

端面反射率对半导体激光器微分 功率特性的影响*

陈建国 卢玉村 李大义

(四川大学, 成都市 610064)

提要: 从理论和实验上研究了端面反射率对半导体激光器微分输出功率等特性的影响。研究表明, 用镀膜方法适当地降低半导体激光器输出端面反射率, 有助于增大输出功率和提高外量子效率。

关键词: 半导体激光器和放大器, 微分输出功率, 减反射膜

Effects of facet reflectivity on characteristics of differentiation of diode laser output over bias

Chen Jianguo, Lu Yucun, Li Dayi

(Sichuan University, Chengdu)

Abstract: Investigations have been made on the effects of the facet on the laser characteristics of the diode output and its differentiation over the bias current theoretically and experimentally. Results also show that appropriately adjusting the facet reflectivity may increase the diode output power and the external quantum efficiency.

Key words: semiconductor lasers and amplifiers, differentiation of output power over bias, antireflection coating

一、引言

在使半导体激光器(LD)满足多样化需求的各种尝试中, 端面镀膜技术已经成为一种重要手段。为了获得良好的外腔式半导体激光器以产生理想的锁模效果和窄带调频输出, 往往需要在LD的一个端面上镀制高效减反射膜。目前光通信技术中的重要元件行波式半导体激光放大器(TWA)通常也是采用镀膜技术获得的^[1]。

镀膜后, LD端面反射率发生了变化, 这不可避免地会改变LD的某些主要运行特性。Ettenberg等人^[2]曾经在实验上研究过端面反射率对LD的输出光谱及 $P-I$ (功率-电流)特性的影响。早期人们也曾研究过F-P腔多程式半导体激光放大器的特性, 近年来人们又着重研究了端面剩余反射率对TWA各种运行特性的影响^[3]。从某种意义上来说, 这些工作也可以看作是对[2]中开展的工作的扩展和深化。

收稿日期: 1990年9月11日; 修改稿收到日期: 1990年11月12日。

* 国家教委博士点基金和自然科学基金资助项目。

本工作从理论和实验两个方面研究了 LD 的输出功率 P 及其对偏置电流 I 的一阶微分 dP/dI 对端面反射率的依赖关系, 加深了对 LD 外量子特性的认识。这些结果已经成功地用于 LD 端面减反射膜的主动监控法镀制实验中, 这与采用比较片等间接监控法比较, 获得 LD 高效减反射膜的可靠性和成功率, 均得到显著提高。我们实验室为上海光机所、西安光机所以及西安电子科大等单位承接的 12 只 LD 端面高效减反射膜的镀制工作, 均获成功, 在真空镀膜机真空度不够高因而未控制氧分压情况下, 得到的剩余模式反射率均小于 10^{-3} 。

二、理论分析

由于在本工作的实验过程中所涉及到的各参量的变化的时标均远远大于 LD 中载流子寿命 (ns 量级), 因此可以采用稳态速率方程组。当 LD 处于受激发射状态时, 只有少数几个 (甚至单个) 纵模发生振荡。由于这几个模式的波长差别不大, 因而其线型因子间的差别可以忽略。按照与 [4] 类似的方法, 忽略自发辐射耦合到受激发射模式中的份额, 速率方程组可写为

$$N_a - N(x) = A\tau(N - N_g)\{F^+(x) + F^-(x)\} \quad (1)$$

$$\pm u\{dF^\pm(x)/dx\} = \{\Gamma A(N - N_g) - u\alpha\}F^\pm(x) \quad (2)$$

式中, N 为 x 处的载流子数密度, N_g 为透明载流子数密度, τ 为载流子寿命, N_a 为正比于偏置电流 I 的注入载流子数密度, $F^+(x)$ 和 $F^-(x)$ 分别为沿 $+x$ 和 $-x$ 方向传播的光子数密度, Γ 为模式限制因子, u 为介质中的光速, α 为介质的吸收系数, A 为常量。

设位于 $x=0$ 处的端面反射率为 R_0 , 位于 $x=l$ 处的端面反射率为 R , 边界条件为

$$R_0F^-(0) = F^+(0), \quad RF^+(l) = F^-(l) \quad (3)$$

联立 (1) ~ (3) 式, 可以求得 LD 的输出功率及其对电流的微分。设 l 处端面输出功率为 P , 则

$$P = h\nu S u (1 - R) D / (A\Gamma\tau) \quad (4)$$

其中 h 为普朗克常数, ν 为激光频率, S 为有源区的横截面积, $r^2 = R$, $r_0^2 = R_0$, 常量 D 满足

$$\alpha l - \ln(rr_0) = -(z+1)/\sqrt{z^2 - 4D^2} \\ \times \ln \left\{ \frac{2(r+r_0)D + (1-rr_0)\sqrt{z^2 - 4D^2} - (1+rr_0)z}{2(r+r_0)D - (1-rr_0)\sqrt{z^2 - 4D^2} - (1+rr_0)z} \right\} \quad (5)$$

