

二极管减反射膜主动监控法的理论与实验研究*

李大义 卢玉村 陈建国

(四川大学物理系, 610064)

提要: 从理论与实验上研究了低于阈值偏置下二极管激光器输出功率及输出模谱与解理端面反射率的关系, 为直接监控法镀制减反射膜提供了依据。减反射膜的镀制及二极管参数的测量验证了理论预言。

关键词: 二极管激光器, 减反射膜, 速率方程

Theoretical and experimental studies on active monitoring of antireflection coating of semiconductor laser diodes

Li Dayi, Lu Yucun, Chen Jianguo

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: The dependence of the output power and the spectral pattern of a semiconductor laser diode biased below the threshold on the reflectivity of the diode facet has been studied theoretically and experimentally. This dependence has provided the basis for actively monitoring the antireflection coating on the diode. Preparation of AR coating on the diode facet and the measurement of the diode parameters have verified the theoretical prediction.

Key words: semiconductor laser diode, antireflection coating, rate equations

一、引言

将二极管激光器解理端面镀减反射膜, 可以扩大其应用范围。在外腔激光器中, 使用端面增透后的二极管激光器可以实现波长的连续宽带调谐或者获得较好的锁模效果。特别是端面高质量增透后形成的半导体行波光放大器(TWA)在光通讯领域中有广阔的应用前景。众所周知, 通常使用的二极管激光器其折射率为3.5左右, 在空气中对激光波长的反射大于30%, 用SiO₂作膜料, 在端面上镀单层减反射膜, 只要精确控制膜厚和膜料的折射率, 就能将它从激光器转变为TWA工作。如果使用多层膜, 虽然达到同样剩余反射率的膜厚及折射率的允许偏差比单层膜情况要大一些, 但必须借助比较片法或其他间接方法来控制各层膜厚。精确控制在二极管激光器端面上形成的膜层厚度是相当困难的, 这是由于二极管端面发光区的面积很小(μm^2 量级), 膜料分子在端面上的沉积情况显然与在大面积(至少大于 mm^2)比较片上的沉积情况不同, 如果比较片是采用异于被镀膜材料制成时, 这种差别将更难确定。我们前期的工作表明: 比较片上已形成 $\lambda/4$ 膜, 而有些二极管被镀端面反射率还下降不多; 在保证相

收稿日期: 1989年6月23日。

* 国家教委博士点基金、国家自然科学基金资助项目。

同的控制条件下,在同一蒸镀时间内,有的二极管镀上了减反射膜,有的则与 $\lambda/4$ 膜相差甚远。

由于二极管激光器是发光器件,我们利用这个特点进行主动监控,避免了上述不易确定膜厚的困难。本文从多模行波速率方程出发,分析了低于阈值偏置条件下,从二极管激光器的一个端面输出的光功率及功率谱与端面反射率的关系,确定了实验条件,为主动监控法控制减反射膜的镀制提供了依据。对 GaAlAs/GaAs 异质结二极管激光器一个端面蒸镀 SiO 减反射膜后,在外腔中运行的 $P-I$ 曲线表明,被镀膜已转变成发光二极管,将两个解理面都增透后,得到了调制度 m 为 0.034 的减反射膜,利用不同注入电流情况下的输出功率谱,进一步测得了二极管的有效增益系数。

二、理论分析

二极管激光器的多模行波速率方程为^[1]

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - W_{sp} - \Gamma \sum_r A_r (N - N_0) (|E_r^+|^2 + |E_r^-|^2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial |E_r^\pm|^2}{\partial t} \pm u \frac{\partial |E_r^\pm|^2}{\partial Z} = \Gamma A_r (N - N_0) |E_r^\pm|^2 - u\alpha |E_r^\pm|^2 + B_r \frac{W_{sp}}{2} \quad (2)$$

