

半导体激光器参数的外腔法测量*

李大义 陈建国 卢玉村 潘大任

(四川大学物理系, 成都 610064)

提要: 通过测量运行在外腔中的半导体激光器的 $P-I$ (功率-电流) 曲线, 可以确定二极管激光器的重要参量——吸收系数 α , 对电流的微分小信号增益系数 dg/dI 以及光子寿命等。

关键词: 半导体激光器, 外腔

Measurement of parameters of semiconductor lasers via operating in an external cavity

Li Dayi, Chen Jianguo, Lu Yuchun, Pan Daren

(Sichuan University, Chengdu)

Abstract: Measurement of $P-I$ (power-current) curves of the semiconductor laser in an external cavity may lead to the determination of such diode parameters as the absorption coefficient α , the differential small signal gain coefficient dg/dI and the photon lifetime τ . As a result, a simple and easy method has been proposed to designate some important parameters of semiconductor lasers.

Key words: semiconductor laser, external cavity

最近, Garmire 等人^[1]通过测量外腔半导体激光器的噪声谱求得了老化二极管中的损耗系数及光子寿命。本文则是由外腔式半导体激光器的常规测量得到的 $P-I$ 曲线确定 dg/dI 和 θ , 然后求得 α 和 τ 。该方法不需借助频谱分析仪, 也不限于老化二极管, 操作方便易行, 应用范围更广。

一、理论分析

图1示出了一个典型的外腔式半导体激光器系统: 二极管激光器 LD 的两端面反射率分别为 R_1 和 R_2 。由右端面出射的光通过显微物镜 MO_2 准直后入射到反射率为 R_{ex} 的外腔反射镜后, 又部分地反馈回 LD 的有源区。由左端面出射的光通过显微物镜 MO_1 调整后送入(平方律)探测器 DT 中, DT 的输出可以用记录仪或其它设备记录下来。图中 ATT 是透过率为 T 的衰减片。

收稿日期: 1989年9月14日。

* 国家教委博士点基金项目。

由于有外反馈系统的作用, 外腔式半导体激光器的阈值电流 $I_{te\alpha}$ 总要比内腔式激光器的阈值 I_{tin} 小一些。可以把外腔式半导体激光器等效为左端面反射率仍为 R_1 , 而右端面的反射率等效为 R_{eff} 的一只半导体激光器^[1, 2]。该等效半导体激光器的阈值增益系数等于 $\alpha + \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)$, 其中 l 为二极管的长度, R_{eff} 是二极管右端面与外反射镜构成的复合系统的等效反射率。

在阈值电流工作时, 激光二极管的增益系数与电流间有线性关系, 即

$$g = A\Gamma(I - I_0) \equiv (dg/dI)(I - I_0) \quad (1)$$

其中 A 和 I_0 为常数, Γ 为限制因子。考虑到内外腔运行的阈值条件, 由(1)式可导出

$$2A\Gamma l(I_{tin} - I_{te\alpha}) = \ln(R_{eff}/R_2) \quad (2)$$

在上式中, I_{tin} , $I_{te\alpha}$, l 等三个量是易于测定的, 只要确定了 R_{eff} 就可以求得 $A\Gamma$ 或 dg/dI 。

1.1 耦合系数 θ 及等效反射率 R_{eff} 的确定

耦合系数 θ 系指由外腔反射镜反馈而入射到右端面上的光能中耦合进半导体二极管有源区的份额。虽然从右端面出射的光只有部分被 MO_2 收集到以及光能往返通过 MO_2 亦有损耗, 但是这些损耗可以合并到外腔镜的反射率中去而不对分析产生任何实质性的影响, 因此本文采用的外腔镜反射率 R_3 包含了显微物镜带来的损失。

Olsson 等人^[2]曾经研究过由外腔多次反射而造成的等效反射率 R_{eff} 。Garmire^[3]直接应用 F-P 多程反射公式于右端面和外反射镜所构成的标准具, 得到了与 Olsson 相同的结果。但他们都忽略了当光线从外腔中进入激光二极管时, 尽管右端面反射率依然是 R_2 , 但由于耦合损耗的存在, 真正耦合进激光器有源层中去的份额是 $\theta(1 - R_2)$ 而不是 $(1 - R_2)$ 这一事实。在作了这种细致考虑后, 我们得到了更准确的等效反射率公式:

$$\sqrt{R_{eff}} = \sqrt{R_2} + (1 - R_2) \sqrt{\theta R_3} / (1 + \sqrt{R_2 R_3}) \quad (3)$$

