

缓变波导对半导体光放大器 TE₀ 和 TM₀ 模式增益差的影响

陈昌华 徐俊英 陈良惠 王启明

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 通过直接数值求解波导方程,研究了缓变波导对半导体光放大器模式增益差的影响。结果表明:缓变波导增大了光放大器的模式增益差,而通过引入非平面波导,可以降低甚至消除模式增益差。

EEACC: 4270, 4320J

1 引言

光纤通讯需要对偏振不敏感的半导体光放大器^[1~4],即要求光放大器 TE 与 TM 模式之间的增益尽可能小。影响 TE 与 TM 模式增益差的因数很多,比如材料本身不同偏振增益系数之间的差别、不同波导结构的影响等等。对体材料,不同偏振的增益系数是相同的,对量子阱材料可以通过不同应变来改善增益系数的偏振特性^[5~7]。那么在同样的材料增益系数下,是不是就一定能获得偏振不敏感的放大器呢?在量子阱激光器中广泛采用的缓变波导对放大器的偏振特性又有什么影响呢?我们的目的就想通过数值计算来说明这些问题。

2 基本理论

一般计算模式增益系数总是先求出实折射率波导的光限制因子再乘以有源材料的增益系数来获得。对 TE 模式,这是很好的近似,但对 TM 模式,却并不适用^[8],因此需要直接解复折射率导波方程。

考虑平板波导结构,设沿 z 方向传播的导波模式为 y 偏振,则对 TE 和 TM 模式,一维波动方程分别为:

$$\text{TE} (E_z = 0): \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + k_0^2 [n^2(x) - (\beta/k_0)^2] E_y = 0 \quad (1)$$

$$\text{TM} (H_z = 0): \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + k_0^2 [n^2(x) - (\beta/k_0)^2] H_y - \frac{1}{n^2(x)} \frac{\partial H_y}{\partial x} \frac{\partial n^2(x)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

陈昌华 男,1969 年出生,博士后,主要从事半导体量子阱光电子器件研究,现工作单位为北京工业大学电子工程系和北京市光电子技术实验室 100022

1997-09-12 收到,1998-03-02 定稿

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为自由空间波数; λ_0 为波长; $\beta = \beta_r + i\beta_i$ 为导波模式的复传播常数 半导体激光放大器的模式增益可通过导波模式的等效折射率 n_{eff} 来求得:

$$g_{\text{mod}} = 2k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) = 2\beta_i \tag{3}$$

这里我们采用复打靶法^[9]解方程(1)和(2), 进而求得模式增益 光放大器 TE 与 TM 模式之间的增益差定义为:

$$\delta G_{\text{mod}} = g_{\text{mod}}(\text{TE}) - g_{\text{mod}}(\text{TM}) \tag{4}$$

3 计算结果与讨论

考虑图 1 所示的基本波导结构, 它是一缓变折射率分别限制单量子阱 GaAs_s/AlGaAs 半导体激光放大器, 波长为 $0.85\mu\text{m}$. 其折射率分布为:

$$n^2(x) = \begin{cases} 1.0, & x < -h_c \text{ (空气)} \\ 3.2^2, & -h_c < x < 0 \text{ (覆盖层)} \\ 3.5^2 - \frac{3.5^2 - 3.2^2}{d_g^s} (d_g - x)^s, & 0 < x < d_g \text{ (导引层)} \\ (3.6 + i\frac{g}{2k_0})^2, & d_g < x < d_g + d_a \text{ (有源层)} \\ 3.5^2 - \frac{3.5^2 - 3.2^2}{d_g^s} (x - d_g - d_a)^s, & d_g + d_a < x < 2d_g + d_a \text{ (导引层)} \\ 3.2^2, & x > 2d_g + d_a \text{ (覆盖层)} \end{cases} \tag{5}$$

其中 d_g 和 d_a 分别为导引层和有源区厚度; h_c 为覆盖层厚度; g 为有源区材料增益系数; s 为缓变因子; $s = 1, 2$ 和 ∞ 分别对应线性、抛物型缓变和突变折射率分别限制结构波导 在下面的计算中, 除非特别说明, 有源区材料增益系数 g 取 500cm^{-1} , d_g 和 d_a 分别取为 $0.15\mu\text{m}$ 和 $0.01\mu\text{m}$. 为了简单起见, 我们只考虑了有源区的增益, 而没有考虑覆盖层和导引层的吸收, 但并不影响我们的定性结果 这里我们主要考虑以上四个参数对 TE₀ 和 TM₀ 模式增益差的影响