在功率反射率为 R_1 、 R_2 两端面上的边界条件是

$$|E_r^-(L)|^2 = R_2 |E_r^+(L)|^2 \quad (3)$$

$$|E_r^+(0)|^2 = R_1 |E_r^-(0)|^2 \quad (4)$$

在稳态条件下,得出从 R_1 端面输出的光功率为

$$P_1 = \sum_r \frac{B_r h\nu_r W_{sp} V}{2gL} \cdot \frac{(1-R_1)(1+R_2 e^{gL})(e^{gL}-1)}{(1-R_1 R_2 e^{2gL})} \quad (5)$$

从 R_2 端面输出的光功率 P_2 与(5)式相似,只需将(5)式的下标 1、2 互换即可。

为了得到从 R_1 面或 R_2 面输出的功率谱,必须考虑光波的振幅和位相,在(2)式中 $E_r^\pm(Z, t) = E_r^\pm(Z) \exp[-i(\omega_r t \pm K_r Z)]$, 根据 Thompson 的讨论^[2], R_2 端面的边界条件为

$$E_r^-(L) = R_2^{1/2} [E_r^+(L) + (W_{sp})^{1/2}] \quad (6)$$

$$E_r^+(L) = E_r^-(L) R_1^{1/2} \exp[(2iK + g)L] \quad (7)$$

在 R_1 端面上的边界条件可类似写出,得出从每一端面输出的光功率谱分布为

$$P_s = \frac{(1-R_1)(1-R_2)e^{gL}W_{sp}}{(1-\sqrt{R_1 R_2} e^{gL})^2 + 4(R_1 R_2)^{1/2} e^{gL} \sin^2(K_r L)} \quad (8)$$

以上诸式中的各量意义如下: N 为载流子浓度; E_r^\pm 为第 r 模沿“+”、“-” Z 方向传播的光场振幅; $|E_r^\pm|^2$ 为已归一化的光子密度; I 为注入电流; N_0 为透明载流子浓度; u 为激活介质中的光速; A_r 为第 r 模中的受激发射系数; B_r 为自发辐射进入第 r 个导波模的系数; W_{sp} 为总自发辐射速率; α 为损耗系数; Γ 为限制因子; V 为激活体积; L 为二极管长度; $g = \Gamma \frac{A_r}{u} (N - N_0) - \alpha$; \sum_r 表示对各纵模求和。(5)、(8)两式为小信号情况下的结果。

一般情况下,(5)式必须借助于计算机数值求解,特别是在阈值附近,因(5)式的分母接近零,计算是相当复杂的。但是在对 R_1 端面镀减反射膜过程中, R_1 在 0.3 左右和接近于零之间变化, R_2 的值不变,每一个模从 R_1 面输出的功率与 $\frac{1-R_1}{1-R_1 R_2 e^{2gL}}$ 成正比。如果将偏置电流

保持在阈值以下较多的水平上, $R_2 e^{2\theta L}$ 的值将小于 1, 在镀膜过程中, R_1 的值逐渐减小, 达到极小值后又逐渐增大, 因而每一个模从 R_1 面输出的光功率逐渐增大并在 R_1 极小时同时达到极大值, 然后减小, 所以输出的总功率在 R_1 面形成 $\lambda/4$ 减反射膜时为极大值。分析表明, 镀膜后的输出功率是镀前的 1.4~1.6 倍。利用这种主动监控法镀制单层减反射膜时, 监测到输出功率为极大值时, 停止蒸镀, 可以确保二极管端面上形成的膜厚为 $\lambda/4$ 。在此基础上进一步改变氧分压可控制膜料的折射率, 就能获得高效减反射膜。

由 (8) 式得到输出模谱的极大值及其相邻的极小值, 从而得到调制度:

$$m = \frac{P_{s \max} - P_{s \min}}{P_{s \max} + P_{s \min}} = \frac{2\sqrt{R_1 R_2} e^{\theta L}}{1 + R_1 R_2 e^{2\theta L}} \quad (9)$$

