

文章编号: 0258-7025(2003)07-0633-04

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

黄黎蓉¹, 李含辉², 胡振华¹, 黄永箴³, 黄德修¹

¹ 华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074

(² 武汉船舶通信研究所, 湖北 武汉 430079; ³ 中国科学院半导体所光电研发中心, 北京 100083)

摘要 通过理论分析和计算表明,适当地增加反射率,在同样的工作电流下,半导体光放大器(SOA)的增益将有所增大。合理地调节抗反膜的折射率和厚度,可以使 TM 模的反射率 R_{TM} 在一段波长范围内大于 TE 模的反射率 R_{TE} , 这样的反射率分布可以相对提高 TM 模的增益,在一定程度上改善 SOA 的偏振不灵敏性。通过抗反膜的设计来辅助解决偏振不灵敏的问题,可以使 SOA 在有源区和波导设计中获得更大的灵活性,更好地兼顾其他的性能要求。

关键词 薄膜物理学; 半导体光放大器; 偏振不灵敏; 抗反膜; 反射率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Theoretical Study on Polarization Insensitivity Improvement of Semiconductor Optical Amplifiers by Antireflection Coating Designing

HUANG Li-rong¹, LI Han-hui²,

HU Zhen-hua¹, HUANG Yong-zhen³, HUANG De-xiu¹

¹ Department of Opto-electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Wuhan Maritime Communications Research Institute, Wuhan, Hubei 430079, China

³ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract Theoretical analysis and calculations indicate that the gain of a semiconductor optical amplifier (SOA) will increase if reflectivity increases appropriately. By selecting appropriate refractive index and thickness of the antireflection film, the reflectivity of TM mode is larger than that of TE mode in a range of wavelength, such a reflectivity distribution can increase the gain of TM mode relatively, improve the polarization insensitivity of SOA and give SOA more flexibility in designing active region and waveguide to meet the requirements needed by other performances.

Key words thin film physics; semiconductor optical amplifier (SOA); polarization insensitivity; antireflection coating; reflectivity

1 引 言

近年来,由于半导体光放大器(SOA)在光通信

领域的重要作用而越来越受到重视。一个性能良好的 SOA 必须具备很低的端面反射率 R , 才能够保证它具有宽的增益带宽、低的增益起伏和低噪声指数,

收稿日期: 2002-03-22; **收到修改稿日期:** 2002-05-08

基金项目: 国家 973 项目资助课题(编号: G2000036605)和 863 计划资助课题(2002AA312130)。

作者简介: 黄黎蓉(1969—), 女, 华中科技大学光电子工程系博士生, 主要从事半导体激光器与放大器的研究。E-mail: hlr5649@sohu.com

一般要求 R 在 10^{-4} 或更低的量级^[1]。可以采用镀膜、斜腔结构、掩埋窗口等手段来降低反射率^[2]。SOA 还必须对入射光的偏振态不灵敏,即对 TE 模和 TM 模的增益之差小于 1 dB,因为在光纤通信中,入射光的偏振态是随机改变的。目前实现 SOA 偏振不灵敏最常用的方案是在有源区中引进张应变,使 TM 模的材料增益大于 TE 模的材料增益^[3]。

本文提出了一种新的方案,通过合理地设计 SOA 的抗反膜,使 TM 模的反射率 R_{TM} 大于 TE 模的反射率 R_{TE} ,可以提高 TM 模的增益,在一定程度上改善 SOA 的偏振不灵敏性。因为 SOA 除了要满足偏振不灵敏性这个基本要求之外,在不同的应用场合还必须满足别的性能要求。而仅仅通过在有源区中引进足够的张应变来达到偏振不灵敏性,这就有可能使得有源区的设计满足偏振不灵敏,却不能很好地满足甚至恶化别的性能指标。而通过设计合适的抗反膜来改善 SOA 的偏振不灵敏性,可以为 SOA 的有源区设计和波导设计提供更大的灵活性,更好地兼顾别的性能要求。

2 理论分析和计算结果

2.1 反射率的适当提高可以增加在同样工作电流下的光增益

由于在实际中理想的行波 SOA 是不可能实现的,SOA 的两个腔面总有残余的反射率存在,这使得光信号在腔内来回反射,得到的并不只是单程放大而是多次放大。因而可以推断,如果适当地提高反射率,有可能提高 SOA 的增益。下面用 SOA 的分段模型进行计算。设 SOA 两个端面的反射率相同,均为 R ,SOA 的长度为 L ,有源区厚度为 d ,宽度为 W ,入射光波长为 λ ,将 SOA 沿腔长分为 M 个小区,每个小区的长度为 h ,设第 i 个小区的正向光场和反向光场分别为 U_i, V_i ,光子数密度为 S_i ,载流子浓度为 n_i ,则根据 SOA 的传输矩阵理论^[4],在 SOA 腔内(不涉及两个端面, $i \neq 0, M+1$)有

