

# 基于半导体光放大器的非相干光源 抗反膜的优化设计\*

黄黎蓉<sup>†</sup> 黄德修 张新亮

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 对半导体光放大器(SOA)放大的自发发射(ASE)谱进行了实验和理论研究,并且分析了 SOA 端面反射率对 ASE 谱的谱宽以及平坦度的影响. 结果表明,不恰当的抗反膜会严重减小输出光谱的带宽;而在采用具有宽带材料增益谱的有源区基础上,结合抗反膜的优化设计,则可以获得既宽又平坦的非相干光源.

关键词: 半导体光放大器; 非相干光源; 带宽; 平坦度; 抗反膜

PACC: 4255 K; 4280 X; 4280 S

中图分类号: TN248. 1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)08-1471-05

## 1 引言

具有宽带谱特性的非相干光源,与光谱分割技术相结合,有望在光接入网和城域网中取代多个不同波长的半导体激光器,从而大大降低系统的复杂度和成本. 对于这种非相干光源来说,不仅希望输出光谱具有较大的带宽,还希望其具有较高的平坦度.

半导体光放大器(SOA)在光通信中具有广泛的应用,除了具有光放大、光开关、波长转换等功能<sup>[1]</sup>之外,它还可以作为非相干光源. 当 SOA 在正偏电流且无外部光输入的情况下,其输出光谱是放大的自发发射谱(即 ASE 谱),此时 SOA 就成为一个半导体非相干光源. 鉴于 SOA 腔面抗反膜对 ASE 谱性能具有较大的影响,本文在对 SOA 的输出 ASE 谱进行实验和理论研究之后,进一步分析了 SOA 端面反射率对 ASE 谱的谱宽以及平坦度的影响;在此基础上,对抗反膜进行了优化设计,以帮助 SOA 光源实现输出光谱的宽带和平坦化.

## 2 SOA 输出 ASE 谱的理论和实验

设 SOA 两个腔面的反射率分别为  $R_1(\lambda)$  和  $R_2(\lambda)$ ,  $\lambda$  代表光波长. 正向波和反向波的光子数密度分别是  $S^+(\lambda, z)$  和  $S^-(\lambda, z)$ . 考虑到载流子沿腔长方向的不均匀分布,采用分段模型,将腔长为  $L$  的 SOA 沿腔长方向(沿着  $z$  轴)分为多个小节,设第  $i$

节的载流子浓度为  $N_i$ ,则在第  $i$  段的载流子速率方程和光传输方程分别如下<sup>[2]</sup>:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{J}{ed} - (AN_i + BN_i^2 + CN_i^3) - R_{sp,i} \quad (1)$$

$$\frac{\partial S^+(\lambda, z)}{\partial z} = (g(\lambda, z) - \gamma) S^+(\lambda, z) + \frac{BN_i^2}{V_g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial S^-(\lambda, z)}{\partial z} = - (g(\lambda, z) - \gamma) S^-(\lambda, z) - \frac{BN_i^2}{V_g} \quad (3)$$

其中  $J, e, d$  和  $V_g$  分别为电流密度,电子电量,有源区厚度和群速度;  $A, B$  和  $C$  为复合常数;  $g, \gamma$  和  $\gamma$  分别是材料增益,光限制因子,内部损耗和自发发射因子;  $R_{sp,i}$  是放大的自发发射<sup>[2]</sup>:

$$R_{sp,i} = \frac{c}{n_0} g(\lambda, z) [S^+(\lambda, z) + S^-(\lambda, z)] d \quad (4)$$

材料增益  $g$  与波长  $\lambda$  和载流子浓度  $N$  之间的关系如下<sup>[3,4]</sup>:

$$g(\lambda) = a_1 \lg \frac{AN + BN^2 + CN^3}{AN_0 + BN_0^2 + CN_0^3} - a_2 (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (5)$$

$$\lambda_p = \lambda_0 - a_3 (N - N_0) \quad (6)$$

其中  $a_1, a_2$  和  $a_3$  是增益系数;  $\lambda_0$  是在透明载流子浓度  $N_0$  时的峰值增益波长.