镀膜前的二极管, $R_1 = R_2 = R_0$, 在阈值电流工作时, 光的往返增益等于 1, $G_i = R_0 e^{\theta L} = 1$, 则 $m = 1$ 。增透后, 在同样的注入电流下, $G = \sqrt{R_1 R_2} e^{\theta L} < 1$, 此时 $0 \leq m < 1$, 并可得

$$R_1 = (GR_0)^2 / R_2 \quad (10)$$

(9)、(10) 两式给出测定半导体二极管激光器微小端面的模式反射率的一种方法^[3]: 将二极管偏置在增透前的阈值电流水平上, 测定镀膜后二极管的输出谱的调制度后, 由 (9)、(10) 两式得出 $(R_1 R_2)$ 的值, 当知道其中一个端面的反射率后, 另一端面的剩余反射率就完全确定了。

如改变注入电流, 则 G 随之变化, 将增益系数 g 用注入电流表示, $g = r(I - I_0) - \alpha$, 并由 $G = \sqrt{R_1 R_2} e^{\theta L} / R_0 e^{\theta L}$, 得到

$$\ln G = (rI_t L) \frac{I}{I_t} - \left(rI_t L - \ln \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{R_0} \right) \quad (11)$$

显然在小信号情况下, $\ln G$ 随 I/I_t 的关系呈线性, 其斜率为 $(rI_t L)$, 由于 L 和 I_t 是可测量的, 因而有效增益系数 r 就可确定。

三、实 验

我们用 SiO 作膜料, 用热蒸发法技术在二极管 $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$ 的两个解理端面上分别镀减反射膜, 在镀膜过程中, 将二极管偏置在 $(0.5 \sim 0.6)I_t$ 水平, 监测从被镀面输出的光功率变化, 当出现极大值时停止蒸镀。图 1 为记录到的二极管输出随时间变化的曲线, 停止蒸镀时的输出比镀膜前的输出有明显提高, 已镀的十管子平均提高 1.5 倍, 与理论预计值符合较好^[4]。Saitoh 等人将注入电流偏置在阈值水平以上^[5], 功率输出为极小时停止蒸镀, 实验结果与理论预计值偏差比我们的, 这是因为当注入电流高于阈值时, 二极管为激光状态, 蒸镀过程中, 往返增益逐渐降低, 二极管将从受激辐射状态过渡到自发辐射状态, 从一个或几个激光纵模过渡到多纵模的自发辐射放大, 中间经历极不易确定的阈值区, 导致实验结果与理论相差较大。图 2 为二极管的一个解理端面镀减反射膜后放在外腔中运行的 $P-I$ 曲线, 当隔断 $R_3 = 0.75$ 的外腔反射时, 被镀膜已表现出发光二极管特性。

图 3(a)、(b)、(c) 是二极管两个解理端面都增透后, 在不同注入电流下的输出模谱。由图 3 可见, 随着注入电流的增加, 往返增益增大, 导致 m 增大, 同时模谱的中心波长向短波方向移动, 这是半导体激光器处于阈值以下的特性。由图 3(a) 得出 $m = 0.034$, 就我们所知, 国内对二极管两解理端面增透后得到的模谱图, 其调制度 m 还没有更低的报道。根据 (7)、(8) 两式, 我们所得到的剩余反射率为 $R_1 R_2 = 3 \times 10^{-5}$ 。

图 4 给出了 $\ln G \sim I/I_t$ 的关系曲线, 当 $I/I_t < 1.4$, 实验曲线呈线性关系。由线性部分的

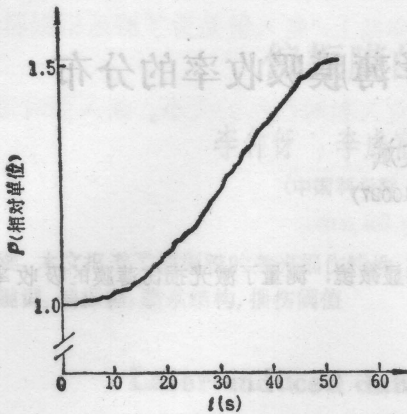


图1 镀膜过程中二极管输出与时间的关系($I=0.5I_t$)

