

TW-SLA AR膜剩余反射率实时监控新方法*

黄菊仙 刘德明 黄德修

(华中理工大学光学系, 武汉)

摘要: 介绍一种实时监控行波半导体激光放大器(TW-SLA)抗反膜(AR)超低剩余反射率的新方法。从理论和实验上分析了剩余反射率与SLA的输出光功率关系及温度对其输出功率的影响。在 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP掩埋异质结(BH)激光二极管(LD)上镀单层 SiO_x 或 $\text{SiO}_{x_1}/\text{SiO}_{x_2}$ 膜获得了低于 5×10^{-4} 的超低反射率。

A new method of monitoring the in-situ residual reflectivity of antireflection coating

Huang Juxian, Liu Deming, Huang Dexiu

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: A new method of monitoring the in-situ extremely low residual reflectivity of antireflection (AR) coating of travelling-wave semiconductor laser amplifier (TW-SLA) is presented. The relations among the residual reflectivity, temperature and the output power of SLA are analyzed theoretically and experimentally. Minimum reflectivity less than 5×10^{-4} can be realized by means of using a $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP buried-hetero-structure (BH) laser diode coated with single-layer SiO_x or double-layer $\text{SiO}_{x_1}/\text{SiO}_{x_2}$ film.

一、引 言

TW-SLA在未来的光学系统中有许多应用,如在长远距中继系统中的简单无再生中继器、光开关、功率放大器。一般系统的增益锁相等^[1~4]。

事实上, TW-SLA就是在芯片上镀有AR膜的普通半导体激光器。一个理想的TW-SLA的芯片应该是零反射率。但是在实际当中,总是存在一些剩余反射率的,这就导致了光学带宽的减小和增益波动的增加。

光在SLA芯片上两个端面的剩余反射率 R_1 和 R_2 不等于零时,在增益带宽内的增益波动可以表示成:

$$\Delta G = \frac{G_{\max}}{G_{\min}} = \left(\frac{1 + \sqrt{R_1 R_2} G_s}{1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中, G_s 为单程增益,可表示成:

$$\Delta G = \exp(\Gamma g - \alpha) L \quad (2)$$

式中, g 和 α 是增益系数和衰减系数,单位为 cm^{-1} , L 是SLA的腔长和 Γ 是模场的限制因子。

从方程(1)可知,当 $G_s = 25\text{dB}$,若增益波动要小于 3dB ,则 $\sqrt{R_1 R_2}$ 必须小于 5.34×10^{-4} ,

* 国家“863”计划资助项目。

因此,如何去获得非常低的反射率就成为改进TW-SLA性能的关键。实时监控镀膜过程中的剩余反射率就是一种解决的办法。

本文通过计算机模拟,从与剩余反射率密切相关的时间速率方程出发,从理论上分析了剩余反射率与SLA输出光功率($P-I$ 曲线)之间的关系。介绍一种在镀膜过程中通过监测 $P-I$ 曲线的曲率变化以实现监控膜厚的新方法。报告了用这种新的监控技术在 $1.3\mu\text{m}$ BH-LD解理面上镀制AR膜的实验结果。

二、理 论

根据速率方程和计算机模拟的结果,我们可以得到SLA芯片在不同反射率下的输出功率($P-I$)曲线。如图1所示。可见它是由两条不同斜率的曲线组成。

换句话说,监测的激光器芯片的输出功率可以表示为:

$$P = \begin{cases} P_{th} + \eta(R_1, R_2)(I - I_{th}) & I > I_{th} \\ \eta_s I & I \leq I_{th} \end{cases}$$

式中, η_s 和 $\eta(R_1, R_2)$ 分别表示与自发发射和受激发射对应的斜率。当 $I = I_{th}$ 时, $P_{th} = \eta_s I_{th}$, I_{th} 是阈值电流,由下式给出^[5]:

$$I_{th} = \frac{WL}{\beta} \left(\alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \quad (3)$$

式中, β 是增益因子, W 是P-N结的宽度。

作为上面分析的结果, $P-I$ 曲线的曲率可以表示成:

$$\frac{d^2 P}{dI^2} = \begin{cases} 0 & I \neq I_{th} \\ k(R_1, R_2) & I = I_{th} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $k(R_1, R_2)$ 是 $I = I_{th}$ 时的 $P-I$ 曲线的曲率,而 I_{th} 与剩余反射率有关。