正向波和反向波之间满足边界条件:

$$\begin{aligned} S^+(\lambda, 0) &= R_1(\lambda) S^-(\lambda, 0) \\ S^-(\lambda, L) &= R_2(\lambda) S^+(\lambda, L) \end{aligned} \quad (7)$$

\*国家自然科学基金资助项目(批准号:60577007,60407001)

<sup>†</sup>通信作者. Email: hlr5649@163.com

2006-01-04 收到,2006-02-22 定稿

计算中的一些典型参数取值如下:有源区长度  $500\mu\text{m}$ ,宽度  $2\mu\text{m}$ ,厚度  $0.2\mu\text{m}$ .  $N_0 = 1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ;  $\alpha = 1.605\mu\text{m}$ ;  $A = 1 \times 10^{-8} / \text{s}$ ;  $B = 2.5 \times 10^{-17} \text{ m}^3 / \text{s}$ ;  $C = 9.4 \times 10^{-41} \text{ m}^6 / \text{s}$ ;  $\gamma = 100\text{cm}^{-1}$ ;  $V_g = 7.5 \times 10^7 \text{ m} / \text{s}$ ;  $\beta = 1 \times 10^{-4}$ ;  $\beta = 0.25$ .

实验中采用的 SOA,其有源区采用混合应变多量子阱,以达到增益对偏振的低灵敏要求.当电流为  $230\text{mA}$  时,其小信号增益峰值波长位于  $1555\text{nm}$ .实验中,在 SOA 加以正向偏置电流且无外部光信号输入的条件下,将其输出光接至 Agilent 86140B 型光谱仪就可以测量 SOA 的输出 ASE 谱.如果在 SOA 与光谱仪之间再加上一个起偏器,调节起偏器的透偏方向,则可以得到 TE 偏振分量和 TM 偏振分量的 ASE 谱.图 1 是电流为  $250\text{mA}$  时,SOA 偏振相关的 ASE 谱,上面的曲线代表 TE 偏振分量的 ASE 谱;下面的曲线代表 TM 偏振分量的 ASE 谱.可以看出,TE 偏振光成分与 TM 偏振光成分的 ASE 谱光功率相差较小,在整个光谱范围都小于  $1.4\text{dB}$ ,所以,可以认为 SOA 的 ASE 谱达到了较好的偏振无关.

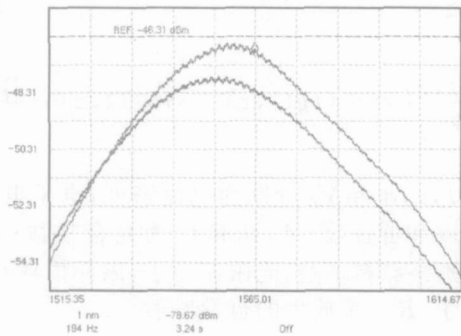


图 1 电流为  $250\text{mA}$  时,SOA 中 TE 偏振分量的 ASE 输出光谱(上面的曲线)和 TM 偏振分量的 ASE 输出光谱(下面的曲线)

Fig.1 TE polarization and TM polarization of output ASE spectrum when the SOA was biased at  $250\text{mA}$

图 2 和图 3 分别是 SOA 在不同偏置电流下,其输出 ASE 谱的实验测试结果和理论模拟结果,由下向上的曲线依次表示偏置电流分别为  $150, 170, 190, 210, 230$  和  $250\text{mA}$  时的情况.图 4 则是 ASE 谱的峰值光功率波长及其对应的峰值光功率随电流的变化关系.可以看到,当电流增大时,峰值功率增大,ASE 谱的宽度也增加,而且峰值波长变小,这是注入载流子浓度增加和能带填充效应导致的结果.由图 2~4 可以看出,理论模拟与实验测试结果符合得很好.这说明,采用上述理论模型,可以很好地对 SOA 的 ASE 谱进行模拟分析.