首先考虑有源区增益系数 g 对增益差的影响, 如图 2 所示 增益差与材料的增益系数成

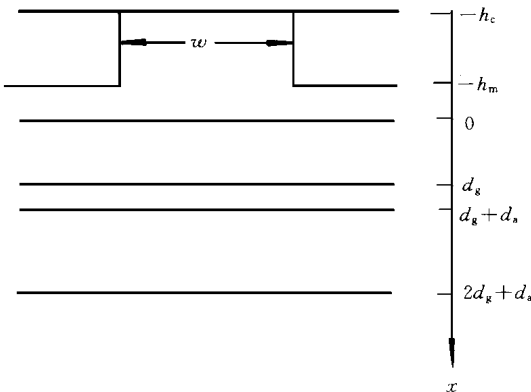


图 1 缓变波导结构示意图

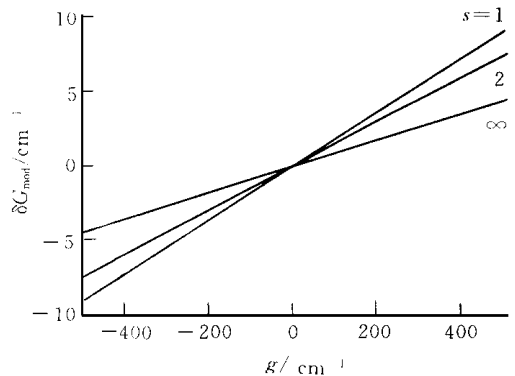


图 2 模式增益差随有源区材料增益系数的变化

正比的关系, 材料的增益系数越大, 增益差也越大, TE₀ 模的增益比 TM₀ 模的增益越大. 由于材料的增益系数是通过注入电流来改变的, 因此注入电流的波动, 将直接影响到放大器的偏振特性. 目前量子阱半导体激光器普遍采用缓变波导结构, 而由图 2, 在放大器中缓变波导结构不利于降低模式增益差, 而且与突变波导结构相比, 对偏振更为敏感, 尤其是线型缓变波导更为突出, 因此就降低偏振灵敏度而言, 量子阱激光放大器采用传统的突变折射率分别限制结构更为有利, 这明显有别于激光器, 而这一点到目前还很少引起人们的注意和重视. 在图 2 中, 我们还给出了增益为负即损耗时的情况, 此时 TM₀ 模的模式损耗比 TE₀ 模的模式损耗大. 注意到这一点能给我们有益的启示: 如果能够实现某种放大器与衰减器的交替组合, 使得放大器中的模式增益差通过衰减器得到消除, 则能够实现与偏振无关的放大器.

图 3 为模式增益差与缓变因子的关系, 可以看到模式增益差对缓变因子有一个极大值点, 图 3 再次表明缓变波导对降低放大器偏振灵敏度的不利影响.

图 4 为模式增益差与导引层厚度的关系. 模式增益差随导引层厚度的增加而减小, 其中缓变波导与突变波导相比, 下降要缓慢得多.

图 5 为模式增益差与有源区厚度的关系. 与导引层不同, 有源区厚度的增加导致模式增益差的增加. 与图 4 相同的是, 缓变波导对模式增益差的影响要强得多.

下面考虑非平面波导的影响, 以脊形波导为例. 如图 1 中虚线所示, 台宽 w 为 $3\mu\text{m}$, 高 $h_c - h_m$ 为 $1.2\mu\text{m}$, 其他参数与无脊形台面时相同. 由于非平面波导中不存在严格的 TE 和 TM 模式, 因而其等效折射率的计算不能简单地使用节 2 中的方法, 但对弱导引结构, 可以通过等效折射率近似^[10]化为节 2 中的形式, 得到近似的 TE 和 TM 模式解. 图 6 和图 7 为引入脊形波导后, 模式增益差与导引层厚度和有源区厚度的关系. 模式增益差随两者的变化不再是图 4 和图 5 中的单调函数, 有极值并可可为负, 在某些点为零. 在这些零点, 放大器对偏振不敏感. 因此采用非平面波导结构, 通过精心

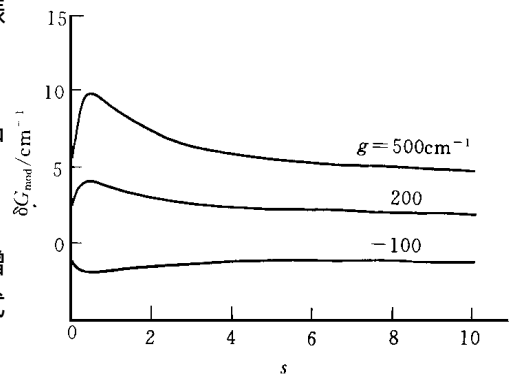


图 3 模式增益差随导引层缓变因子的变化

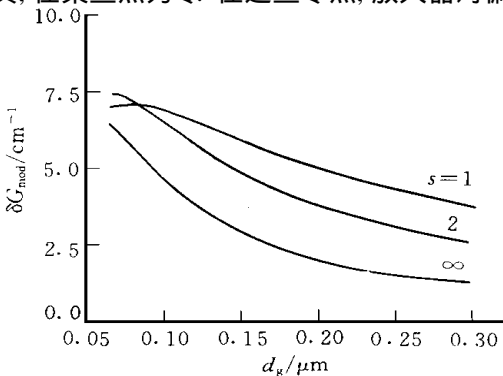


图 4 模式增益差随导引层厚度的变化

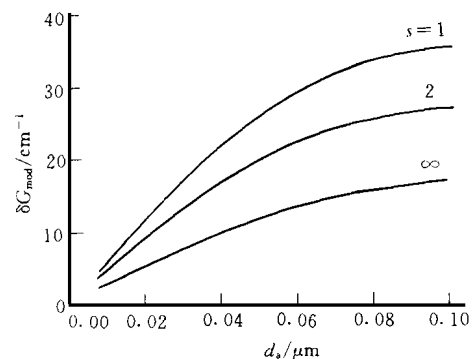


图 5 模式增益差随有源区厚度的变化

设计和优化波导结构,完全能够实现偏振不敏感的半导体激光放大器,这一点已被实验证实^[11, 12].

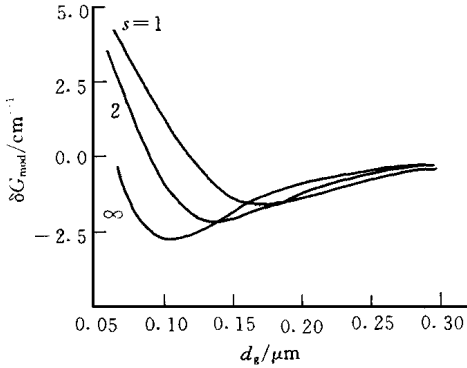


图 6 脊形波导结构模式增益差
随导引层厚度的变化

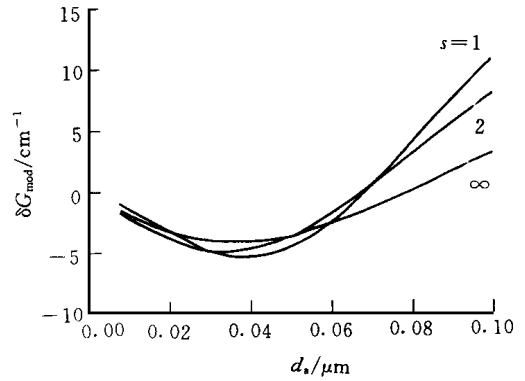


图 7 脊形波导结构模式增益差
随有源区厚度的变化

4 结论

从波动方程出发,我们通过数值计算研究了缓变波导结构对半导体激光放大器 TE 和 TM 模式增益差的影响,结果表明:缓变波导增大了光放大器的模式增益差,通过引入非平面波导,可以降低甚至消除模式增益差

参 考 文 献

- [1] B. Mersali, G. Gelly, A. Accard *et al*, *Electron Lett*, 1990, **26**: 124~125
- [2] S. Cole, D. M. Cooper, W. J. Devlin *et al*, *Electron Lett*, 1989, **25**: 314~315
- [3] T. Toyonaka, S. Tsuji, M. Haneda *et al*, *Electron Lett*, 1991, **27**: 941~942
- [4] S. Kitamura, K. Komatsu and M. Kitamura, *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, **7**: 147~149
- [5] K. Magari, M. Okamoto, H. Yasaka *et al*, *IEEE Photon Technol Lett*, 1990, **2**: 556~558
- [6] M. Joma, H. Horikawa, C. Q. Xu *et al*, *Appl Phys Lett*, 1993, **62**: 121~123
- [7] L. F. Tiemeijer, P. J. A. Thijs, T. van Dongen *et al*, *IEEE Photon Technol Lett*, 1994, **6**: 1430~1432
- [8] T. D. Visser, B. Dennenlaere, J. Haes *et al*, *J. Lightwave Technol*, 1996, **14**: 885~889
- [9] 陈昌华, 杨国文, 徐俊英, 等, *光学学报*, 1997, **17**: 630~634
- [10] J. Buus, *IEEE J. Quantum Electron*, 1982, **QE-18**: 1083~1088
- [11] C. Holtmann, P. A. Besse, T. Brenner *et al*, *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**: 343~345
- [12] C. Holtmann, P. A. Besse, T. Brenner *et al*, in *Proc Optical Amplifiers and Their Application*, 1993, paper SuB 2

Influence of Graded Index Waveguides on the Gain Difference Between TE_0 and TM_0 Modes of Semiconductor Optical Amplifiers

Chen Changhua, Xu Junying, Chen Lianhui, Wang Qing

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 12 September 1997, revised manuscript received 2 March 1998

Abstract Through a numerical method, we have studied the influence of graded index waveguides on the gain difference between TE_0 and TM_0 modes of semiconductor optical amplifiers. The results show that a graded index waveguide will increase the polarization sensitivity of modal gain while an unplanar waveguide can decrease it. A polarization-independent optical amplifier can be obtained by adopting an unplanar waveguide.

EEACC: 4270, 4320J