

半导体光放大器端面镀膜的实验与研究

常进, 黄德修

(华中科技大学 光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在中心波长为 1 310 nm 的 InGaAsP 半导体激光器的端面镀制了剩余反射率 $< 10^{-4}$ 的 3 层减反射膜, 得到了自发辐射谱波纹 < 0.5 dB 的半导体光放大器。

关键词: 半导体光放大器; 减反射膜镀制; 剩余反射率

中图分类号: TN72 文献标识码: A 文章编号: 1005 - 8788(2004)05 - 0065 - 03

Experiment and research of coating on semiconductor optical amplifiers facets

CHANG Jin, HUANG De-xiu

(Dept. of Optoelectronic Eng., HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: Using a triple-layer antireflection coating on facets of InGaAsP semiconductor laser chips, the minimum facet reflectivity $< 10^{-4}$ at the center-wavelength of 1 310 nm and the semiconductor optical amplifiers with ASE ripple < 0.5 dB are obtained.

Key words: semiconductor optical amplifier; antireflection coating; residual reflectivity

1 概述

半导体光放大器具有体积小、功耗低、可集成并且易批量生产的特性, 可用于光子开关和波长变换等光脉冲信号处理, 是全光通信网中必不可少的关键光电子器件。根据端面剩余反射率的不同, 一般把

半导体光放大器分为两种: Fabry-Perot 腔放大器 (F-P-SOA) 和行波放大器 (TW-SOA)。对于 F-P 腔放大器, 两个腔面为自然解理面, 反射率为 30% 左右, 入射光从一端面进入, 在两个腔面之间多次来回反射而得到放大。用 F-P 干涉仪的标准理论可以得到放大系数^[1]为

$$G = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G_S}{(1 - G_S \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G_S \sqrt{R_1 R_2} \sin^2[\frac{\pi}{2}(\frac{L}{\Lambda} - \frac{\omega}{\omega_0})]} \quad (1)$$

式中, G_S 是单程增益; R_1 和 R_2 分别是两个腔面的反射率; ω_0 为中心频率; L 为 F-P 腔的纵模间隔。由 (1) 式可知, F-P-SOA 的增益是频率的周期性函数。设 $R_1 = R_2 = R$, 得出增益波动 r 为

$$r = \frac{G_{\max}}{G_{\min}} = \frac{(1 + RG_S)^2}{(1 - RG_S)^2} \quad (2)$$

F-P-SOA 偏置在阈值电流以下, 增益谱宽很窄, 饱和输出功率低, 噪声指数高, 因此在光通信系统中并不适用。而 TW-SOA 的端面反馈得到了抑制, 理想的行波放大器入射光只受到单程增益, 放大器的带宽不再由腔的谐振决定, 因而增益谱很宽并且光滑。一般商用器件要求增益波动 < 1 dB, 即 $r < 1.26$, 由此可得出

$$G_S R < 0.06 \quad (3)$$

作为前置放大和线路放大等用途的 SOA, 考虑到封装损耗, 要求芯片内增益 > 30 dB, 则应使 $R < 6 \times 10^{-5}$ 。即使是作为光开关矩阵, 波长转换器的 SOA 也需要提供至少 15 dB 的内增益, 相应的 $R <$

1.9×10^{-3} 。由此可见, 行波放大器对腔面抗反射的要求是很高的, 而对腔面蒸镀极低剩余反射率的减反射膜仍是目前主要的减少反馈谐振的技术。

2 膜系设计

我们首先选定采用倾斜波导结构的 1 310 nm InGaAsP 混合应变量子阱激光器作为镀膜基片。由于光波导与简单平面不同, 精确的理论分析要求对有源区与限制层分别求解 TE 与 TM 模式的反射率。严格的膜系设计应该采用平面波展开法 (PWM) 或自由空间辐射模 (FSRM) 法。但这些方法的前提都需要较精确地得到波导层的几何结构与模场分布, 而且同样存在近似误差。为了减少腔面反馈, 管芯有源区采用了倾斜波导, 三维倾角结构的引入更使计算与优化的效率大大降低。实际中由于管芯的离散性与膜料选择的限制, 很难真正做到对每一个被镀膜芯进行精确的膜系设计。因此我们仍采用了基于干涉理论的光学薄膜设计软件, 只是首先确定

收稿日期: 2004-01-30

基金项目: 国家“八六三计划”资助项目 (2002AA312090)

作者简介: 常进 (1976-), 男, 河南郑州人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光通信器件中的光学薄膜技术。

