生变化。

图 3 中我们给出了图 1 所用半导体激光器偏置电流为 20mA 时实验测量的输出谱和理论计算的输出谱, 其中竖线代表理论计算的结果, “×”代表实验测量值, 理论计算所用数据与图 2 相同。从图中可以看出理论和实验吻合得很好。分析这种非对称性的物理实质, 可以认为由于阈值以下自发辐射的峰值波长短于增益峰值波长, 而端面输出谱的峰值波长是由它们共同确定的, 它必然位于二者之间。当 $I \rightarrow I_1$ 时, 端面输出谱的峰值波长 λ_1 趋近于增益峰值波长 $\lambda_g^{[5]}$ 。由于自发辐射耦合进第 m 模的量为 rK_mBN^2 , 因此自发辐射耦合进端面输出谱峰值波长短波端的量要大于长波端的量。这就是造成这种非对称性的原因。

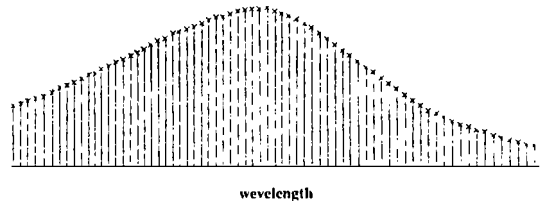


Fig. 3 Measured and predicted output spectrum of a semiconductor laser biased at 20mA, where the vertical lines represent the theoretical prediction and the crosses are the measured intensities of the modes

参 考 文 献

- 1 Hayward J, Cassidy D T. J O S A, 1992; B9(7): 1151~ 1157
- 2 Peters F, Cassidy D T. Appl Opt, 1991; 30(9): 1036~ 1041
- 3 Kishino K, Aoki S, Suematsu Y. IEEE J Q E, 1982; 18(3): 343~ 351
- 4 Xia G, Wu Z, Chen J et al. Opt, Lett, 1994; 19(10): 731~ 733
- 5 吴正茂, 夏光琼, 陈建国 et al. 光学学报, 1995, 15(8): 1050~ 1052
- 6 Wu Z, Xia G, Chen J et al. Chinese Journal of Lasers (English Version), 1994; B3(6): 495~ 499
- 7 吴正茂, 夏光琼, 陈建国 et al. 中国激光, 1995; A22(2): 91~ 94
- 8 Marcuse D. IEEE J Q E, 1983; 19(1): 63~ 73

作者简介: 吴正茂, 男, 1970 年出生。硕士。从事半导体激光器和半导体激光放大器的研究。

收稿日期: 1995-03-28



• 简 讯 •

《激光技术》被确认为核心期刊

最近本刊编辑部收到《中文核心期刊要目总览》第二版编委会的信件, 内称: “依据文献计量学的原理和方法, 经过研究人员对相关文献的检索、计算和分析, 并请学科专家鉴定后, 贵刊《激光技术》被确定为无线电电子学、电信技术类的核心期刊, 并被编入《中文核心期刊要目总览》第二版, 该书定于 1996 年 8 月由北京大学出版社出版。”

据悉, 中文核心期刊是从我国现已出版的近万种中文期刊中严格筛选确定的, 目前计有 1700 余种。该编委会还在继续创造条件, 计划将此成果制成数据库, 送上国际互联网, 让中文核心期刊走向世界。