

抛物界面光波导的模吸收损耗

马春生 刘式墉

(吉林大学电子科学系, 长春, 130023)

用微分法由抛物界面光波导的近似模方程导出模吸收损耗系数的表达式, 并结合计算实例进行了误差分析.

关键词: 集成光学, 光波导, 抛物界面, 吸收损耗.

1 引言

在沟道衬底上外延形成的 GaAs/AlGaAs 光波导具有界面散射损耗小等优点, 其半月形截面的周界曲线可采用抛物线函数模拟, 因此称为抛物界面波导^[1]. 在不考虑介质吸收的情况下, 我们曾在文献 [1] 中对这种结构复杂的波导传输特性进行了简化分析, 推导出近似计算有效折射率的模方程. 当考虑介质的吸收作用时, 仍可用这一模方程近似计算模有效折射率, 但不能直接计算模吸收损耗. 本文在文献 [1] 的基础上, 把抛物界面光波导由非吸收型推广到吸收型, 把模方程由实数域推广到复数域, 并把吸收介质的消光系数视为介质折射率的增量, 用微分法由模方程求得模吸收损耗系数的表达式, 可方便迅速地计算模的吸收损耗. 最后给出了抛物界面 SiO₂/GaAs/AlGaAs 半导体光波导的模吸收损耗的计算结果, 估算了计算误差.

2 模吸收损耗系数公式的推导

由吸收介质组成的抛物界面光波导的横截面如图 1 所示. 图中 $\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3$ 分别为波导芯, 下限制层和上包层介质的复折射率, 并有

$$\hat{n}_i = n_i - j\kappa_i, \quad (i=1, 2, 3). \quad (1)$$

式中 n_i, κ_i 分别为第 i 层介质的实折射率和消光系数, 且 κ_i 为小量. 周界曲线 $b(x)$ 可表示为 $b(x) = b_0 - b_0 x^2 / a_0^2$ ^[1], 这里 $b_0, 2a_0$ 分别为波导芯的最大厚度和最大宽度.

对于非吸收型介质波导, $\kappa_i = 0$, 其 E_{mn}^o 模有效折射率 N 满足模方程^[1]

$$\frac{(n_1^2 - N^2 - R^2) [(n_1^2 - N^2)^{1/2} - R]}{(n_1^2 - N^2)^{1/2}} = \frac{(2m+1)^2 T}{b_0^2}, \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} R = \frac{(n+1)\pi}{(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0 b_0}, \\ T = \frac{k_0 b_0}{a_0^2 [(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0 b_0]}. \end{cases} \quad (3)$$

这里 $m, n=0, 1, 2, \dots$ 分别为 x 和 y 方向模阶数, $k_0=2\pi/\lambda_0$ 为真空中波数, λ_0 为真空中光波长. 为运算方便, 将式(2)变形为隐函数形式为

$$\begin{aligned} F(R, T, W) &= k_0^2(W^2 - R^2)(W - R) \\ &- (2m+1)^2 T W = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$W = (n_1^2 - N^2)^{1/2}. \quad (5)$$

当考虑介质的吸收作用时, $\kappa_i \neq 0$ 且为小量, 式(4)可由实数域推广到复数域. 由式(1)可以认为组成波导的各介质层的复折射率 \hat{n}_i 是在其实折射率 n_i 的基础上获得虚增量 $\Delta\hat{n}_i = -j\kappa_i$ 形成的, 因此由式(3)定义的 R, T 应分别获得相应的虚增量 $\Delta\hat{R}, \Delta\hat{T}$. 运用微分法由式(3)可求得

$$\begin{cases} \Delta\hat{R} = \frac{\partial R}{\partial n_1} \Delta\hat{n}_1 + \frac{\partial R}{\partial n_2} \Delta\hat{n}_2 + \frac{\partial R}{\partial n_3} \Delta\hat{n}_3 \equiv -j\Delta R, \\ \Delta\hat{T} = \frac{\partial T}{\partial n_1} \Delta\hat{n}_1 + \frac{\partial T}{\partial n_2} \Delta\hat{n}_2 + \frac{\partial T}{\partial n_3} \Delta\hat{n}_3 \equiv -j\Delta T. \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{R^2}{(n+1)\pi} \left[\frac{n_1\kappa_1 - n_2\kappa_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1\kappa_1 - n_3\kappa_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right], \\ \Delta T = \frac{a_0^2 T^2}{k_0 b_0} \left[\frac{n_1\kappa_1 - n_2\kappa_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1\kappa_1 - n_3\kappa_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right]. \end{cases} \quad (7)$$