将激光器端面波导层的等效折射率 n_{eff} 近似作为衬底折射率。

通过参考文献[2]及有源区光栅光谱的测量结果反推,可以确定 $n_{\text{eff}} = 3.39$ 。最简单的减反膜为 $\lambda/4$ 单层膜,为使 1 310 nm 处的反射率为 0,膜层的理想匹配折射率为 $n = 1.841$ 。采用 SiO_x , Si_xN_y , ZrO_2 等膜料及适当的工艺参数控制,可以得到此匹配折射率,但是此膜系增透带宽较窄,理想情况下 $R < 10^{-4}$ 的带宽只有 30 nm。误差分析可以发现,单层膜对膜层厚度与折射率的变化极为敏感,而且很难同时对 TE 与 TM 两种模式都得到理想的减反效果,导致器件产生较大的偏振相关增益(PDG)。实际镀制实验也证实,单层 SiO 膜在目前可能的设备条件下很难得到稳定的成品率,而如果采用在线监控又需要对镀膜设备进行较大改动,并且无法批量制备。因此,我们重新设计了极低剩余反射的多层宽波段减反膜。首先选定最常用也是光学性质最稳定的 SiO_2 ($n_1 = 1.43$) 作为低折射率材料,根据最基本的 $\lambda/4$ 双层膜的设计方法^[3],高折射率材料的折射率应满足如下关系:

$$n_2 = n_1 \sqrt{n_{\text{eff}}} = 1.43 \times 1.841 = 2.63. \quad (4)$$

在 1 310 nm 处具有 2.63 折射率的镀膜材料并不存在,因此,我们采用了高低折射率组合的材料代替对来代替内层膜。高折射率材料选用半导体工艺中常用的 Si ($n = 3.54$),而从工艺简单可靠出发,低折射率材料仍选用 SiO_2 ($n = 1.43$)。通过矢量计算与程序优化,我们得到代换对的光学厚度 T 分别为 $T_{\text{SiO}_2} = 0.0555$, $T_{\text{Si}} = 0.09875$,而最外层 SiO_2 的厚度为 0.247。整个膜系采用了折射率低-高-低(SiO_2 -Si- SiO_2)的 3 层设计,其理论曲线如图 1 所示。

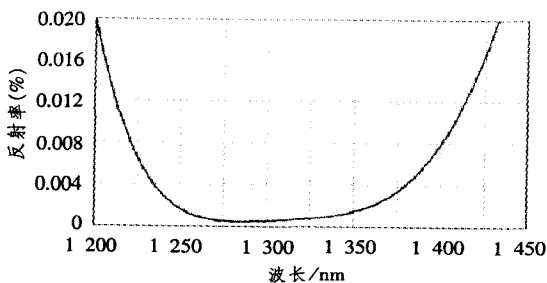


图1 3层膜系的理论曲线图

从图1的设计曲线可以看出, $R < 10^{-4}$ 的增透带宽达到了近 200 nm。在软件中选用 0.01 的膜层厚度相对标准差时,随机计算了 50 条曲线,在

1 310 nm 处的减反效果仍能基本达到 0.01 % 以下,可见此膜系各层厚度具有较大的容差,降低了对高精度控制精度的要求。

3 镀制工艺与测试结果

工艺制备是在 Denton 公司 Integrity IAD 镀膜机上进行的。设备采用 e 型电子枪蒸发膜料,荷能氩离子辅助轰击正在形成的薄膜,使膜层致密稳定。膜厚的监控采用反射式双光路比较法,通过高精度锁相放大器来过滤监控信号中的噪声。 SiO_2 是常规镀膜材料,蒸发工艺与监控技术比较成熟,镀制的难点是活性较高的第 2 层 Si 材料,需要很高的真空度、稳定合适的蒸发速率等参数来保证折射率精度及无吸收特性,为此需要进行大量实验。

镀膜后的 SOA 芯片首先要经过裸片性能的检测筛选。测试内容包括正、反向电流-电压特性,发光功率-电流特性,即 $P-I$ 特性等。正反向电流电压特性按半导体激光器的标准筛选,而从 $P-I$ 特性的测试中可以明显看出端面减反的效果,如图 2 所示。对于未镀膜的管芯,光功率曲线具有一个明显的阈值拐点,而端面镀膜后的管芯, $P-I$ 特性曲线没有了明显的拐点,表现出了软阈值特性,而且 TE 与 TM 模式间具有了相近的自发发射光功率。由此可以判断,两种模式的内增益也应具有相近的大小,这说明我们镀制的膜系对 TE 与 TM 模式有相近的反射率,改善了 SOA 的偏振灵敏度。

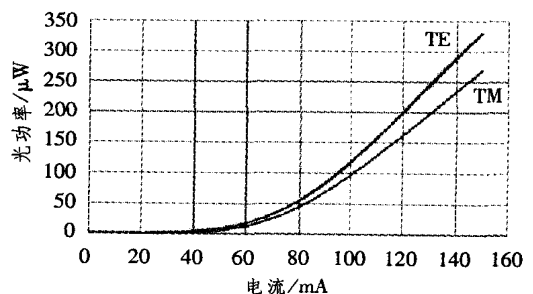


图2 管芯两端面镀膜后 TE 与 TM 模式的 $P-I$ 特性曲线

经过 $P-I$ 特性测试,筛选出在 200 mA 大电流偏置下没有激射、并具有较大发光功率的管芯,通过光纤耦合输出,用光谱仪测试了其自发辐射光谱。由于理想行波放大器的增益谱基本上相似于其自发发射谱,所以从大电流偏置时自发发射光谱的波纹大小就可以判断出端面减反射的效果。图 3 是未镀膜的管芯光谱,可以看出由于腔面反馈所呈现的多纵模振荡。图 4 是镀膜后在 150 mA 偏置电流下测试的管

芯自发发射光谱.