当(3)式中 $\theta = 1$, 就简化成 Olsson 等人及 Garmire 等人的公式了。

如果在外腔中插入损耗元件(其单程透过率为 T)来改变 R_3 的有效值, 然后分别测量腔内有无损耗元件时外腔激光器系统的阈值电流 $I_{te\alpha}(T)$ 和 $I_{te\alpha}$, 则可以利用(2), [(3)式的导出式:

$$\frac{I_{tin} - I_{te\alpha}(T)}{I_{tin} - I_{te\alpha}} = \frac{\ln[1 + (1 - R_2)T\sqrt{\theta R_2/R_2}]}{\ln[1 + (1 - R_2)\sqrt{\theta R_3/R_2}]} \quad (4)$$

求出 θ 以及 R_{eff} 。

1.2 dg/dI , α 和 τ 的确定

求出 θ 和 R_{eff} 后, 利用测量到的 l 值, 可由(2)式求出 dg/dI 或 $A\Gamma$ 。

众所周知, 半导体激光器从左端面输出的外量子效率 η_1 为

$$\eta_1 \propto \ln(1/R_1) / \left[2l\alpha + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right) \right] \quad (5)$$

只需要测量在内腔和外腔两种运行情况下半导体激光器的 $P-I$ 曲线的直线部分的斜率比 γ , 就可以利用公式(5)的导出式

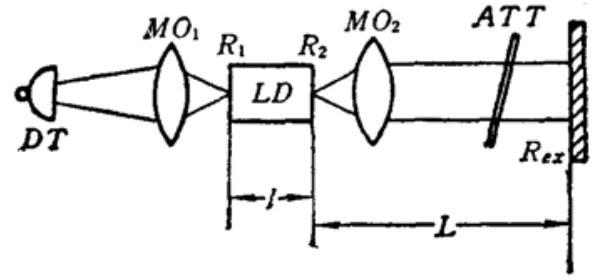


Fig. 1 Block diagram of a semiconductor laser via operating in an external cavity

$$\gamma = \left[2l\alpha + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right) \right] / \left[2l\alpha + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \right] \quad (6)$$

来确定二极管的吸收系数 α 。最后利用熟知的公式

$$\tau = \left\{ u \left[\alpha + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) / (2l) \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

来求得半导体激光器中的光子寿命 τ ，上式中 u 为介质中的光速。

二、实验结果

图 2 是一只未镀膜激光二极管在内外腔中运行的 $P-I$ 曲线。其中 a 是外腔中无衰减片时得到的，此时 R_s 的测量值是 0.45； b 是在外腔中插入透过率 $T=0.70$ 的衰减片后测得的； c 是内腔运行时半导体激光器的 $P-I$ 曲线。

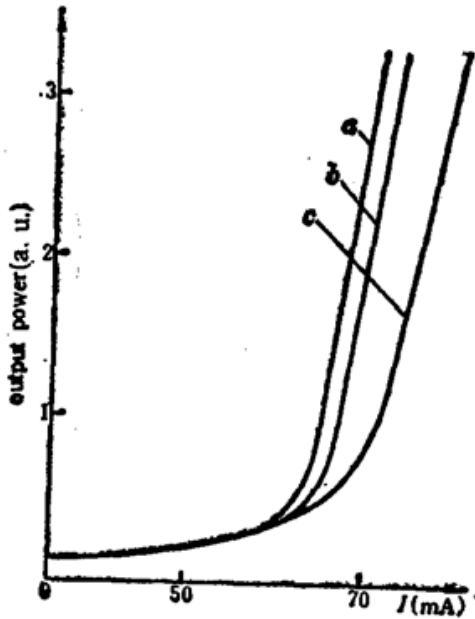


Fig. 2 $P-I$ curve of a semiconductor laser

a -No attenuator in the external cavity;
 b -Attenuator in the external cavity;
 c -Internal cavity

由图 2 可以得到下列数据： $I_{th} = 68.3 \text{ mA}$ ， $I_{tex}(T) = 63.7 \text{ mA}$ ， $I_{tex} = 62.2 \text{ mA}$ 以及 $\gamma = 0.79$ 。考虑到 $R_1 = R_2 = 0.32$ ，把上述结果代入(4)式可以求得图 2 中给出的 1# 管的耦合系数 $\theta = 0.30$ 。采用 Olsson^[2]和 Garmire^[3]定义的耦合系数，我们得到的 θ 折合为 0.39，该值居于[1]中报道的 0.30 和 0.45 两值之间。利用(3)式可以求出等效反射率 $R_{eff} = 0.56$ 。

把上述结果及实测的 γ 及 l 值代入(2)和(6)式可以求出 $dg/dI = 3.51 \text{ cm}^{-1}/\text{mA}$ 和 $\alpha = 15.2 \text{ cm}^{-1}$ 。最后利用(7)式可求得 1# 管中光子寿命 τ 为 1.30 ps(由 l 测量值及二极管模式间距可测出介质有效折射率为 4，因而介质中光速 u 取为 $7.5 \times 10^9 \text{ cm/s}$)。