式中

$$z = A\Gamma(N_a - N_g)/(u\alpha) - 1 \quad (6)$$

对于每组确定的 αl 值, 均可算出 D 与 N_a (或 I) 的对应关系, 从而求得 P 和 dP/dI 与端面反射率 R 的依赖关系。

在图 1 中, 我们画出了在相同注入电流下, 输出功率 P 与该端面反射率 R 的依赖关系, 图 2 给出了微分输出功率 dP/dI 与该端面反射率的关系曲线。应该指出: (i) 在偏置电流 I 不太大的情况下, P 与 I 呈线性关系, 这是符合实验事实的, 有关这一点, 文献 [5] 也曾涉及过; (ii) 由图 1 可以看到, 未镀减反射膜时, $R = R_0 = 0.31$, 从 R 端输出的功率并非极大, 而在 \sqrt{R} 等于 0.4 左右 (具体值随 LD 不同而略有差异) 时 LD 的输出功率达到极大值。这表明, 可以用镀增透膜的办法适当降低端面反射率 R , 使 LD 达到最佳功率输出, 从而可以在适度的注入条件下充分发挥 LD 的输出潜力; (iii) 由图 2 可以看到, 在 r 逐渐降低的过程中, 输出功率对电流的一阶微分量 (下边简作 DP) 是单调上升的, 这种趋势将持续到图中的 B 点。 B 点相应

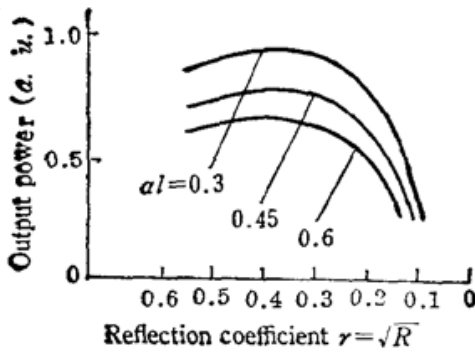


Fig. 1 Laser diode output power varies with the facet reflection coefficient at the same pumping condition

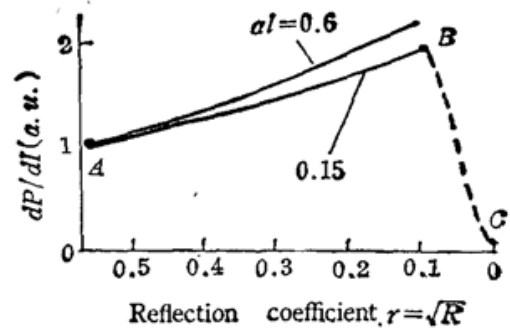


Fig. 2 Variation of the first differential power with the facet reflection coefficient of LD

的高度及反射率与偏置电流 I 有关。一般而言, I 越大则 B 点所对应的 DP 值越大。 B 点所对应的 r 值大致满足如下条件: 由 r 、 r_0 以及 αl 所决定的 LD 的阈值电流将等于偏置电流 I 。此时, LD 由激射状态切换到自发辐射状态, 从而导致 dP/dI 迅速下降。由于从 B 点到最小值 C 点这段区间, LD 处于自发辐射状态, 不易用速率方程组计算, 因而图中用虚线示意标出。在图 1 中, 这段区间就没有标示出。此外, αl 越大, 则 DP 也越大, 所以图 1 和图 2 中曲线的相对位置相反。

三、实验结果

dP/dI 测试系统大致如下: 激光器 LD 发出的光被光电探测器 PD 接收后转变成电信号送入选频放大器 FD, 经过该放大器之后, LD 输出信号的交变部分得到放大并转变为正比于其交变电流幅度的直流信号送入记录系统。由于在实验中 LD 上所附加的正弦交流电流振幅很小, 通常都在 0.5 mA 左右, 因而记录仪所记录到的信号实质上是正比于 dP/dI 的。

在图 3 中给出了在输出端面镀高效减反射膜前后一只 InGaAsP LD 的 $P-I$ 和 $dP/dI-I$ 曲线。其中图 3(a) 是 $P-I$ 曲线; 3(b) 是 $dP/dI-I$ 曲线。测量时选用的参数是: LD 附加正弦调制电流的振幅为 0.3 mA, 频率为 2100 Hz。按照一般的习惯^[3], $dP/dI-I$ 曲线陡变部分的中点处所对应的电流就是 LD 的阈值 I_{th} , 这与从图 3(a) 由外推法确定的阈值差别不大。至于图 3(b) 中当 I 大于 I_{th} 后出现了一些弯曲现象则主要是因为一些非线性效应所致, 当 I 比 I_{th} 高得过多时还可能会出现因发热、饱和等因素所引起的增益与偏置电流不呈线性关系而致使 dP/dI 曲线进一步下降的趋势。图 3(a) 中镀膜前 LD 的电流未加到 40 mA, 这种非线性未显示出。

为了测量 DP 与端面反射率的关系, 我们在对端面镀减反射膜(单层 SiO)的过程中, 记录了 dP/dI 信号强度随蒸镀时间 t 变化的曲线。一般情况下, 在我们实验中完成一减反膜层的蒸镀过程大约仅需几十秒钟, 如果端面膜厚与蒸镀时间 t 成正比, 利用熟知的镀有单层膜的端面反射率公式:

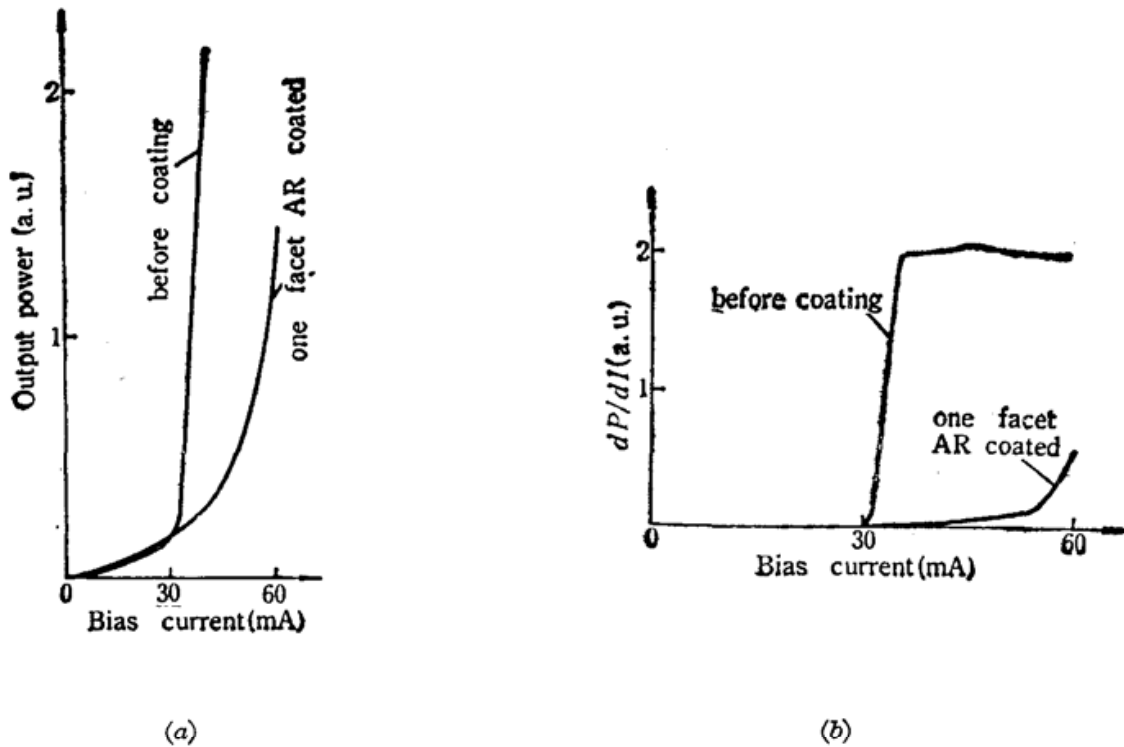


Fig. 3 Power and its differential of LD versus bias current, before and after one facet is AR coated
(a) P - I curves; (b) dP/dI - I curves