当 R, T 获得虚增量 $\Delta\hat{R}, \Delta\hat{T}$ 时, 式(4)中的 W 应获得相应的虚增量 $\Delta\hat{W}$, 当 n_1 和 W 获得虚增量 $\Delta\hat{n}_1$ 和 $\Delta\hat{W}$ 时, 式(5)中的 N 应获得相应的虚增量 $\Delta\hat{N}$. 运用微分法由式(4), (5)可求得

$$\Delta\hat{N} = - \left(\frac{\partial F}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial n_1} \Delta\hat{n}_1 + \frac{\partial F}{\partial R} \Delta\hat{R} + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta\hat{T} \right) / \left(\frac{\partial F}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial N} \right) \equiv -j\Delta N, \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta N &= \frac{1}{N} \left\{ n_1\kappa_1 - \frac{R^2 W^2 (3R+W)}{(n+1)\pi (2W^2 + RW + R^2)} \left[\frac{n_1\kappa_1 - n_2\kappa_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1\kappa_1 - n_3\kappa_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right] \right. \\ &\quad \left. \times \left[1 + \frac{(n+1)\pi a_0^2 T (W^2 - R^2)}{k_0 b_0 R^2 (3R+W)} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

抛物界面光波导 E_{mn}^z 模吸收损耗系数 α 为^[2]

$$\alpha = -2k_0 \text{Im}(\Delta\hat{N}) = 2k_0 \Delta N, \quad (10)$$

式中 ΔN 由式(9)给出, R, T, W 分别由式(3), (5)规定, N 由式(2)解得为^[3]

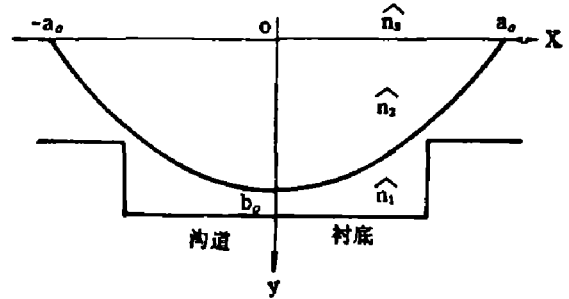


图1 抛物界面光波导的横截面图

Fig. 1 The cross-section diagram of the parabolic cross-section optical waveguide

$$N^2 = n_1^2 - \left\{ \frac{R}{3} + \frac{2}{3} (4R^2 + 3\eta^2)^{1/2} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(-\frac{R}{2} \frac{(16R^2 - 9\eta^2)}{(4R^2 + 3\eta^2)^{3/2}} \right) \right] \right\}^2, \quad (11)$$

式中

$$\eta^2 = (2m+1)^2 T / k_0^2. \quad (12)$$

3 计算结果及误差分析

我们以半导体集成光学中应用的抛物界面 $\text{SiO}_2/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 波导为例计算了模吸收损耗。有关参量选为：真空中光波长 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$ ，在此波长下，高纯 GaAs 波导芯可看成是非吸收介质，其折射率 $n_1 = 3.48$ ，消光系数 $\kappa_1 = 0^{[3]}$ ； $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 下限制层为弱吸收介质，其折射率 $n_2 = 3.42$ ，体吸收系数 $\alpha_2 = 0.2 \text{ mm}^{-1}$ ，相应的消光系数 $\kappa_2 = \alpha_2 / 2k_0 = 1.68704 \times 10^{-5[3]}$ ； SiO_2 上包层为非吸收介质，其折射率 $n_3 = 1.45$ ，消光系数 $\kappa_3 = 0$ 。用式 (10) 计算的结果由图 2, 3 给出。

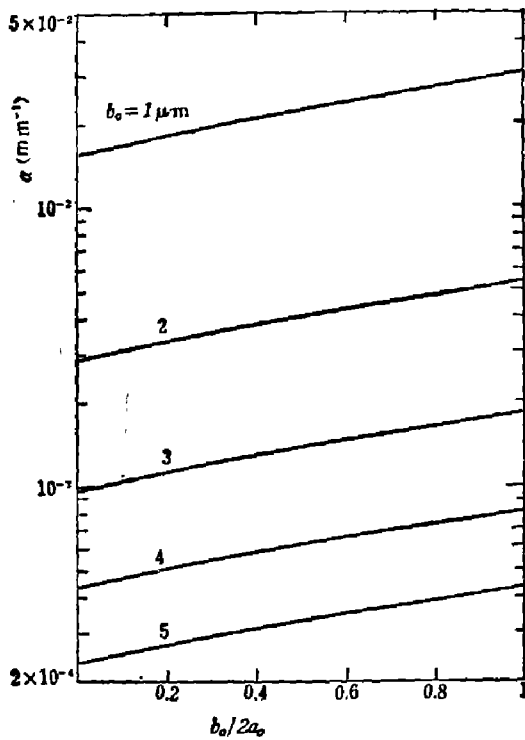


图 2 E_{00}^* 主模吸收损耗系数 α 随归一化芯厚度 $b_0/2a_0$ 的变化

Fig. 2 E_{00}^* mode absorption loss coefficient α vs normalized core thickness $b_0/2a_0$

