

# 1.55 μm 偏振无关半导体光放大器腔面 减反膜的研制\*

马 宏<sup>1,2</sup> 朱光喜<sup>1</sup> 陈四海<sup>2</sup> 易新建<sup>2</sup>

(1 华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

(2 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

**摘 要** 设计并制作了 1.55 μm 偏振无关半导体光放大器腔面 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层减反膜, 工艺过程中设计并使用了反射率实时监控装置, 得到了低于 5 × 10<sup>-4</sup> 的腔面剩余反射率. 器件测试结果表明, 管芯在 250 mA 电流下仍处于未激射状态, 表明减反膜有效抑制了芯片的激射. 半导体光放大器的自发辐射 (ASE) 谱波动在 0.4 dB 以下, 3 dB 带宽大于 52 nm, 半导体光放大器小信号增益近 27 dB, 在 1520 ~ 1580 nm 波长范围内偏振灵敏度小于 0.5 dB.

**关键词** 半导体技术; 减反膜; 偏振无关; 半导体光放大器; 反射率

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## 0 引言

行波半导体光放大器 (TW-SOA) 在光网络中具有广泛的应用前景, 可以作为发射机的后置放大、接收机前置放大、线路放大等; 基于半导体光放大器 (SOA) 形成光开关矩阵、波长转换器、OADM 等器件和子系统<sup>[1,2]</sup>; 并可与其它光电子器件实现集成形成许多光子集成 (PIC) 和光电子集成 (OEIC) 器件<sup>[3,4]</sup>. 行波半导体光放大器实质上是一种激光器解理面完全增透的 FP-SOA. 在该放大器中, 入射信号只能单程放大或者说只有单程增益. 对于行波半导体光放大器而言, 其腔面剩余反射率越低越好, 腔面剩余反射率对放大器的带宽、增益波动等性能指标有重要影响, 如果在理想状况下, 行波半导体光放大器端面反射率为零, 增益波动将消失, 增益带宽很大, 因此, 如何降低腔面剩余反射率是制作高性能半导体行波放大器的一项重要课题.

## 1 减反 (AR) 膜的设计与工艺

通常, 减反膜可以采用可变折射率的单层材料来制作 (如 SiO<sub>x</sub>)<sup>[5]</sup>, 然而, 基于 SiO<sub>x</sub> 单层材料的一个很大的缺点是其折射率控制十分困难, 这是因为其对镀膜工艺条件 (如真空度、氧气流量和衬底温度等) 十分敏感, 更加切实可行的办法是采用两层或多层膜系, 通过调整镀层的厚度来实现超低剩余反射率. TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 是传统的被用来制作多层减反膜的高折射率和低折射率材料<sup>[6]</sup>, 本文中设计制

作的半导体光放大器腔面减反膜也采用 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 膜系. 所用器件为 1550 nm 波长窗口体材料结构半导体偏振无关半导体光放大器, 有源区为 0.1 μm 厚 InGaAsP 四元材料, 并引入 -0.12% 的张应变实现 TE 模和 TM 模的增益平衡以达到偏振无关的目的, 管芯制作成 2.8 ~ 3.0 μm 的脊型波导结构, 半导体光放大器采用斜腔结构以有效抑制腔面反射率, 并减轻镀膜的工艺压力. 选取的角度为 7°, 如果角度太大, 将影响放大器的外量子效率且给耦合带来极大的难度, 腔长为 725 μm.

在多层减反膜设计中, 将半导体光放大器波导结构看作对称平板波导, 设计中采用的基本参数如下: 有源区厚度 0.1 μm、宽度 2.8 μm, 器件斜腔角度为 7°, 其在入射光波长为 1550 nm 时的有效折射率分别为 3.267. 选取 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 两层膜系和 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 四层膜系进行研究, 膜层折射率以及各层厚度参数见表 1.

表 1 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层减反膜设计参数

Parameters	2 layers	4 layers
First layer index $n_1$	2.416	2.416
Second layer index $n_2$	2.416	1.454
Third layer index $n_3$	-	2.416
Fourth layer index $n_4$	-	1.457
First layer thickness $d_1$	241 nm	142 nm
Second layer thickness $d_2$	296 nm	554 nm
Third layer thickness $d_3$	-	123 nm
Fourth layer thickness $d_4$	-	261 nm

但是, 由于镀膜的工艺原因, 使得器件的实际腔面剩余反射率很难控制, 解决这一问题最有效的方法的建立一套反射率的实时监控装置, 所以必须对设备进行改造. 通过多次摸索和实验, 设计制作了一套有效的剩余反射率实时监控装置, 原理图如图

\* 中国博士后科学基金资助

Tel: 027-87542087 Email: mahong99@yahoo.com

收稿日期: 2004-04-16

1. 在镀膜工艺过程中,通过斩波器的参考光源发射至陪片表面,反射光由探测器接收,产生的电信号输入锁相放大器进行采样,然后输入计算机进行数据处理和计算得到实时变化的腔面剩余反射率. 在该装置中的陪片采用硅片,从理论上讲,将参考光直接发射至器件腔面是最直接,得到的结果也是最准确的,但是由于器件腔面太小,工艺实现难度太大. 由于硅片折射率与 InGaAsP 材料相差不大,故采用其作为陪片是可行的,当然,仍然需要通过大量的实验摸索建立一个对应关系,找到修正系数.