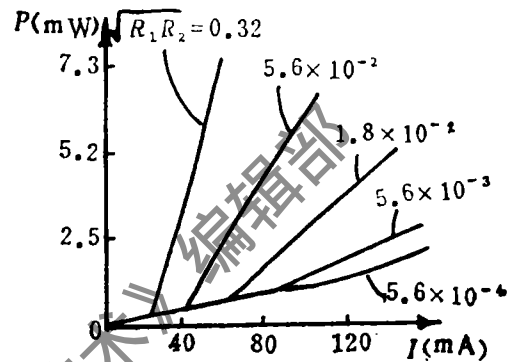


图1 不同 $\sqrt{R_1 R_2}$ 值对应的 $P-I$ 曲线

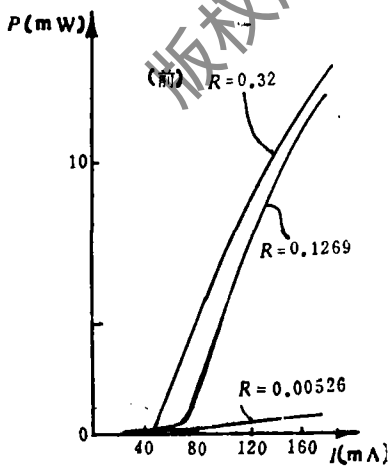


图2 实验样品的 $P-I$ 曲线

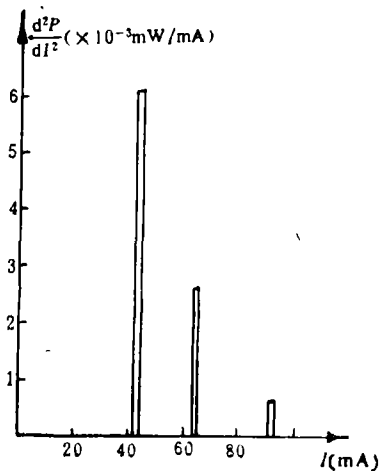


图3 d^2P/dI^2 随电流 I 的变化

图2是我们实验样品的 $P-I$ 曲线。图3所示为与其不同剩余反射率对应的 $\frac{d^2P}{dI^2}$ 随电流 I 的变化,当 $\sqrt{R_1R_2}$ 趋于零时,曲率也趋于零,但只要剩余反射率大于 1×10^{-6} ,曲率就足以能被检测到。因此我们可以通过确定 $P-I$ 曲线的曲率达到最小值时来确定AR膜的最佳厚度。

三、实验与分析

在我们的实验中,实时监测剩余反射率的装置放在镀膜机的钟罩里。1kHz的正弦信号加在直流电平上,用来监测半导体激光器芯片(MSLC),从(MSLC)芯片背面出来的光用PIN探测器接收,并被高灵敏度的前置放大器放大。然后将检测到的信号解调,获得 $P-I$ 曲线的斜率值。为了检测 $P-I$ 曲线的曲率,在阈值电流 I_{th} 附近对直流电平进行扫描,在此同时,微分器将给出曲率。在整个镀制AR膜的过程中,光学膜厚控制系统一直在工作,以便监测反射率。

在我们的实验中发现温度对阈值电流 I_{th} 和输出功率 P 影响很大,如图4所示,曲线1,2,3为LD镀膜前(即芯片两端面都是解理面)在不同温度下测试的 $P-I$ 曲线,如曲线1与2, $\Delta T = 29^\circ\text{C}$, $\Delta I_{th} = 26\text{mA}$, $\Delta P = 7.5\text{mA}$ ($I = 160\text{mA}$ 时)。可见温度升高时,阈值电流升高了,而输出功率却降低了,特别当温度高时,这种影响更显著(这从曲线3与2之比较是显而易见的)。曲线5和4是在LD前端面镀了AR膜之后不同温度下的 $P-I$ 曲线,同样也可以看出温度对 I_{th} 和 P 的影响。众所周知,影响LD温度特性的因素是很多的,不可能用一个公式来概括所有器件的 $I_{th}-T$ 的关系,通常使用下式来表示^[7]:

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_r) \exp\left(-\frac{T-T_r}{T_0}\right) \quad (5)$$

式中, T_r 为室温, $I_{th}(T_r)$ 为室温下的电流密度, T_0 是LD的特征温度,它与激光器所用的材料和结构有关。可见 $I_{th}(T) \propto \exp(T/T_0)$,上述的实验结果与理论分析是一致的。我们采用了温度控制器来恒定温度,从而避免了温度对输出的影响。

本文作者选择了 SiO_x ($0.5 \leq x \leq 1.5$)和 $\text{SiO}_{x1}/\text{SiO}_{x2}$ 分别作为单层和双层膜的膜料,对于镀双层AR膜,还可以通过改变膜厚来满足“零反射率”条件。图5所示为我们对 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP掩埋激光器(BHLD)芯片两端面镀AR膜的情况。采用电子束蒸发 SiO_x 单层膜,其折射率 n_{f1} ($n_{f1} = 0.965\sqrt{n_s} = 1.81$, n_s 是解理面的折射率)。

薄膜的折射率是通过调节沉积速率或钟罩内的气压来控制的。反射率的计算是采用如下公式:(即“外量子效率”法)

$$\frac{\eta_c}{\eta_{c0}} = \sqrt{\frac{R_{uc}}{R_c}} \frac{(1-R_c)}{(1-R_{uc})} \quad (6)$$

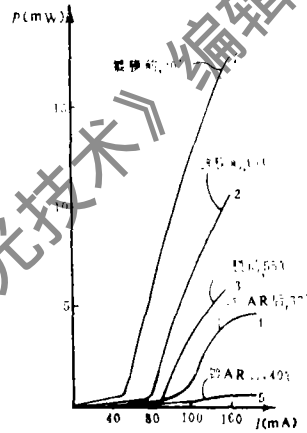


图4 不同温度对应的 $P-I$ 曲线

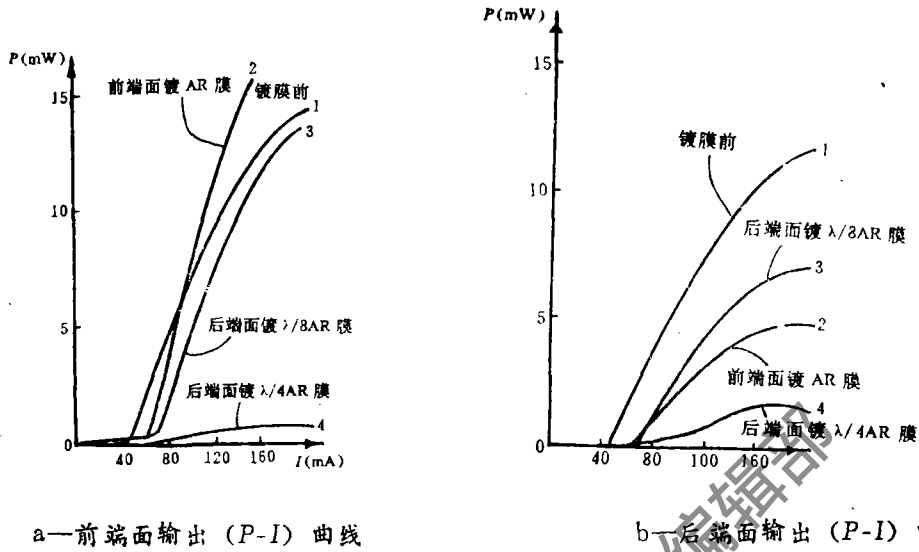


图5 12.5°C所得P-I曲线

式中, η_c 和 η_{uc} 分别表示LD芯片两端面的外量子效率, R_c 与 R_{uc} 为与之对应的反射率, 令 $k = \eta_c / \eta_{uc}$, $T = 1 - R_{uc}$, 则

$$R_c = \frac{R_{uc}}{T^2 k^2 + 2R_{uc}} \quad (7)$$

可见只要已知 η_c , η_{uc} 和 R_{uc} 即可求出 R_c 。

图5a和b的P-I曲线是在12.5°C时所检测, 在我们的实验中, 解理面的反射率为 $R_{uc} =$

0.31, 修正因子 $g = \frac{\eta_1}{\eta_2} = 1.11176$, 其余各数值见附表。

将附表各数代入(7)式计算, 得到前端面反射率 $R_1 = 6.00\%$, 后端面反射率 $R_2 = 0.526\%$, $R = \sqrt{R_1 R_2} = 1.777 \times 10^{-2}$ 。我们的实验结果与图1的理论曲线是一致的。

MSLC剩余反射率是采用“调制深度”法^[6]和“外量子效率”法检测的。

附表 实验数据

序号	芯片状态	效率 η (mW/mW)	
		前端面	后端面
1	未镀膜	$\eta_1 = 0.11539$	$\eta_2 = 0.10379$
2	前端面镀AR	$\eta_1' = 0.17571$	$\eta_2' = 0.051143$
3	后端面镀 $\frac{\lambda}{8}$ AR	$\eta_1'' = 0.13216$	$\eta_2'' = 0.07512$
4	后端面镀 $\frac{\lambda}{4}$ AR	$\eta_1''' = 0.00700$	$\eta_2''' = 0.0225$

图6所示为我们采用该监控技术在1.3 μ m InGaAsP/InP芯片的前端面镀制AR膜前后的P-I曲线, 其反射率为 4.846×10^{-4} 。

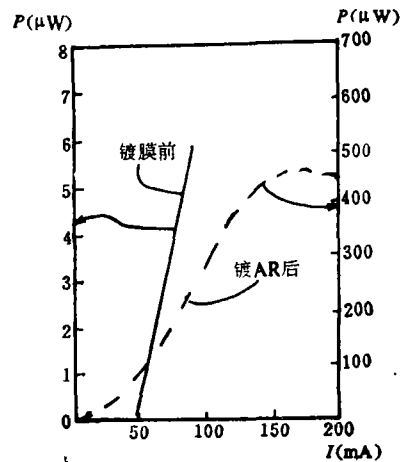


图6 镀AR膜前后的P-I曲线

四、结 语

我们已经介绍了实时监控对 $1.3\mu\text{m}$ LD沉积AR的新方法,它表明了该技术可以在SLC镀膜AR膜过程的任何时间内监测剩余反射率的变化,已经测量了反射率,并已获得了低于 5×10^{-4} 的超低反射率。我们已经将本技术成功地应用于制备优质的行波半导体激光放大器(TW-SLA)。

参 考 文 献

- [1] Mukai T, Yamamoto Y. Optical direct amplification for fibre transmission. Rev Elect Commun Lab, 1983; 3 (3) : 340~348
- [2] Simon J C. Semiconductor laser amplifier for single-mode optical fibre communication, J Opt Commun, 1983; 4 (2) : 51~56
- [3] O'Mahony M J, Marshall I W. An optical repeater using a semiconductor laser amplifier. 3rd Int Conference on Telecommunication Transmission. London; 1985; 159~161
- [4] Weatlake H J, Adams M J, O'Mahony M J. Optical bistability measurements on a $1.5\mu\text{m}$ semiconductor laser amplifier. CLEO'85, Baltimore; 1985
- [5] Kressel H, Butler J K. Semiconductor lasers and heterojunction LEDs, 1977
- [6] Kaminow I P, Eisenstein G, Stulz L W. Measurements of the model reflectivity of an antireflection coating on a super-luminescent diode. IEEE J Q E, 1983; QE-19; 493
- [7] 黄德修. 半导体光电子学. 成都: 电子科技大学出版社, 1989

收稿日期: 1991年8月13日。

· 简 讯 ·

西物所硅雪崩光电二极管及前放组件通过生产鉴定

中国兵器工业总公司于1992年1月8~12日在成都主持了对西南技术物理研究所SPD-032硅雪崩光电二极管及SPD-052雪崩光电二极管前放组件($\lambda = 400 \sim 1100\text{nm}$)产品的生产鉴定会。有关专家及部分使用厂家代表参加了生产鉴定会。与会代表对该产品的工艺及技术资料、产品性能,对生产线的生产、检测设备,对质量保证体系等进行了全面认真的审查。全体代表一致认为,1985年曾获国家技术进步一等奖的该项成果,近几年经过多次工艺改进,提高了成品率,使产品性能更加稳定可靠,通过扩充生产及检测设备,现已具备批量生产能力,提供实用的合格产品,从而结束了我国高灵敏光电探测元件一直依赖进口的历史。

(郝正福 供稿)