此外，我们还在类似的实验条件下对另一只激光二极管(2# 管)进行了测量，得到了大致相同的结果。现将两只管子的测量及计算结果列于表 1 及表 2 中。

从表可见，2# 管由于长度 l 较 1# 管长一些，因而阈值电流也比 1# 管要大。尽管 2# 管可

Table 1 Experimental results of 1# and 2# diode

	I_{th} (mA)	$I_{tex}(T)$ (mA)	I_{tex} (mA)	$l(\mu\text{m})$	γ
1#	68.3	63.5	62.2	130	0.79
2#	85.5	81.4	80.3	160	0.81

Table 2 Theoretical values of 1# and 2# diode

	$dg/dI(\text{cm}^{-1}/\text{mA})$	θ	R_{eff}	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	$\tau(\text{ps})$
1#	3.51	0.30	0.56	15.2	1.30
2#	3.72	0.38	0.59	30.9	1.31

能由于制造上的原因而具有较大的吸收系数,但是在考虑了端面反射不完全的损耗的影响后,两管中的光子寿命差别甚微,这是由于光子寿命随 α 增加而减小,随 l 增大而增加。

在进行本文所报道的工作之前,我们曾采用另一种方法对来自同一厂家的一只 GaAs 二极管增益系数进行了测量。其方法是测量该管两端面镀减反射膜后不同偏置电流下的自发辐射谱的调制度^[4]。测量结果如图 3 所示,图中纵坐标表示 $\alpha \equiv \sqrt{R_1 R_2} \exp[(g-\alpha)l]$, I_t 是二极管镀膜前的阈值电流。由分析可知,图中直线部分的斜率正比于 dg/dI ,在测量了管长 l 后,由图可以求出 $dg/dI = 4.15 \text{ cm}^{-1}/\text{mA}$ 。可见,用测量镀膜后输出谱调制度的方法与外腔法测量的结果相差不大,这进一步验证了外腔法测量的可行性。

由于外腔调节的状况和二极管激光器本身的结构对 θ 大小有一定的影响,因而耦合系数不是一个固定值,例如文献[1]报道的两只二极管的 θ 值,一只为 0.30,另一只为 0.45。同时我们也对测量误差进行了分析,结果表明,测量精度约为 10%。

最后,作者谨向提供实验用的半导体激光器的机电部 44 所表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Garmire E. *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-25** (8), 1800 (1989)
- 2 Olsson A., Tang C. L., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17** (8), 1320 (1981)
- 3 Garmire E, Private Communication
- 4 Kaminow I.P. *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19** (6), 493 (1983)

(上接第 676 页)

三、结 论

综上所述,当高斯光束入射到圆孔光阑上时,其轴向衍射光场分布既不同于平面波的入射,也跟球面波的情形相区别。对于较大半宽度的高斯光束,在离光阑平面较远处,光场沿轴出现极大和极小的交替变化,随着观察点向光阑平面的靠近,光强的动态幅度逐渐下降,而振荡周期则剧烈减小,因而轴向光强在数值上与光阑中心处的光强不断接近直至相等。对于半宽度很小的高斯光束,轴向光强除了在离光阑平面较远处和光阑中心处的光强相同外,它随着轴向距离的增加而单调减小。

参 考 文 献

- 1 P. Belland J. P. Crenn, *Appl. Opt.*, **219**(3), 522 (1982)
- 2 J. P. Campbell, L. G. Deshazer, *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (11), 1427 (1969)
- 3 Y. Li, *J. Opt. Soc. Am.*, **A4** (7), 1237 (1987)
- 4 B. Karczewski, E. Wolf, *J. Opt. Soc. Am.*, **56**(9), 1207 (1966)

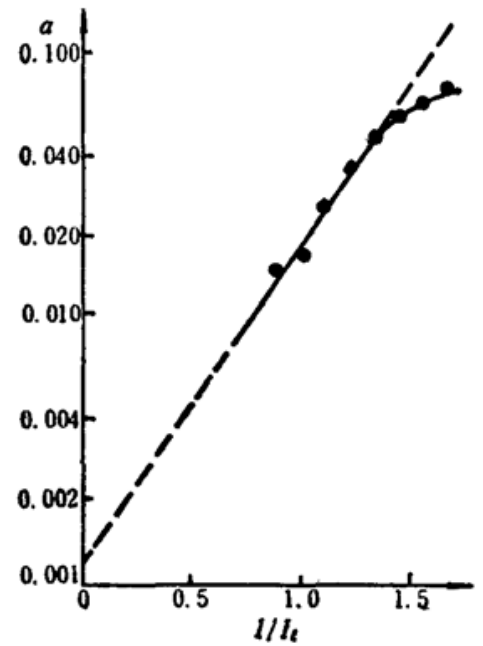


Fig. 3 Curve of parameter $\alpha (\equiv \sqrt{R_1 \cdot R_2} \exp [(g-\alpha)l])$ with bias current after both facets AR coated