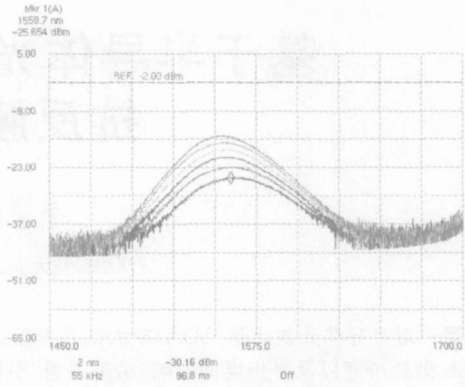


图 2 实验测量的 SOA 输出光谱 由下向上分别对应电流从  $150\text{mA}$  增加到  $250\text{mA}$  的情况

Fig.2 Measured output spectra when the SOA was biased from  $150$  to  $250\text{mA}$  (from bottom to top)

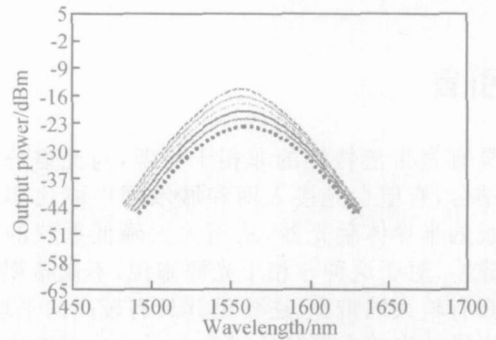


图 3 模拟计算出的 SOA 在不同电流下的输出光谱

Fig.3 Simulated output spectra when the SOA was biased from  $150$  to  $250\text{mA}$  (from bottom to top)

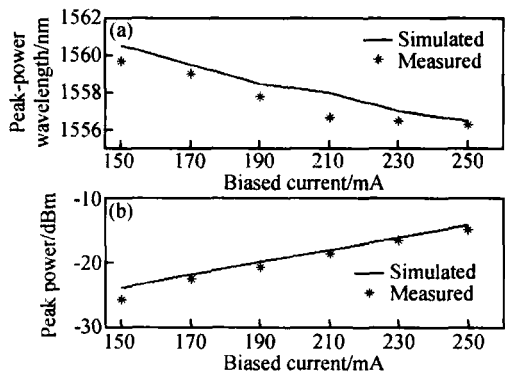


图 4 SOA 峰值光功率波长(a)与峰值功率(b)的理论和实验结果

Fig.4 Measured and simulated peak-power wavelength (a) and the peak power (b) at different biased currents

### 3 SOA 端面反射率对输出光谱的带宽和平坦度的影响

SOA 的端面反射率可以影响其多种性能,比如

饱和输出光功率、噪声指数、增益大小甚至增益的偏振相关性<sup>[5]</sup>。下面我们采用前面所述的理论模型,考察 SOA 的腔面反射率对其 ASE 输出光谱的谱宽和平坦度影响。在模拟计算中,除了抗反膜的参数之外,SOA 的结构参数和其他内部参数都与图 3 和 4 中模拟计算时的数值取得一样。当载流子浓度为  $3.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,SOA 的材料增益谱如图 5(a) 所示,其峰值增益波长为 1561nm;对这个 SOA 进行两种不同的抗反膜设计,分别对应抗反膜 1 和抗反膜 2 的情况。两种抗反膜的最小反射率相同,均为  $1 \times 10^{-4}$ ,但是它们的谷值波长(即最小反射率对应的波长)不一样,抗反膜 1 的谷值波长在 1559nm 处,接近材料增益谱的峰值波长;抗反膜 2 的谷值波长在 1547nm 处,与材料增益谱的峰值波长偏离较远。图 5(b)为这两种不同端面抗反膜的反射谱。