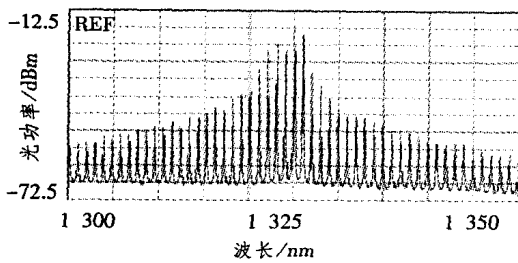


图3 未镀膜的管芯光谱

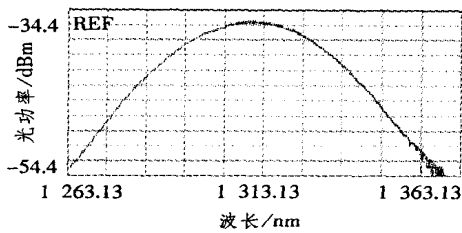


图4 镀膜后 SOA 管芯的自发发射光谱曲线

4 结论

从管芯的自发发射光谱可以看出,3层减反射膜结合倾斜波导的管芯结构,起到了很好地消除腔面反馈的作用.在25,150 mA 偏置电流下,自发谱波纹 0.5 dB,出纤功率 900 μ W.按照 Kaminow 原理^[4]对端面剩余反射率进行了测算,最低剩余反射率达到了 6×10^{-5} .180 mA 偏置电流,-25 dBm 的输入功率时,纤纤增益 15.2 dB,而 PDG <

1.2 dB.这些测试结果已达到或接近国外商用 SOA 器件的各项指标.比较管芯镀膜前后的光谱图,还可以明显看出峰值波长向短波长移动了十几个 nm,这种峰值波长的蓝移可以用能带填充效应来解释:未镀膜时,腔面为自然解理面,反射率很高,器件的阈值很低,当电流较小时,准费米能级靠近边带,载流子主要分布在带边附近的能态,载流子复合对应的能量较小,因而产生长波长增益.而减反膜的镀制使腔面反射率显著降低,可注入的电流密度大大提高,准费米能级向带内移动,高能级上分布的载流子增加,短波长的增益加大,因而从自发谱上就可以看出这种波长蓝移的现象.

参考文献:

- [1] 杜国同. 半导体激光器件物理 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2002.
- [2] 谭满清, 茅冬生, 王仲明. 反射率小于 10^{-4} 的 1310 nm 光电子器件增透膜技术的研究 [J]. 光学学报, 1999, 19(2): 235-237.
- [3] Jungkeun Lee, Toshiaki Tanaka. Novel design procedure of broadband multilayer antireflection coatings for optical and optoelectronic devices [J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(5): 884-890.
- [4] Kaminow I P, Eisenstein G, Stulz L W. Measurement of the model reflectivity of an antireflection coating on a superluminescent diode [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1983, 19: 493-495.

(上接第 32 页)

电信公司的既有基础设施,保护其原有投资.此外,DMT 方案有 ADSL/VDSL 整合型芯片,可在同一硬件上实现 ADSL 和 VDSL,可在将来随市场需求将 ADSL 通过软件编程改为 VDSL,充分保护电信公司在 ADSL 上的投资.如: Ikanos smartleap 8800A/VDSL 芯片.

总之,综合比较 DMT 和 QAM 两种调制方式,两者各有优缺点.QAM 方式调制简单,而 DMT 方式在性能方面有较大优势,其调制方式所具有的特性,使其非常适合基于耗散信道的通信.目前 ANSI T1E1.4 委员会及 IEEE 802.3ah 委员会已选择 DMT 作为 VDSL 服务的线路编码方案.随着数字处理技术的进一步发展,DMT 设备复杂性正逐步降低,相信在不久的将来必将成为一大亮点.

3 结束语

本文介绍了 VDSL 中的调制解调技术,并从理论分析、芯片性能、实际使用情况和市场因素等多角度对 VDSL 中的 QAM 和 DMT 两种调制方式进行了深入分析与比较,这些对 VDSL 设备的设计、开发都具有积极的参考意义.

参考文献:

- [1] Infineon. 22824_DS_ds2.0_datasheet [DB/OL]. http://www.infineon.com/cm_upload/documents/047/468/10BaseS_22824.pdf, 2002-05.
- [2] Fernando Ramez-Mireles, Ph D, Qasem Aldrubi, et al. The benefits of DISCRETE MULTITONE modulation for vdsl system [DB/OL]. http://www.ikanos.com/solutions/pdf/dmt_benefits_oct02.pdf, 2002-05.