

半导体四层漏光波导的分析

张敬明 郑宝真

(中国科学院半导体研究所)

1982年12月29日收到

提 要

直接从四层平板漏光波导解麦克斯韦尔方程,推导了它的本征方程。用传播常数微扰技术推导了一个比 W. Streifer 等人的结果更精确的近似公式,并对计算结果出现的 Δn 的符号问题进行了讨论,得到判别出现正负值的条件。介绍了对 GaAs-AlGaAs 材料的一些计算结果,并与 W. Streifer 等人的近似作了比较。

一、引 言

对于光通讯和光讯息处理应用的集成光路,需要各种结构的低损耗光波导。在半导体激光器中,由于引入了光波导,大大地改善了激光器的性能,例如 DH 激光器的发展。特别是侧模稳定的 DH 激光器^[1,2,3],克服了质子轰击和电极条形 DH 激光器中,有源区 Al 分布不均匀和增益分布畸变造成的侧模不稳定^[4,5]。研究四层漏光波导的特性,是为了能够指导并应用于几种不同结构的半导体激光器中,以得到稳定的侧模。

我们直接从解四层平板漏光波导的麦克斯韦尔方程出发,推导了它的本征方程,并用微扰技术推得了一个新的近似公式。对半导体三元和四元系材料的各种衬底参数进行了数值计算。本文着重报道微扰技术的新近似结果,并对计算结果的 Δn 值的符号问题进行了讨论,得到判别出现正负值的条件。

二、四层光波导及理论分析

图1表示这里分析的四层漏光波导的结构。I、III区是波导芯 II 区的包层,折射率分别为 n_1, n_2, n_3 , 而 $n_2 > n_1$ (或 n_3), IV 区为衬底,具有复数折射率 $\tilde{n}_4 = n_4 - i \frac{\alpha_4}{2K}$ 。其中 K 为光在真空中的传播常数, α_4 为衬底材料的吸收系数, n_4 为衬底的折射率, d 和 l 分别为波导芯和下包层的厚度。

由于半导体激光器通常传播 TE 模,所以这里只分析 TE 模。TM 模的分析方法相同。设光波具有 $e^{i(\omega t - \beta x)}$ 的形式,写出一维波导方程为:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + (n_i^2 K^2 - \beta^2) \phi = 0 \quad (1)$$

对图1所示波导四个区解方程(1),磁场的纵向分量 H_z 为:

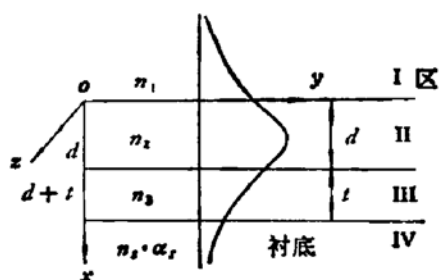


图1 四层漏光波导的剖面结构

$$H_x = \frac{i}{\omega \mu} \frac{\partial E_y}{\partial x}. \quad (2)$$

在 $x = 0, d, d+t$ 的三个边界处, 电场 E_y 和磁场 H_x 连续的条件得到电场和本征方程分别为

$$E_y = A_0 \begin{cases} (1+V)\exp(px) & x \leq 0 \\ (1+V) \left[\cos(hx) + \frac{p}{h} \sin(hx) \right] & 0 \leq x \leq d \\ V \exp[-q(x-d)] + E \exp[q(x-d)] & d \leq x \leq d+t \\ F \exp[-R(x-d-t)] & x \geq d+t \end{cases} \quad (3)$$

$$\tan(hd) = \frac{p+q+(p-q)V}{h-pq/h+(h+pq/h)V} \quad (4)$$

其中

$$[V = \frac{q-R}{q+R} \exp(-2qt)] \quad (5)$$

$p^2 = \beta^2 - n_1^2 K^2$, $h^2 = n_2^2 K^2 - \beta^2$, $q^2 = \beta^2 - n_3^2 K^2$, $R^2 = \beta^2 - \tilde{n}_4^2 K^2$, p, h, q 和 R 分别为横向传播常数. $V = \cos(hd) + \frac{p}{h} \sin(hd)$, $E = UV$,

$$F = \frac{2qU}{q+R} \exp(-qt),$$

A_0 为振幅系数. 很明显, 在三个边界上(3)式都满足连续性边界条件.