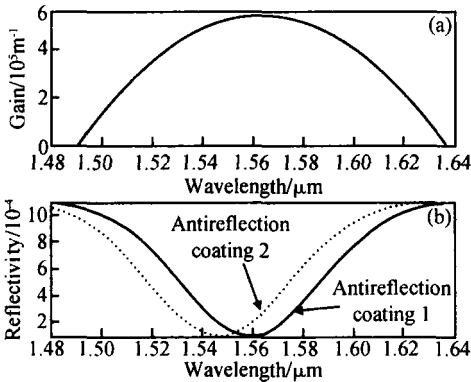


图 5 SOA 的材料增益谱(a)以及两种不同的端面抗反膜的反射谱(b)  
Fig.5 Material gain spectrum of the SOA (a) and the reflectivity spectrum of two different antireflection coatings (b)

图 6 是分别在抗反膜 1 和抗反膜 2 的情况下,SOA 在不同电流时的输出光谱情况。由下到上的曲线依次代表了电流从 150 到 200mA 的情况(每次增加 5mA)。在图 6 中,图(a)对应抗反膜 1 的输出光谱情况,图(b)则表示抗反膜 2 的情况。可以看出,抗反膜 1 的输出光谱比抗反膜 2 的输出光谱要宽广平坦得多。

为了更好地描述 ASE 输出光谱的平坦度,我们不采用通常所用的 3dB 带宽(即光功率下降到 50% 最大功率时对应的两波长间隔),而是引入 90% 带宽(即,光功率下降到 90% 最大功率时对应的两波长间隔),它比 3dB 带宽能够更好地将光谱的宽带和平坦性质同时反映出来。在两种不同的端面抗反膜 1 和 2 的情况下,SOA 输出 ASE 谱的 90% 带宽随电流的变化关系如图 7 所示。

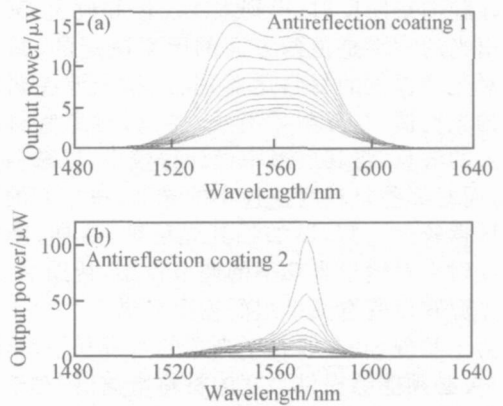


图 6 两种抗反膜情况下,SOA 在不同电流时的输出光谱情况  
电流从 150mA 增加到 200mA(间隔 5mA).  
Fig.6 Output ASE spectra when the SOA was biased from 150mA to 200mA with interval of 5mA

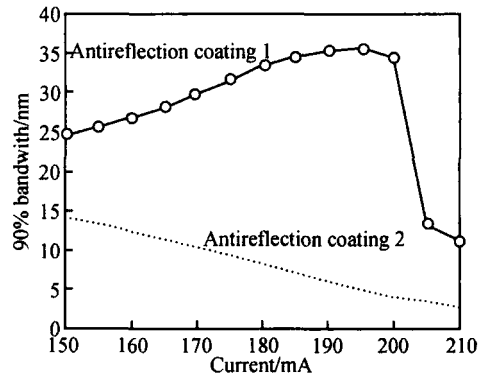


图 7 两种抗反膜情况下,ASE 谱在不同电流下的 90% 带宽  
Fig.7 90% bandwidth of ASE spectrum varying with the biased current of SOA for the two antireflection coatings