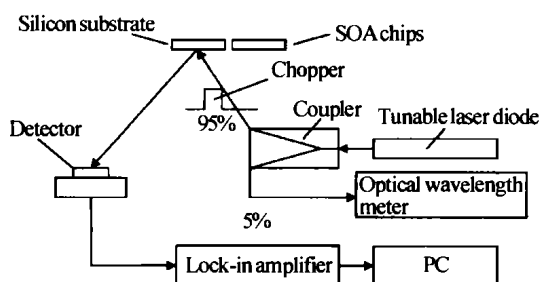


图 1 半导体光放大器腔面减反(AR)膜剩余反射率实时监控装置示意图  
Fig. 1 Schematic of In-Situ monitoring system for reflectivity of SOA facet

## 2 测试与分析

半导体光放大器腔面的实际剩余反射率测试十分困难,因此,镀膜后,首先测试陪片的剩余反射率以判断镀膜工艺是否达到要求,两层膜和四层膜的样品测试结果分别如图 2 和图 3. 从图中可以发现,

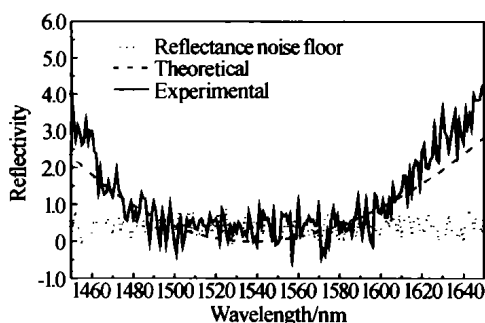


图 2 两层膜硅片的剩余反射率理论与实验曲线  
Fig. 2 Theoretical and experimental curves for two Layers anti-reflection (AR) coating of Si substrate

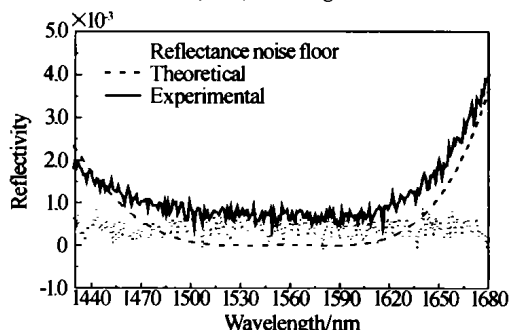


图 3 四层膜硅片的剩余反射率理论与实验曲线  
Fig. 3 Theoretical and experimental curves for four layers anti-reflection (AR) coating of Si substrate

四层膜样品的带宽明显大于两层膜的样品,而且两种样品的剩余反射率都在  $5 \times 10^{-4}$  左右,基本达到设计目标. 但是在后来的器件测试和使用过程中发现,四层膜的放大器性能指标极不稳定,据分析可能是因为尚未找到四层膜的优化工艺实现条件,所得到的四层膜质量不高所致. 因此,在以后的放大器样品特性测试中仍采用两层膜的器件,对于四层膜的工艺条件的摸索,仍有待今后继续进行.

半导体光放大器的自发辐射(ASE)谱可以较为直观地反映腔面减反膜的剩余反射率指标,减反膜的技术指标直接影响放大器自发辐射(ASE)谱的波动(Ripple)和 3 dB 带宽值. 我们先后测试了 725 μm 腔长的器件在 100 mA、150 mA、200 mA、250 mA 下的自发辐射谱,设定工作温度为 25℃,管芯在 250 mA 电流下仍处于未激射状态,表明减反膜和斜腔结构有效抑制了芯片的激射. 图 4 为 200 mA 电流下的偏振解析自发辐射谱. 从图中我们看到, TM 和 TE 两种偏振模式的自发辐射光功率相差极小,在整个光谱范围内都小于 0.7 dBm,可以认为偏振无关. 因为半导体光放大器的增益 3 dB 带宽近似等于自发辐射谱的谱宽,所以,从图 4 中还可以看出增益带宽约为 52 nm;另外自发辐射谱显示谱波动(Ripple)小于 0.4 dB,从而可推断增益谱的波动(Gain Ripple)基本上也会在此范围内.