$$\begin{bmatrix} U_i \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(\gamma_i h) & 0 \\ 0 & \exp(-\gamma_i h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{i+1} \\ V_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 γ_i 为复传播常数

$$\gamma_i = -g_i/2 + j \cdot 2\pi N_g/\lambda \quad (2)$$

N_g 为群折射率, j 为虚数单位。模式增益 $g_i = \Gamma g_{mi} - \alpha$,其中 Γ 为光限制因子, α 为吸收系数, g_{mi} 为材料增益

$$g_{mi} = a_1(n_i - n_0) - a_2(\lambda - \lambda_p)^2 + a_3(\lambda - \lambda_p)^3 \quad (3)$$

其中 a_1, a_2, a_3 为增益系数; λ_p 为峰值增益波长

$$\lambda_p = \lambda_0 + \kappa(n_i - n_0) \quad (4)$$

n_0 为透明载流子浓度, λ_0 和 κ 为常数。在 SOA 的入射端面有

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-R}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{R} \\ -\sqrt{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在 SOA 的出射端面有

$$\begin{bmatrix} U_{M+1} \\ V_{M+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-R}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{R} \\ \sqrt{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{M+2} \\ V_{M+2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

输出光功率为

$$P_{out} = |U_{M+2}|^2 Wd \quad (7)$$

入射光功率为

$$P_{in} = |U_0|^2 Wd \quad (8)$$

各小区的载流子速率方程为

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{J}{ed} - R_i - \frac{cg_i S_i}{N_g} \quad (9)$$

其中 J 为电流密度, e 为电子电荷, c 为真空中光速,载流子复合速率 $R_i = A \times n_i + B \times n_i^2 + C \times n_i^3$,其中 A, B, C 为复合系数。计算中有关参数取值如下: $d = 0.12 \mu\text{m}$, $W = 1.5 \mu\text{m}$, $L = 500 \mu\text{m}$, $A = 10^8/\text{s}$, $B = 10^{-16} \text{m}^3/\text{s}$, $C = 7.5 \times 10^{-41} \text{m}^6/\text{s}$, $a_1 = 4.63 \times 10^{-20} \text{m}^2$, $a_2 = 0.15 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$, $a_3 = 3.155 \times 10^{25} \text{m}^{-4}$, $N_g = 3.5$, $n_0 = 1.1 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$, $\alpha = 5000 \text{m}^{-1}$, $\kappa = -2.7 \times 10^{-32} \text{m}^4$, $\lambda_0 = 1.605 \mu\text{m}$ 。取波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,对 TE 模的增益进行计算(光限制因子 $\Gamma_{TE} = 0.15$),图 1 为不同反射率下 ($R_1 > R_2$),其增益随电流的变化关系,可以看出,如果适当地增大 R ,在同样的电流(不超过阈值电流)下,光增益要有所增大。由此可推测,如果在镀膜抗反膜时,使 SOA 在一个波段范围内满足 TM 模的反射率 R_{TM} 大于 TE 模的反射率 R_{TE} ,则可以相对提高 TM 模的增益,有助于改善 SOA 的偏振不灵敏性。下面

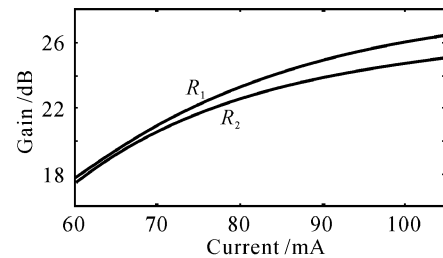


图 1 不同反射率下的增益

Fig. 1 Gain versus current at different reflectivity

$$(R_1 = 5.5 \times 10^{-4}, R_2 = 1.0 \times 10^{-4})$$

以单层抗反膜为例来说明。

2.2 适当的抗反膜分布对 SOA 偏振不灵敏的改善

设单层抗反膜的折射率为 n_f , 厚度为 d_f 。SOA 有源区厚度为 d , 折射率为 n_a , 波矢为 k_a ; 限制层的折射率为 n_c , 波矢为 k_c , 其厚度相对有源区厚度近似认为是无穷大(如图 2 选取坐标)。则在 SOA 腔