可以看到,抗反膜 1 的 90% 带宽比抗反膜 2 的 90% 带宽要大得多。当电流大于 200mA 时,抗反膜 1 的 90% 带宽急剧下降,这是由于材料增益峰值波长发生了较大的蓝移,导致抗反膜 1 的谷值波长与材料增益峰值波长的差别也变得较大。但是,即便如此,对于抗反膜 1 的情况,SOA 在 170 ~ 200mA 的较宽电流范围内,其输出 ASE 谱的 90% 带宽都在 30nm 以上,表明输出光谱的宽带和平坦性质一直较好。由此可见,反射谱分布对 ASE 谱的宽带特性影响非常大,如果抗反膜设计不合理的话,带宽将急剧减小;反之,优化设计的抗反膜,则有助于实现输出光源的宽带和平坦化。

#### 4 抗反膜优化设计实现 SOA 输出光谱的宽带和平坦化

优化设计的原理如下:SOA 的腔面反射率使得

光子在腔内来回反射,得到多次反馈和放大.某一波长输出光的功率是由两方面的因素决定的,其一是器件对光波提供的材料增益;其二是光波在两腔面获得的光反馈,与反射率有关.所以,对那些材料增益较大的波长,将其反射率设计得较小,以减弱其光反馈;而对那些材料增益较小的光波,将它们反射率设计得较大一些,以加强其光反馈;这样,就可以借助反射率对输出光功率的调节作用,帮助 SOA 非相干光源获得既宽又平坦的输出光谱.

为了实现 SOA 非相干光源的宽带和平坦化,首先 SOA 必须能够提供很宽的材料增益谱.对于一般的 SOA,其增益谱宽不是很宽,3dB 带宽一般在 30~60nm 之间.采用不对称多量子阱有源区可以使器件具有很宽的材料增益谱<sup>[6]</sup>,从而为实现 SOA 宽带光源提供基础.目前,采用不对称多量子阱作为有源区的超辐射二极管和半导体光放大器,其增益谱宽度已经达到了 285nm(覆盖了 1300~1585nm 的波段范围)<sup>[7]</sup>.因此,在采用不对称多量子阱有源区的基础上,结合抗反膜的优化设计,借助反射谱对光功率的调节作用,就可以使 SOA 获得既宽又平坦的 ASE 输出光谱.我们考虑一个具有很宽材料增益谱的 SOA,当载流子浓度为  $3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$  时,其材料增益谱如图 8(a) 所示,90% 带宽高达 73nm,峰值增益波长位于 1552nm.对其腔面抗反膜进行优化设计,优化设计的反射率分布如图 8(b) 所示,反射谱带宽为 85nm,谷值波长对应 1553nm.

当 SOA 电流为 190mA 时,输出的 ASE 光谱分布如图 8(c) 所示,其带宽和平坦度都很好,90% 带宽超过了 53nm.如果将其他参数保持不变,而只是将抗反膜的谷值波长改为 1563nm,则 SOA 输出光谱的带宽和平坦度都将减小,90% 带宽将不足 16nm.这表明即使 SOA 本身具备了很宽的材料增益谱,但是不合适的端面反射谱分布也会使发射光谱变窄.

当电流太大时,一般的 SOA 会很快在增益峰值波长附近发生激射,从而限制了其 ASE 谱输出光功率的提高.但是,如果采用本文所述的优化设计抗反膜方法,由于抗反膜的谷值波长与材料增益峰值波长接近,它可以有效地抑制 SOA 过早出现激射,因此驱动电流有望进一步加大,使自发辐射光子的单程增益得到提高,从而获得更大的 ASE 谱输出光功率.关于这方面的研究,我们将作进一步的研究.