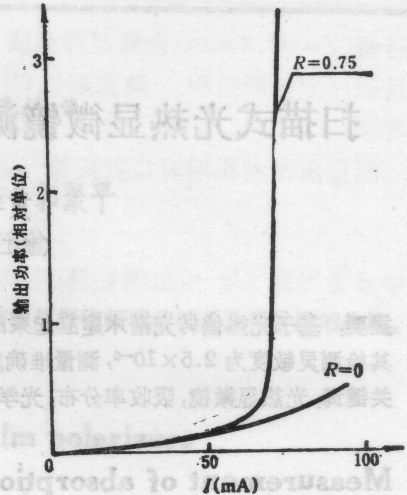


图2 单端镀AR,外腔运行的P-I曲线

斜率得 $r = \frac{\ln G_1 - \ln G_2}{L(I_1 - I_2)} = 4.15/\text{mA} \cdot \text{cm}$, 其中实测二极管长 $L=140 \mu\text{m}$ 。当 $I/I_t > 1.4$,

由于饱和效应, 导致往返增益减小, 因而曲线进入非线性部分。将实验曲线的直线部分延长与 $\ln G$ 轴相交于点 $\ln G_0$, 取 $R_0=0.32$, 得到两端面反射率(R_1R_2)的值与前面的值是一致的。

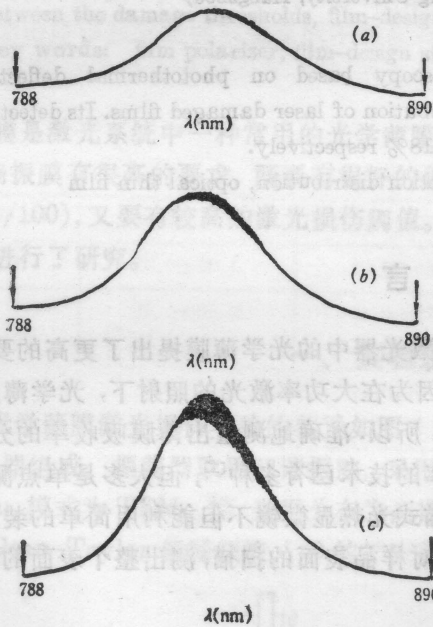


图3 两端面镀AR的输出模谱

- (a) $I/I_t=1, m=0.034$; (b) $I/I_t=1.28, m=0.067$;
- (c) $I/I_t=1.52, m=0.134$

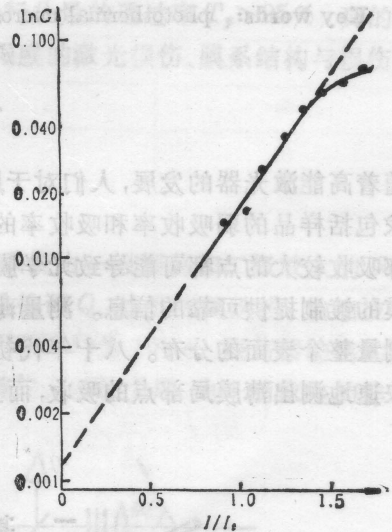


图4 $\ln G$ 与 I/I_t 关系

参 考 文 献

- 1 D. Marcuse, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**(1), 63(1983)
- 2 G. H. B. Thompson, *Physics of Semiconductor Laser Devices*, John Wiley & Son, 118(1980)
- 3 I. P. Kaminow *et al*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**(3), 493(1983)
- 4 Lu Yucun *et al.*, *OPTICAL COATINGS-Proc. Int. Symposium, China*, 88(1989)
- 5 T. Saitoh *et al.*, *Post-Deadline papers, First Optoelectronics Conf., Tokyo, B11-2, 12(1986)*