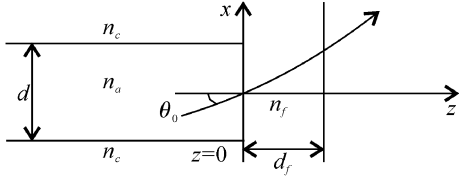


图 2 SOA 单层抗反膜示意图

Fig. 2 Diagram of a single AR-coated SOA

与抗反膜边界处 ($z = 0$), 可由波导理论, 得到 TE 模和 TM 模的入射光场分布 $\Phi_{\text{inc}}(x)$

$$\Phi_{\text{inc}}(x) = \begin{cases} A \cos(dh_a/2) \exp[h_c(d/2 - x)] & x \geq d/2 \\ A \cos(h_a x) & -d/2 \leq x \leq d/2 \\ A \cos(dh_a/2) \exp[h_c(d/2 + x)] & x \leq -d/2 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $h_a^2 = k_a^2 - \beta^2$, $h_c^2 = \beta^2 - k_c^2$, A 为常数, β 为纵向传播常数, 对 TE 模和 TM 模, 分别由它们的特征方程求解。采用角谱分析法^[1,5], 将从 SOA 腔到抗反膜的入射光场展开为具有不同入射角 θ_0 的平面波, 则入射场在有源层和限制层的平面波角谱分布为

$$F_{\text{inc-a}}(s) = 2 \int_0^{d/2} \Phi_{\text{inc}}(x) \exp(jk_a s x) dx \quad (11)$$

$$F_{\text{inc-c}}(s) = 2 \int_{d/2}^{\infty} \Phi_{\text{inc}}(x) \exp(jk_c s x) dx \quad (12)$$

式中 $s = \sin\theta_0$, 则反射场的平面波角谱分布为

$$F_{\text{ref}}(s) = -[r_a(s)F_{\text{inc-a}}(s) + r_c(s)F_{\text{inc-c}}(s)] \quad (13)$$

$r_a(s)$, $r_c(s)$ 对应有源层和限制层光场的菲涅耳反射系数, 可由薄膜反射公式得到^[6]。由 $F_{\text{ref}}(s)$ 作反傅里叶变换得到反射场分布 $\Phi_{\text{ref}}(x)$, 则反射率 R 由下式求出

$$R = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\text{ref}}(x) \Phi_{\text{inc}}(x) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\text{inc}}^2(x) dx \right|^2} \quad (14)$$

取 $n_a = 3.512$, $n_c = 3.17$, $d = 0.12 \mu\text{m}$, $n_f = 1.7971$, $d_f = 0.216 \mu\text{m}$ 时, 计算得到 R_{TE} 和 R_{TM} 随

波长的分布如图 3 所示, 此时在一个较大的波段范围内 ($1.49 \sim 1.53 \mu\text{m}$), R_{TM} 大于 R_{TE} , 且二者均没有超出 10^{-4} 的量级。

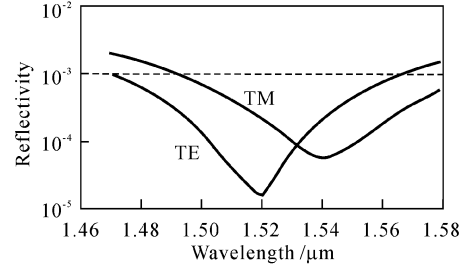


图 3 TE 模和 TM 模的反射率分布

Fig. 3 Reflectivity distribution for TE mode and TM mode

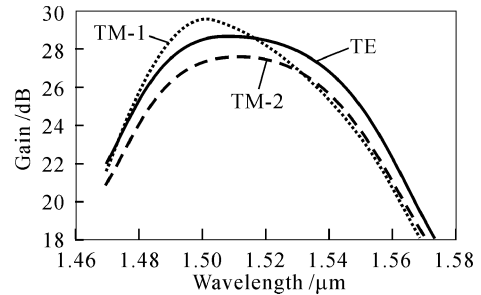


图 4 TE 模和 TM 模的增益分布

Fig. 4 Gain distribution for TE mode and TM mode

对图 3 所示的反射率分布代入(5)和(6)式由传输矩阵法计算 TE 模的增益 G_{TE} 和 TM 模的增益 G_{TM} , 结果见图 4 中的曲线 TE 和 TM-1, 其中取电流 $I = 110 \text{ mA}$, 光限制因子 $\Gamma_{\text{TE}} = 0.12$, $\Gamma_{\text{TM}} = 0.10$, TM 模的材料增益取为 1.08 倍 g_{mi} (对应有源区为张应变的简化情况)。为了对比, 同时计算了 TM 模取反射率 $R_{\text{TM}} = R_{\text{TE}}$ 时的增益(对应曲线 TM-2)。在图 4 中可以看到, 在 $1.49 \sim 1.52 \mu\text{m}$ 波段范围内, 由于 TM-1 曲线对应的反射率要大于 TM-2 曲线对应的反射率, 故其增益要大一些。一方面由于 R_{TM} 大于 R_{TE} , 另一方面由于张应变的存在, 二者的共同作用使得在此波段范围内, TM-1 曲线在曲线 TE 之上, 而在其他波段范围内, 则 TE 模的增益要大于 TM 模的增益。可见适当地将 TM 模的反射率提高, 可以提高其增益, 对 SOA 实现偏振不灵敏可以起到一定的辅助作用。

3 结论

用 SOA 的分段模型计算结果表明, 当反射率

在一定范围内增加时(在 10^{-4} 量级以内),在同样的工作电流下(不使 SOA 发生激射为限),SOA 的增益将有所增大。利用角谱分析法对单层抗反膜的 R_{TE} 和 R_{TM} 的计算表明,合理地调节抗反膜的折射率和厚度,可以使 TM 模的反射率 R_{TM} 在一段波长范围内大于 TE 模的反射率 R_{TE} ,这样的反射率分布可以相对提高 TM 模的增益,从而在一定程度上改善 SOA 的偏振不灵敏性。通过抗反膜的设计来辅助解决偏振不灵敏的问题,可以更灵活地进行有源区和波导设计,使 SOA 在不同场合应用时,能更好地兼顾其他的性能要求。

参 考 文 献

- 1 Lennart Atterhäls, Lars Thylén. Single-layer antireflection coating of semiconductor lasers: polarization properties and the influence of the laser structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(2):426~430
- 2 C. E. Zah, C. Caneau, F. K. Shokoohi *et al.*. 1.3 μm GaInAsP near-traveling-wave laser amplifiers made by combination of angled facets and antireflection coatings [J]. *Electron. Lett.*, 1988, 24(20):1275~1276
- 3 Katsuaki Magari, Minoru Okamoto, Yasuhiro Suzuki *et al.*. Polarization-insensitive optical amplifier with tensile-strained-barrier MQW structure [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, 30(3):695~702
- 4 C. Y. J. Chu, H. Ghafouri-Shiraz. Analysis of gain and saturation characteristics of a semiconductor laser optical amplifier using transfer matrices [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(8):1378~1385
- 5 T. Saitoh, T. Mukai. Theoretical analysis and fabrication of antireflection coatings on laser-diode facets [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, 3(2):288~292
- 6 M. Born, E. Wolf. Principle of Optics [M]. 5th Ed.. New York: Pergamon, 1975. 55~62



应用光学国家重点实验室

应用光学国家重点实验室始建于 1987 年,依托单位是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所。1990 年通过国家计委组织的验收,正式作为国家重点实验室运行。现任室主任为曹健林研究员,学术委员会主任是姜文汉院士。

当前的主要学科方向为:短波光学、空间光学、微光机电系统、衍射光学与集成光学、光学超精加工、光谱技术与颜色光学、交叉学科,还组建了技术支撑组,负责大型仪器设备的运行和管理,承担检测任务和仪器设备的升级改造工作,为各学科方向研究工作提供技术支撑。

应用光学国家重点实验室自建室以来,先后承担了国家自然科学基金课题(包括国家基金重点课题和杰出青年基金课题),863 课题,973 课题,国家攻关课题,国家重点光学工程项目和各部委下达的各种研究任务多项。共获得部委以上级别的奖励 30 项,其中包括国家科技进步奖 4 项,国家技术发明奖 3 项。

短波光学研究工作不断发展。在光源、辐射计量、关键元器件研制、成像光学系统和系统集成应用等方面完成了一系列开拓性工作,曾获国家科技进步二等奖和中国科学院科技进步奖励多次。

在空间光学研究方面,在国内率先开展了高分辨率成像光谱仪器、太阳辐照监测仪器等多项研究,

同时进行了空间遥感成像仿真技术的研究。研制成功的 863 军民两用高分辨率成像光谱仪原型样机获中国科学院科技进步二等奖,为进一步研制星载高分辨率成像光谱仪工程样机奠定了坚实的基础;研制成功的太阳紫外监视器和太阳常数监测器已经搭载神州飞船,成功地进行了太阳辐射监测,正在进行风云三号卫星太阳紫外监视器和太阳辐照度监测仪的研制工作;研制成功的多套遥感成像仿真系统在目标遥感观测、遥感器研制以及遥感平台验证方面发挥了重要的作用。

在微光机电系统研究、衍射光学和集成光学研究方面,也取得了多项突破性进展。研制出了国内第一台直径 3 mm 的压电微电机和非接触式微扭矩测试仪,目前正在进行微构件摩擦力测试仪、电磁驱动平面硅基微电机和微型光谱仪研制工作。研制成功国内首台大口径、高精度激光直写设备,可在口径 400 mm 的曲面上进行激光直写,主要性能指标达国际领先水平。

目前,应用光学国家重点实验室设有光学、光学工程、机械制造及其自动化、计算机应用技术硕士点,光学、机械制造博士点,物理学博士后流动站。形成了初具规模的高级光学研究人才培养基地,许多人才已成为大学、研究所和大企业在相关领域的学术带头人。