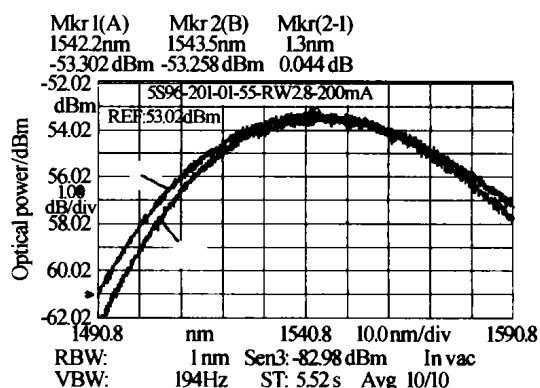


图 4 镀膜减反膜后半导体光放大器的自发辐射谱  
Fig. 4 ASE spectra of the SOA chip after AR coating

采用透镜光纤双端耦合形式得到完整的半导体光放大器器件并进行测试. 图 5 为室温下光纤到光纤的增益和驱动电流的关系曲线,采用 1550 nm 的激光作为输入信号,信号光功率为 -25 dBm,器件腔长仍为 725 μm;曲线反映,从 50 mA 到 200 mA 范围内,TE 模式和 TM 模式的增益差都小于 0.5 dB;其 200 mA 时的增益约为 18.5 dB,由于器件两端光纤和管芯之间存在耦合损耗,一般地,透镜光纤与半导体光放大器管芯之间的耦合损耗大致为每端 3.5 dB 到 5 dB,具体数值视光纤透镜的参数和耦合工艺水平而定,根据我们的工艺现状,该器件每端的

耦合损耗大约为 4 dB 左右,由此推断,放大器管芯增益已经接近 27dB.

### 3 结论

采用  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  多层膜系设计制作了  $1.55 \mu\text{m}$  偏振无关半导体光放大器腔面减反 (AR) 膜,并且在镀膜工艺过程中设计采用了反射率实时监控装置,陪片测试得到了低于  $5 \times 10^{-4}$  的剩余反射率,蒸镀减反 (AR) 膜后半导体光放大器管芯在 250 mA 电流下仍处于未激射状态,自发辐射 (ASE) 谱波动在 0.4 dB 以下,3 dB 带宽大于 52 nm,半导体光放大器小信号增益近 27 dB,在 1520 ~ 1580 nm 波长范围内偏振灵敏度小于 0.5 dB.

#### 参考文献

- 1 Diez S, Ludwig R, Weber H G. Gain-transparent SOA-switch for high-bitrate OTDM add/drop multiplexing. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, 11(1): 60 ~ 62
- 2 Geraghty D F, Lee R B, Vahala K J, *et al.* Wavelength conversion up to 18 nm at 10 Gb/s by four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(4): 452 ~ 454
- 3 Simoyama T, Kuwatsuka H, Little B E, *et al.* High-efficiency wavelength conversion using FWM in an SOA integrated DFB laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(1): 31 ~ 33
- 4 Akiyama T, Kuwatsuka H, Simoyama T, *et al.* Design optimisation of SOA-integrated DFB laser wavelength converter. *Electron Lett*, 2002, 38(5): 239 ~ 241
- 5 Gallant D J, Tilton M L, Bossert D J, *et al.* Optimized single-layer antireflection coating for semiconductor laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9(3): 300 ~ 302
- 6 Lee J, Kamiya T. Improved characterization of multilayer antireflection coatings for broad-band semiconductor optical amplifiers. *IEEE J Lightwave Technol*, 2000, 18(12): 2158 ~ 2166

## Design and Fabrication of Anti-reflection Coating for $1.55 \mu\text{m}$ Polarization-insensitive Semiconductor Optical Amplifiers

Ma Hong<sup>1,2</sup>, Zhu Guangxi<sup>1</sup>, Chen Sihai<sup>2</sup>, Yi Xinjian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

<sup>2</sup> Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2004-04-16

**Abstract**  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  multiple layers anti-reflection (AR) coatings for the facets of  $1.55 \mu\text{m}$  polarization insensitive semiconductor optical amplifiers were designed and fabricated. Less than  $5 \times 10^{-4}$  reflectivities were obtained for both two layers and four layers AR coatings. An In-Situ monitoring for reflectivity was designed and employed during the coating process. The amplifier was fabricated forming ridge waveguide structure with  $7^\circ$  tilted cavity, which showed a less than 0.4 dB ASE ripple, a more than 52 nm bandwidth, excellent polarization insensitivity (less than 0.5 dB) over the entire range of wavelength ( $1.52 \sim 1.58 \mu\text{m}$ ) and a gain of 27 dB at bias current of 200 mA and 1550 nm wavelength.

**Keywords** Semiconductor technology; Anti-reflection (AR) coating; Polarization-insensitive; Semiconductor optical amplifier

**Ma Hong** received the Ph. D. degree in physical electronics from Huazhong University of Science and Technology (HUST) in 2003. He joined Dept. of electronics and information engineering, HUST in Dec. 2003 for his post-doctoral research. Since then he has been working on the research of integrated opto-electronic devices and sub-systems for fiber-optic telecommunication applications.