本征方程(4)和(5)式是一个复数超越方程, 直接进行求解是比较困难的. 为此将推导其近似解式, (4)(5)式当 $t \rightarrow \infty$ 时, $V \rightarrow 0$, (4)(5)式退化为(6)式

$$\tan(hd) = \frac{h(p+q)}{h^2 - pq}. \quad (6)$$

求解(6)式可以得到三层平板波导的传播常数 β_0 . 现在假定使 t 逐渐减小, 波导 III 区消失场的尾巴将进入衬底, 三层平板波导的传播常数发生微扰. 微扰后的传播常数为

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta. \quad (7)$$

使波导芯和下包层的纵向磁场 H_x 在 β_0 处展开成泰勒级数, 并使其在 $x=d$ 处连续. (H_x 方程在 $x=0$ 和 $x=d+t$ 处有明显的连续形式, 在 $x=d$ 处无明显的连续形式, 只要满足(4)(5)式, H_x 在 $x=d$ 处即连续.) 当 $\Delta\beta \ll \beta_0$ 时, 删除 $\Delta\beta$ 的高次项后得到

$$\Delta\beta = \frac{H_{z3}(\beta_0) - H_{z2}(\beta_0)}{\left[\frac{\partial H_{z2}(\beta)}{\partial \beta} - \frac{\partial H_{z3}(\beta)}{\partial \beta} \right]_{\beta=\beta_0}} \quad (8)$$

$H_{z2}(\beta)$ 和 $H_{z3}(\beta)$ 对 β 微商, 代入(8)式, 省去下标最后求得

$$\Delta\beta = 2/\beta \left[\left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{q^2} \right) \left(1 + \frac{q}{p} + qd \right) V^{-1} - \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{q^2} \right) \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{q}{p} + qd \right) - \frac{2}{q^2} \left(1 - 2qt - \frac{2q}{R} \right) \right] \quad (9)$$

方程(9)右边的所有量由解三层平板波导的本征方程(6)式的 β 值得到。由于 $\Delta\beta$ 是一个复数, 它表示三层平板波导与四层漏平板波导复传播常数之差。用有效折射率差和有效损耗差表示:

$$\Delta n = \text{Re}(\Delta\beta/K) \quad (10)$$

$$\Delta\alpha = -2\text{Im}(\Delta\beta) \quad (11)$$

上述分析结果直接从解四层光波导的麦克斯韦尔方程出发, 由于 E_z 的方程(3)在任何 β 值都满足连续要求, 所以无需对电场作微扰处理(从三层平板波导的场求四层漏波导的场)。这是我们与 W. Streifer 等人^[6]分析的主要不同点。因此得到的结果也不同。

三、数值计算结果和讨论

从第二节的理论分析结果, 我们先对对称三层平板波导用计算机进行了数值计算。求得有效折射率 $n_{\text{eff}} (= \beta/K)$ 和横向传播常数 $q (= p)$, h 和 R 随 d 的变化。以 GaAs-AlGaAs 材料为例表示在图 2 中。可以得到三层平板波导横模截止的条件

$$d \sqrt{n_2^2 - n_1^2} < \frac{\lambda}{2} N \quad (12)$$

其中 $N = 0, 1, 2, \dots$ 为横模阶数。对于图 2(a) 中的参数, 最大的基横模波导芯厚 $d_{0\text{max}} = 0.358 \mu\text{m}$ 。把图 2 的结果代入(9)、(10)和(11)得到 Δn 和 $\Delta\alpha$ 随 d 的变化(i 为参变数)。作为一个例子, 图 3 画出衬底参数是 $n_s = 3.63$, $\alpha_s = 10000 \text{cm}^{-1}$ 的计算结果。W. Streifer 等人^[6]曾推导了一个近似公式, 即文献[6]的(9)和(10)式, 后来 T. Kuroda 等人^[7]计算时表示为文献(7)的(7)式。为了比较, 我们把他们的公式简写成

$$\Delta\beta = 2/\beta \left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{q^2} \right) \left(1 + \frac{q}{p} + qd \right) V^{-1} \quad (13)$$

图 3 中也画出了(13)式的计算结果。由(9)和(13)式计算的结果代回本征方程(4)和(5), 表明(9)式比(13)式更接近(4)和(5)式的解。这说明(9)式的结果比(13)式的精确。图 3 中可以看到, 在(9)式适用的范围, 当 $d = 0.1 \mu\text{m}$, 对于 $i = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35 \mu\text{m}$ 时, 两式计算结果差的相对百分数分别为 40、20、16、4。对于 $\tilde{n}_s = 3.55 - i0.00676$ 的衬底参数, 在图 4 中更明显地表明, 在 Δn 变号的 d 值附近, 两个公式计算的结果差别更大。计算结果还表明 Δn 的值可负可正, 是分别表示比三层平板波导的有效折射率低或高。对于较低折射率的衬底, 在较小的 d 值下就出现正 Δn 值。其有效值也相当大。图 4

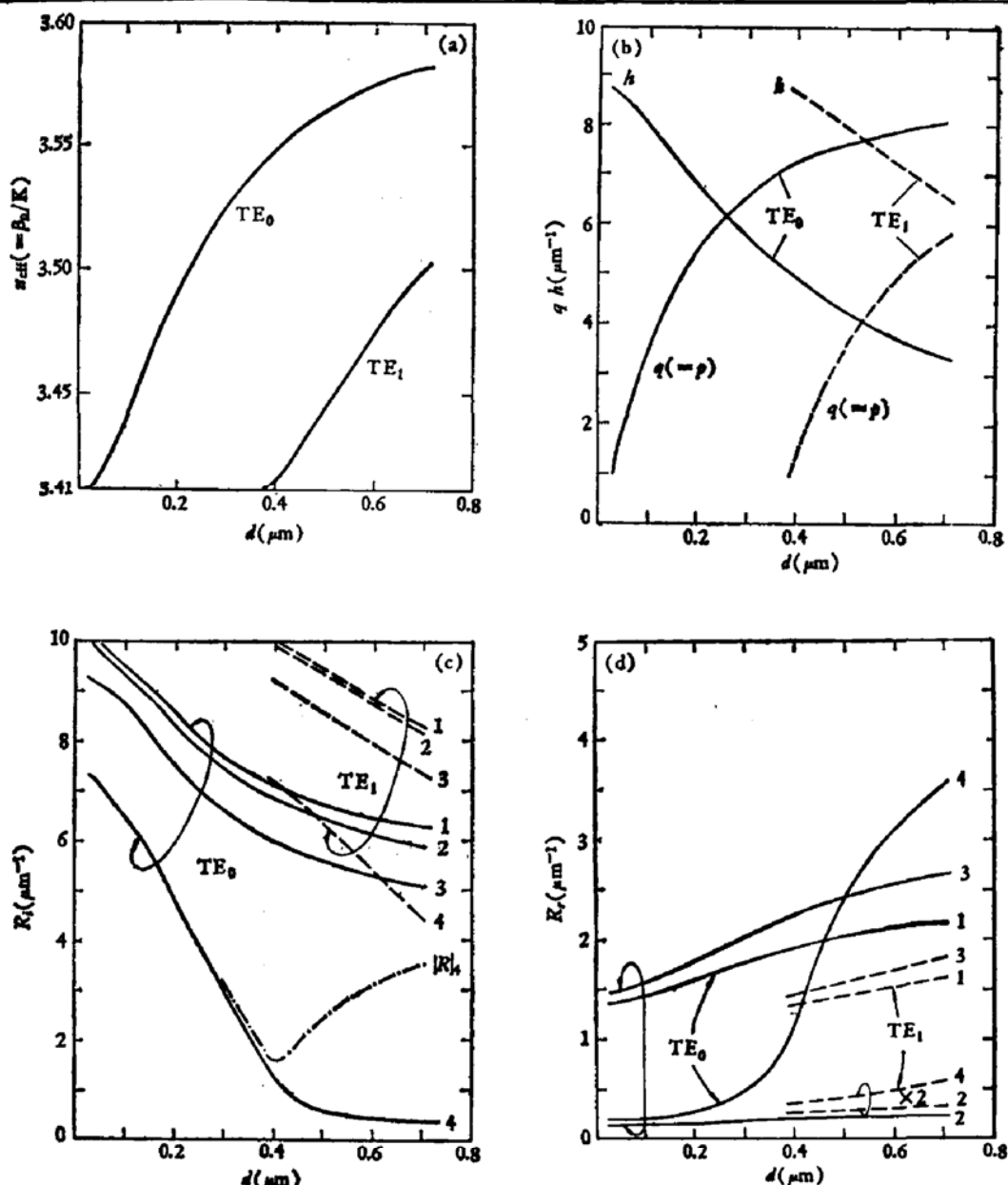


图2 解三层平板波导本征方程的结果 ($n_1 = n_3 = 3.41$, $n_2 = 3.61$, 波长 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$).
 (a) $n_{eff}-d$ 关系, (b) $h, q-d$, (c) R 的虚部 R_i-d , (d) R 的实部 R_r-d (1. $\tilde{n}_2 = 3.67 - i0.00676$,
 2. $\tilde{n}_2 = 3.67 - i0.00676$, 3. $\tilde{n}_2 = 3.63 - i0.00676$, 4. $\tilde{n}_2 = 3.55 - i0.00676$).

画出 $n_2 = 3.55$, $\alpha_2 = 1000\text{cm}^{-1}$ 的计算结果。计算还表明衬底折射率的虚部对结果的影响较小。

为了解释上述计算结果出现的 Δn 的符号值,我们对(9)式主要项中的 $\frac{q+R}{q-R}$ 进行分析,得到 Δn 正负值的条件为

$$\begin{cases} q^2 - (R_r^2 + R_i^2) > 0 & \Delta n > 0 \\ q^2 - (R_r^2 + R_i^2) < 0 & \Delta n < 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中 R_r 和 R_i 分别为 R 的实部和虚部,用图 5 可以简明地解释(14)式的物理意义。图 5(a) 表示 $d = 0.11\mu\text{m}$, $z = 0.1\mu\text{m}$ 的光场分布。 $q^2 < R_r^2 + R_i^2$ 使光场在衬底中的衰减率比三层波导的增加(或穿透深度减小),波导有效厚度减小,所以比三层平板波导有效折

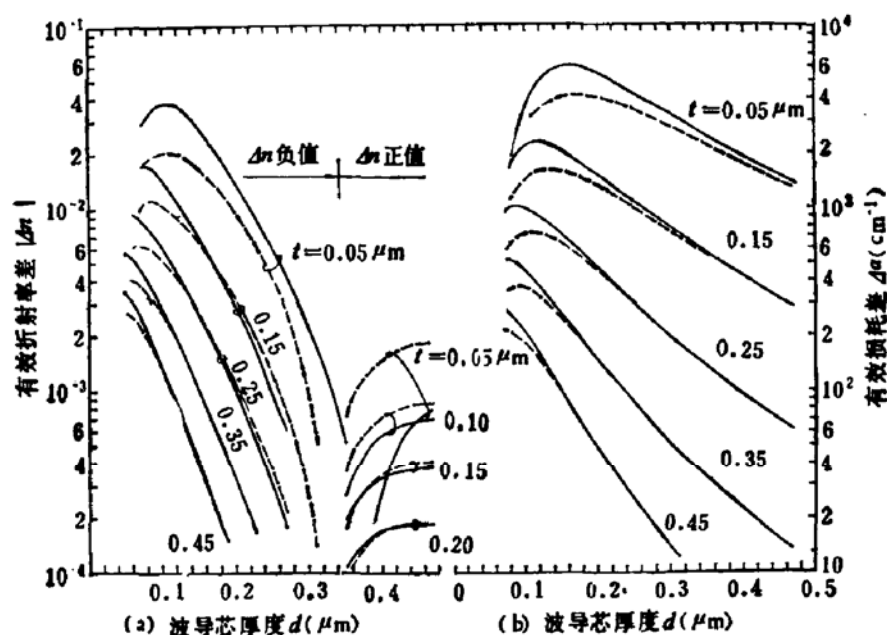


图3 (9)式和文献[6]的(9)式计算结果的比较

($n_1 = n_3 = 3.41$, $n_2 = 3.61$, $\tilde{n}_4 = 3.63 - i0.0676$, $\lambda = 0.85\mu\text{m}$, TE₀模). (a)有效折射率差 $|\Delta n|$ 随波导芯厚度 d 的变化(t 为参变量), (b)有效损耗差 $\Delta\alpha(\text{cm}^{-1})$ 随波导芯厚度的变化. ——公式(9), ——文献[6]的(9)式.

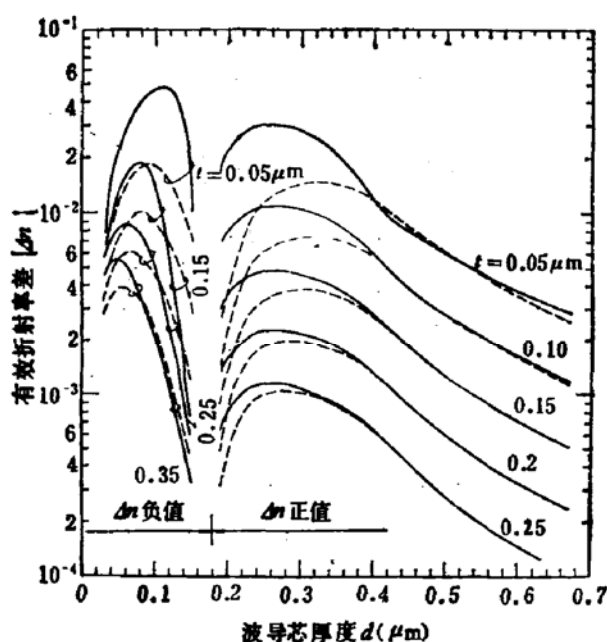


图4 衬底复数折射率为 $\tilde{n}_4 = 3.55 - i0.00676$ 的四层平板波导 ($n_1 = n_3 = 3.41$, $n_2 = 3.61$)、在波导厚度较小值就出现 Δn 为正值. 为比较, 文献[6](9)式的计算结果也画在图中. (波长 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$, TE₀模)——公式(9), ——文献[6](9)式.

射率减小, Δn 为负值. 图 5(b) 表示 $d = 0.31\mu\text{m}$, $t = 0.1\mu\text{m}$ 的光场分布, $q^2 > R_1^2 + R_2^2$ 使得光场在衬底中的衰减率比三层波导的减小(或穿透深度增加), 波导有效厚度增加, 所以比三层平板波导的有效折射率大, Δn 为正值. 正如图 4 所示. 上述分析是把四层漏波导等效成三层平板波导来讨论的. 实际上四层漏波导的情况更复杂些, 包层的消失场有相移, 横向有功率传播(这里等效成有效损耗), 不仅是三层平板波导包层中的

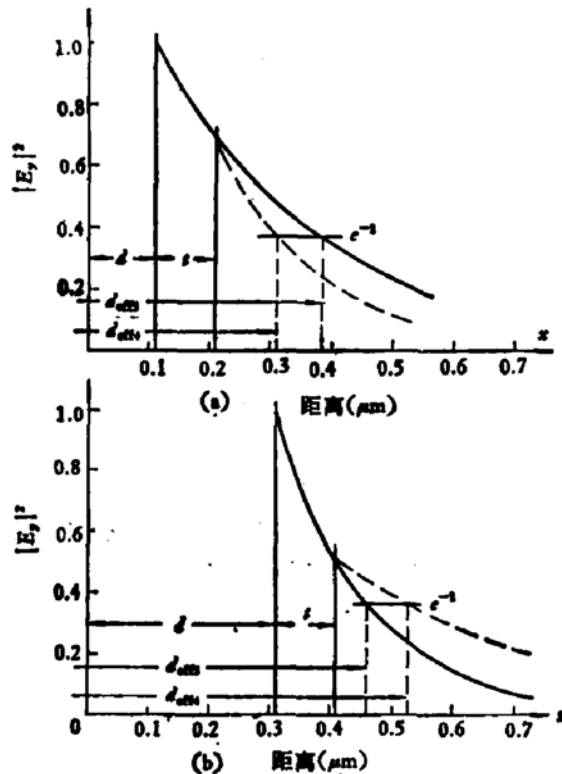


图5 把四层漏平板波导等效为三层平板波导的光强分布,用有效波导厚度的变化解释 Δn 的符号正负值. 波导材料参数为 $n_1 = n_3 = 3.41$, $n_2 = 3.61$, $\tilde{n}_2 = 3.55 - i0.00676$, $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ (图中下标数表示三层、四层波导). (a) $d = 0.11 \mu\text{m}$, $\Delta n < 0$, (b) $d = 0.31 \mu\text{m}$, $\Delta n > 0$.

Goos-Haenchen 平移^[8]的情况. 当然还可以由引起导引模在波导壁入射角的变化来解释 Δn 的正负号,这里不再作详细讨论了.

我们直接从解四层漏平板光波导的麦克斯韦尔方程出发,用传播常数微扰技术,推导了一个比 W. Streifer 等人的结果更好的新的近似公式. 并用等效三层平板波导的近似分析,解释了计算结果出现的 Δn 的符号问题. 本文的理论分析和计算结果表明,如果选用不适当的波导尺寸或材料参数,将不能获得预想的结果,甚至会引起相反的作用. 预期 Δn 正值的物理机构可以获得它的应用. 无疑,新的近似计算公式对 CSP 激光器和薄膜波导光学将获得更好的近似计算值.

感谢王启明同志对此工作热情关怀. 本工作中彭怀德、王仲明和潘贵生等同志与我们进行过有益的讨论,计算站为我们提供了计算的方便,在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] T. Sugino, M. Wada, H. Shimizu, K. Iton and I. Teramoto, *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 270 (1979).
- [2] D. Botez and P. Zory, *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 261 (1978).
- [3] T. Tsukada, *J. of Appl. Phys.*, **45**, 4899 (1974).
- [4] 张敬明,郑宝真,半导体学报, **3**, 1(1982).
- [5] J. B. Delaney and J. K. Butler, *IEEE J. of Quant. Electr.*, **QE-15**, 750 (1979).
- [6] W. Streifer, R. D. Burnham and D. R. Scifres, *IEEE J. of Quant. Electr.*, **QE-12**, 177 (1976).
- [7] T. Kuroda, M. Nakamura, K. Aiki and J. Umeda, *Appl. Opt.*, **17**, 3264 (1978).
- [8] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers, Part A Fundamental Principles*, p. 64, Academic Press, 1978.

Analysis of Leaky Optical Waveguide of Semiconductors with Four Layers

Zhang Jingming and Zheng Baozhen

(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica*)

Abstract

The Maxwell equations for planar leaky optical waveguide with four layers are directly solved, the eigenvalue equation is derived. An approximate expression which is more accurate than the results calculated by W. Streifer et al. is obtained by perturbation technique of propagation constant. The question of the sign of Δn that appeared in the calculated results is discussed, and the conditions of identifying its positive and negative values are obtained. Calculated results of the GaAs-AlGaAs material are presented and compared with those from W. Streifer et al.