$$R = \frac{M^2 + N^2 + 2MN \cos(Kt)}{1 + M^2 N^2 + 2MN \cos(Kt)} \quad (7)$$

可以建立起 dP/dI (通过时间 t) 与 R 的关系。式中 M 和 N 是与 LD 及膜料折射率有关的常数, K 为膜料沉积速率。

图 4 给出了 dP/dI 与端面反射率的关系的记录曲线。记录时, 调制电流振幅为 0.5 mA, 频率为 2100 Hz, LD 的直流偏置为 85 mA (约为 $1.5 I_{th}$)。图中虚线是理论计算结果, 计算时取的 $2l$ 是 $0.3^{[6]}$ 。由该图可见, 理论计算与实验记录符合得很好。即使选用 $2l$ 等于 0.15 或 0.45 (对应于 $150 \mu\text{m}$ 长的管子, α 分别为 10 cm^{-1} 和 30 cm^{-1}), 实验结果与理论预测的差别也小于 10%, 这是因为 dP/dI 随 R 变化的规律对参量 αl 的依赖关系较弱的缘故。正因为如此, 这个规律可以用来作为镀膜监控的一条普适的客观判据而使得主动监控法的可靠性得到进一步提高。至于图中 B 点的取值则与偏置电流的选取有关, 原因前边已提及。由 B 点到 C 点这一段的变化, 在理论上不易模拟, 此处只给出了实验记录。

为了考查 LD 的 P - I 曲线变陡的情况并且证实适当地降低 LD 端面反射率可以使得适度泵浦下的 LD 输出功率有所增加这一设想, 我们曾在对一只 GaAs LD 镀减反膜的过程中人为地提前终止蒸镀。从蒸镀曲线来估计, LD 输出端面的剩余反射率在百分之几的量级。图 5 示出了该 LD 的 P - I 曲线。由图可以看到, 镀了增透膜后, LD 的新阈值 I'_{th} 比镀前增大了几个 mA, P - I 曲线的直线部分明显变陡。在一定的工作电流下 (维持一个适中的功率输出, 本例中约为 3 mW), 可以通过降低 LD 端面反射率来增大 LD 输出功率和提高量子效率, 这与 [5] 的观察是吻合的。

最后我们还想指出, 对镀部分增透膜的 LD 的光谱观察可以看到, 输出光谱的纵模数有所增加, 其中每个模式宽度也有所增加, 这与 Ettenberg^[2] 的报道是一致的。

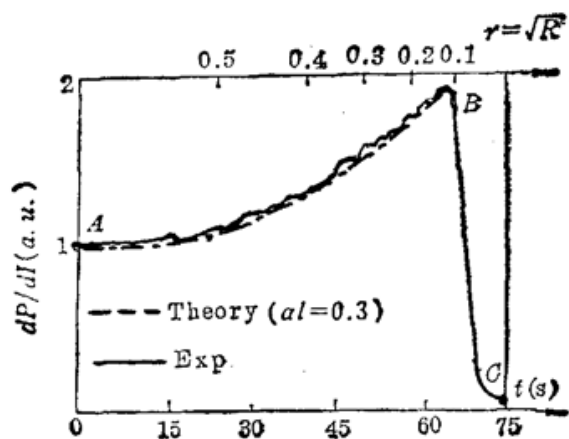


Fig. 4 Experimental recording of dP/dI versus the reflection coefficient

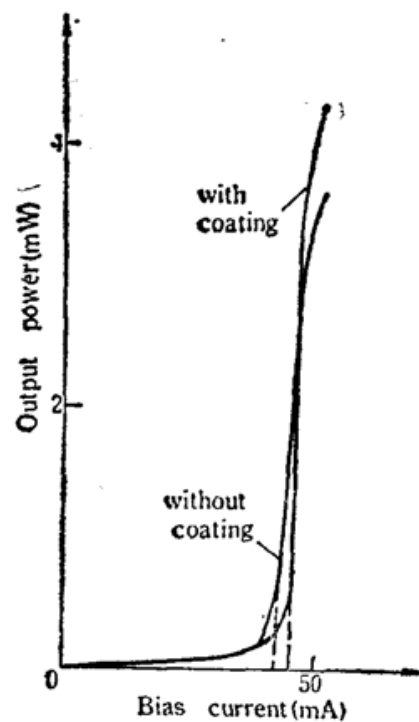


Fig. 5 $P-I$ curves with and without coating

参 考 文 献

- 1 E. Dietrich *et al.*, *Lightwave Technol.*, **LT-7**, 1941 (1989)
- 2 M. Ettenberg *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**, 2211 (1981)
- 3 T. Saitoh, T. Mukai, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-23**, 1010 (1987)
- 4 G. H. B. Thompson, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 1980, 111
- 5 T. Hertsens, *Laser and Optronics*, **8**, 37 (1989)
- 6 李大义, 陈建国 *et al.*, *中国激光*, **18**(9), 668 (1991)

更 正 启 事

本刊今年第5期第390页上“NO分子 $A^2\Sigma$ 和 $E^2\Sigma^+$ 能级的 LIF 光谱”一文的第一作者“宗明成”本刊误写为“宗明仁”，特此更正，并向作者、读者致歉。

编 者