## 5 总结

本文对 SOA 输出 ASE 谱的基本性能进行了实验和理论研究,理论研究结果和实验结果吻合得很好. SOA 腔面反射率对 ASE 输出光谱的谱宽和平

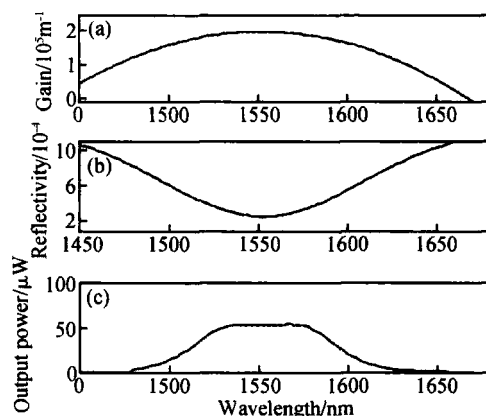


图 8 SOA 提供的宽带材料增益谱(a),优化设计的端面反射谱(b)和电流为 190mA 时的 ASE 输出光谱(c)

Fig. 8 Broad material gain spectrum of SOA (a), the reflectivity spectrum of optimal antireflection coating (b), and the output ASE spectrum when the SOA is biased at 190mA (c)

坦度具有较大的影响,如果抗反膜设计不合理,那么即使 SOA 本身可以提供很宽的材料增益谱,其输出光谱也将很窄.如果采用具有宽带材料增益谱的有源区,结合抗反膜的优化设计,借助于反射谱对输出光功率的调节作用,则可以实现 ASE 谱的宽带和平坦化.

## 参考文献

- [1] Huang Lirong, Huang Dexiu, Miao Qingyuan. Wavelength conversion based on cross polarization modulation in semiconductor optical amplifiers. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 882 (in Chinese) [黄黎蓉, 黄德修, 缪庆元. 基于半导体光放大器交叉偏振调制的波长转换分析. 半导体学报, 2003, 24(8): 882]
- [2] Du Guotong, Xu Chengdong, Liu Yang, et al. High-power integrated superluminescent light source. IEEE J Quantum Electron, 2003, 39(1): 149
- [3] Annetts P J, Asghari M, White I H. The effect of carrier transport on the dynamic performance of gain-saturation wavelength conversion in MQW semiconductor optical amplifiers. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1997, 3(2): 320
- [4] Reagle A, Di Carlo A, Lugli P, et al. Study of gain compression mechanisms in multiple quantum-well  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  semiconductor optical amplifier. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(11): 1697
- [5] Huang Lirong, Li Hanhui, Hu Zhenhua, et al. Theoretical study on polarization insensitivity improvement of semiconductor optical amplifiers by antireflection coating designing. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(7): 633 (in Chinese) [黄黎蓉, 李含辉, 胡振华, 等. 抗反膜设计改善半导体光放大器偏振不灵敏性的理论研究. 中国激光, 2003, 30(7): 633]
- [6] Lin C F, Wu B R, Lai H L W, et al. Sequence influence of non-identical  $\text{InGaAsP}$  quantum wells on broadband characteristics of semiconductor optical amplifiers-superluminescent diodes. Opt Lett, 2001, 26(14): 1099
- [7] Wu B R, Lin C F, Lai H L W, et al. Extremely broadband In-

GaAsP/ InP superluminescent diodes. Electron Lett ,2000 ,36

(25) :2093

## Optimal Design of Antireflection Coating for Flat and Wideband Incoherent Optical Sources Based on a Semiconductor Optical Amplifier \*

Huang Lirong<sup>†</sup>, Huang Dexiu, and Zhang Xinliang

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract :** The output amplified spontaneous emission (ASE) spectrum from a semiconductor optical amplifier (SOA) is studied theoretically and experimentally. The effect of facet reflectivity on the bandwidth and flatness of the ASE spectrum is investigated, and it is found that an improper antireflection coating narrows the bandwidth of the ASE spectrum. For an SOA with an active region with a wide material gain spectrum, an optimal antireflection coating helps to realize an SOA-based incoherent optical source with a high bandwidth and good flatness.

**Key words :** semiconductor optical amplifier; incoherent optical source; bandwidth; flatness; antireflection coating

**PACC :** 4255 K; 4280 X; 4280 S

**Article ID :** 0253-4177(2006)08-1471-05

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60577007, 60407001)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: hlr5649@163.com

Received 4 January 2006, revised manuscript received 22 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics