

两层介质减反膜及其在半导体光电器件中的应用

黄德修 刘德明 樊承钧
(华中工学院光学系)

提 要

本文提出了两层介质减反膜的膜系设计方法,导出了用于半导体激光放大器的最佳减反膜系参数,分析了膜层厚度误差对膜系特性的影响,并在行波半导体激光放大器及光探测器上得到了满意的试验结果。
关键词: 减反膜, 半导体激光放大器。

一、引 言

在光纤通信领域,光学薄膜起着越来越重要的作用。用作半导体激光器的保护膜可以提高器件的可靠性;对探测器光敏面增透后能提高其探测灵敏度;行波半导体激光放大器的技术关键之一是将半导体激光器的两解理面增透,从而消除谐振腔的选膜效应,利用半导体激光器有源区高的单程增益来实现光信号的放大。

在半导体激光器的两解理面上光的反射行为远比一般的平面波入射情况复杂,这是因为入射光具有复杂的场分布,同时光场在两个不同的偏振方向上反射的情况也不尽相同。本文利用平面波角谱分析方法,并借助于 Brown 天线互易理论来计算膜系的剩余反射率并求出所需要的膜系设计参数。

二、膜系设计与计算

本文所研究的波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的行波半导体激光放大器的结构如图 1 所示,高折射率的有源层(InGaAsP)埋入低折射率的限制层(InP)之中,构成光波导。通常有源层很薄($\sim 0.2\mu\text{m}$)以保证单横膜工作,这就使得设计减反膜的计算工作,由于只需对基横膜进行讨论,而无需对不同阶横模之间的耦合进行繁琐的计算。

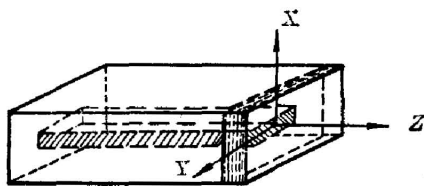


Fig. 1 Structure of the SLA

设光放大器端面处($z=0$)的输出为具有束斑直径为 a 的高斯分布,不考虑随时间变化的因子 $\exp(i\omega t)$,则 $x-z$ 平面上的光场分布为

$$E(x, 0) = \exp(-x^2/a^2), \quad (1)$$

将 $z=0$ 平面上的入射场表示为平面波角谱的叠加

$$\left. \begin{aligned} E(x, 0) &= \int_{-1}^{+1} F_i(s) \exp(ik_0sx) ds, \\ F_i(s) &= \frac{\sqrt{\pi} an_0}{\lambda} \exp\left[-\frac{s^2}{(\lambda/\pi an_0)^2}\right], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $F_i(s)$ 为角谱函数, $k_0 = (2\pi n_0/\lambda)$, n_0 为有源层的介质折射率, λ 为真空中的光波长, $s = \sin \theta$, θ 为平面波的入射角。设减反射膜的非涅尔振幅反射系数为 $r(s)$, 则对应于入射分量 $F_i(s)$ 的反射分量 $F_r(s)$ 为

$$F_r(s) = r(s) F_i(s). \quad (3)$$

根据 Brown 天线互易理论^[1], 可推得膜系的剩余反射率为

$$R = \frac{\left| \int_{-1}^{+1} r(s) Q_1(s) \exp\left[-\frac{2s^2}{(\lambda/\pi an_0)^2}\right] ds \right|^2}{\left| \int_{-1}^{+1} Q_2(s) \exp\left[-\frac{2s^2}{(\lambda/\pi an_0)^2}\right] ds \right|^2}, \quad (4)$$

式中, 对 TE 波有 $Q_1(s) = Q_2(s) = \cos \theta$; 对 TM 波则有

$$Q_1(s) = [(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)/\cos \theta], \quad Q_2(s) = (\cos \theta)^{-1}.$$

从(4)式可知, 减反射膜的剩余反射率在很大程度上取决于非涅尔反射系数 $r(s)$ 。对于单层膜系, 为了获得较低的 $r(s)$, 对膜层的折射率以及膜厚控制要求极为苛刻。因此本文采用了双层膜系结构, 如图 2 所示。双层结构对任意的膜层折射率, 总可以通过调整膜层的厚度来实现相位匹配, 从而获得较低的反射率, 同时, 对于膜料折射率以及膜厚控制上的偏差要求也远比单层膜宽容得多, 这给减反射膜的镀制带来很大方便。

对于两层膜系, 设几何厚度分别为 h_1 和 h_2 , 两种膜料的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 有源层折射率为 n_0 , 空间折射率为 n_3 , 则以 θ 角入射的平面波具有振幅反射系数为^[2]

$$\left. \begin{aligned} r(s) &= \frac{r_{01} + r'(s) \exp(-2i\beta_1)}{1 + r_{01} r'(s) \exp(-2i\beta_1)}, \\ r'(s) &= \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-2i\beta_2)}{1 + r_{12} r_{23} \exp(-2i\beta_2)}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_i &= \frac{2\pi n_i h_i}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{n_0 s}{n_i}\right)^2}, \quad (i=1, 2) \\ r_{ik} &= (\eta_k - \eta_i) / (\eta_k + \eta_i), \\ \eta_i &= \begin{cases} n_i \sqrt{1 - (n_0 s/n_i)^2} & \text{(TE 波)} \\ n_i / \sqrt{1 - (n_0 s/n_i)^2} & \text{(TM 波)} \end{cases} \quad (i=0, 1, 2; k=i+1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

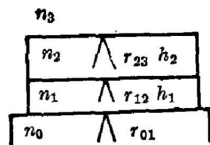


Fig. 2 Structure of the AR film

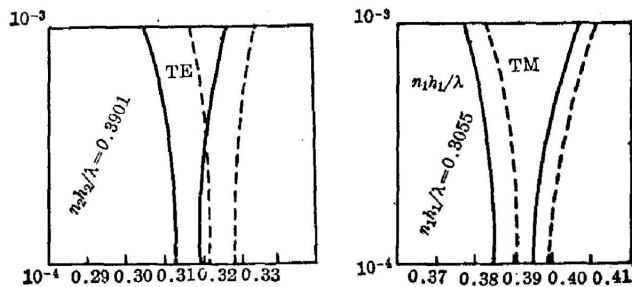


Fig. 3 Curves of reflectivity vs. film thickness

综合(5)、(6)两式,利用数值积分的方法可以求出 R 最小时的最佳膜系参数以及允许的膜层厚度误差。

本文选用 TiO_2 ($n_1=2.1$) 及 SiO_2 ($n_2=1.447$) 作为镀膜材料,取激光放大器输出束斑 $a=0.5\ \mu\text{m}$,激光中心波长 $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$,计算得到:当剩余反射率 $R<10^{-6}$ 时,最佳膜系参为

$$\left. \begin{array}{l} \text{TE 波:} \\ \text{TM 波:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{n_1 h_1}{\lambda} = 0.3160, \quad \frac{n_2 h_2}{\lambda} = 0.3901, \\ \frac{n_1 h_1}{\lambda} = 0.3055, \quad \frac{n_2 h_2}{\lambda} = 0.3945. \end{array} \quad (7)$$

如果只要求剩余反射率 $R<10^{-3}$,则计算得到膜层的厚度误差允许为

$$\left. \begin{array}{l} \text{TE 波:} \\ \text{TM 波:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \delta_1 = 2.848\%, \quad \delta_2 = 3.332\%. \\ \delta_1 = 3.273\%, \quad \delta_2 = 3.549\%. \end{array} \quad (8)$$

图 3 给出了反射率随膜厚度变化的关系曲线。

由上述计算结果可知, TM 波情况下膜厚允许误差高于 TE 波,因此对于一个实际的器件, TE 波的反射率高于 TM 波的反射率,这已为早期的试验所证实^[3],即一个超荧光发光二极管的辐射光中 TE 偏振占优势。

三、减反膜的镀制与测试

采用真空蒸镀的方法镀制减反膜一般用 $(\lambda_0/4)$ 极值法来控制膜层厚度;而双层减反膜须采用非 $\lambda_0/4$ 膜层结构,本文采用了双波长控制的工艺,即首先根据(7)式的结果求得两膜层的平均光学厚度为*:

$$\begin{aligned} n_1 h_1 &= 0.31075 \lambda_0 = 0.37290\ \mu\text{m}, \\ n_2 h_2 &= 0.3923 \lambda_0 = 0.47076\ \mu\text{m}. \end{aligned}$$

然后令 $n_1 h_1 = (k_1 \lambda_1 / 4)$; $n_2 h_2 = (k_2 \lambda_2 / 4)$ ($k_1, \lambda_1, k_2, \lambda_2$ 分别是两种膜层的 $(\lambda/4)$ 厚度的层数和控制波长),得到

$$\begin{array}{l} \text{TiO}_2: \quad k_1 = 2, \lambda_1 = 7458\ \text{\AA} \quad \text{或} \quad k_1 = 3, \lambda_1 = 4972\ \text{\AA}, \\ \text{SiO}_2: \quad k_2 = 3, \lambda_2 = 6277\ \text{\AA} \quad \text{或} \quad k_2 = 4, \lambda_2 = 4708\ \text{\AA}. \end{array}$$

利用这种双波长控制的方法,我们成功地在 InGaAsP 解理面上镀制了 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 两层减反膜,并进行了光放大试验。

由于半导体激光器解理面极小(有源层 $0.2 \times 5\ \mu\text{m}^2$),直接测量剩余反射率是比较困难的。本文采用了间接测量方法,即通过测发光光谱的调制度来计算剩余反射率的大小。图 4 是光放大器增透以前的光谱;图 5 是背面增透之后从正面输出的发光光谱,其偏置电流等于增透前的阈值电流(80 mA)。这时的光谱实际上是由腔面剩余反射率引起的 F-P 腔模调制的自发发射谱。测得光谱的调制深度 m 为

$$m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} = 0.0698, \quad (9)$$

式中 P_{\max} 和 P_{\min} 分别是中心波长处光功率的峰值与谷值,与两解理面反射率 R_1, R_2 之间

* 取实际控制波长 $\lambda_0=1.2\ \mu\text{m}$ 。

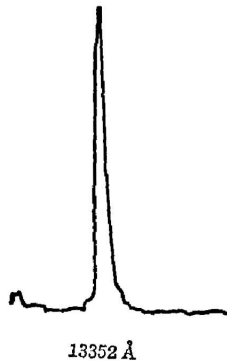


Fig. 4 Spectrum of SLA before coating

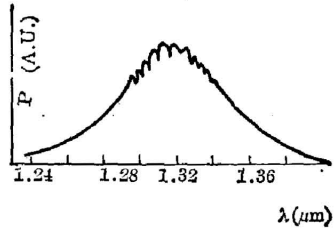


Fig. 5 Spectrum of SLA after one facet is coated

通过一个放大因子 c ($|c| \ll 1$) 由下式联系起来^[4]

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{2|c|}{1+|c|^2}, \\ R_1 R_2 &= (|c| R_i)^2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 R_i 为半导体激光放大器有源层解理面的反射率。取

$$R_i = 0.32 (n_1 = 3.6),$$

且

$$R_1 = R_i,$$

则镀有减反膜的一面, 其剩余反射率为

$$R_2 = 3.9 \times 10^{-4}.$$

上述关于半导体激光放大器的两层减反膜设计方法也适合于对其它光电器件的增透。经

过适当修改后, 我们也成功地对半导体光电探测器光敏面进行了增透。仍采用 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系, 在长波长 ($1.3 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$) PIN 和 APD 光电探测器光敏面上镀制了减反膜之后, 有效地减少了入射光能的反射损耗, 大大提高了探测灵敏度。图 6 中的曲线 *a* 和曲线 *b* 分别表示增透前与增透后的光谱响应曲线。可以看到, 镀制减反膜之后使探测灵敏度提高了 30% 以上。

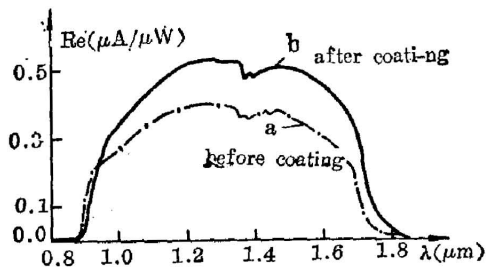


Fig. 6 Responsive spectrum of the detector

四、结 束 语

本文从理论上探讨了行波半导体激光放大器减反膜的设计方法, 并对波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的 $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ 激光放大器, 采用二维近似, 选择 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 两层减反膜系, 通过数值计算求出了最佳膜系参数, 并分析了膜厚误差对减反膜特性的影响, 进而利用真空镀膜双波长控制技术成功地镀制了剩余反射率为 3.9×10^{-4} 的减反膜, 实现了半导体激光光放大并提高了光探测器的探测灵敏度。

本工作得到了国家科委及武汉邮电科学院的资助, 武汉邮电院电信器件公司给予了大力支持和帮助, 在此仅表衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] J. Brown; *Proc. IEEE (Part C)*, 1958, **105**, No. 8 (Sep), 472~475. R. H. Clark *et al.*; «*Diffractive Theory & Antennas*», (New York, Halsted, 1980).
- [2] 麦克劳德; «光学薄膜技术», (国防工业出版社, 1984)。
- [3] I. P. Kaminov *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 1 (Jan), 78~82.
- [4] I. P. Kaminov *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**, No. 4 (Apr), 493~495.

A two-layer dielectric AR film and its application in semiconductor opto-electrical devices

HUANG DEXIU, LIU DEMING AND FAN CHENGJUN

(Huazhong University of Science & Technology)

(Received 20 January 1987; revised 9 March 1987)

Abstract

This paper gives a theoretical study on the design method of the anti-reflection (AR) film for traveling wave semiconductor laser amplifiers (TWSLA). A two-dimensional digital integration is used to calculate the optimum film parameters and their allowable errors for $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ AR film coated on the facets of the 1.3μ InGaAsP lasers. Such films are successfully fabricated by using the vacuum coating and two-wavelength control technique. The reflectivity of the is lower than 3.0×10^{-4} . By means of the AR film, we succeeded in achieving the direct amplification for the optical signal and in increasing the sensitivities of PIN & APD detectors.

Key Words: Anti-reflection film; Semiconductor laser amplifiers.