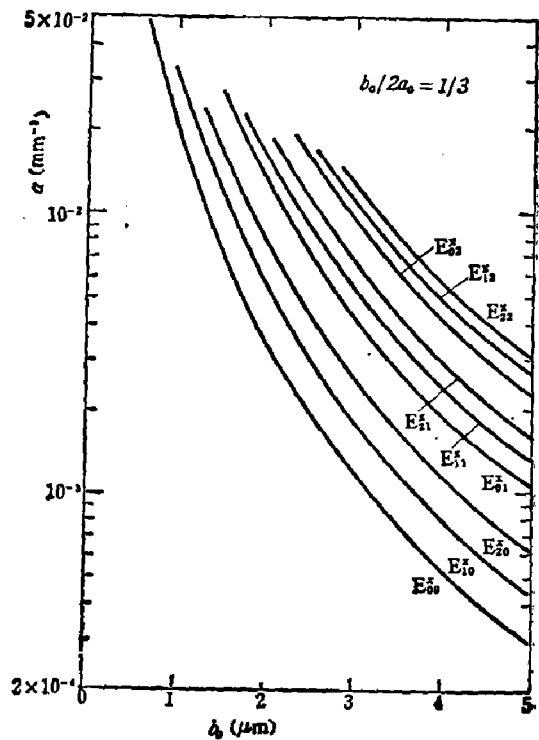


图 3 E_{mn}^* 模吸收损耗系数 α 随最大芯片厚度 b_0 的变化

Fig. 3 E_{mn}^* mode absorption loss coefficient α vs maximum core thickness b_0

图 2 给出 E_{00}^* 主模的吸收损耗系数 α 随归一化芯厚度 $b_0/2a_0$ 的变化曲线，取 $b_0 = 1, 2, 3, 4, 5 \mu\text{m}$ 。可以看出，模吸收损耗系数 α 随最大芯厚度 b_0 和最大芯宽度 $2a_0$ 增大而减小。

图 3 给出了 E_{mn}^* 模的吸收损耗系数 α 随最大芯厚度 b_0 的变化曲线，取 $b_0/2a_0 = 1/3$ ， $m, n = 0, 1, 2$ 。由文献 [1] 的计算结果可知，当 $b_0 \approx 1 \mu\text{m}$ 及 $2a_0 = 3b_0 \approx 3 \mu\text{m}$ 时， E_{10}^* 及其它高阶模已经截止，波导中仅传输 E_{00}^* 主模，由图 3 可以看出，在这种情况下 E_{00}^* 主模的吸收损

耗系数 $\alpha \approx 0.02 \text{ mm}^{-1}$, 因此波导将成为仅传输 E_{00}° 主模的低损耗单模波导。

对于具有任意截面的介质光波导, 曾报道过对其传输特性的分析方法^[4,5], 但对其损耗特性的分析还未有报道, 只能估算式(10)可能产生的误差。式(10)是由近似模方程用微分法导出的, 其误差应由两部分决定, 即由模方程(3)计算模有效折射率 N 产生的误差和由微分法计算模吸收损耗系数 α 产生的误差。由误差理论可知总计算误差近似上述两部分误差之和。计算表明, 在模截止区附近上述两部分相对误差最大, 分别为 $\sim 1.5 \times 10^{-3}$ 和 $\sim 5 \times 10^{-3}$ ^[4,6]。因此在模截止区附近, 式(10)的计算结果与数值结果的总相对误差约为 6.5×10^{-3} , 但当波导芯厚度 b_0 增大而使模远离截止时, 此误差将迅速减小^[7]。

综上所述, 本文在文献[1]的基础上把抛物界面光波导由非吸收型推广到吸收型, 把模方程(2)由实数域推广到复数域, 运用微分法研究了吸收型抛物界面光波导的模吸收损耗, 给出了相应的计算公式。这一方法的优点是只要知道波导特征方程的具体形式, 在一般情况下运用微分法即可求出模的吸收损耗。该方法也是一种一级微扰法, 但与量子力学中的一级微扰论有本质的区别, 后者是对模场分布函数进行微扰处理, 属积分运算, 数学处理较繁琐。本文的方法是对模特征方程进行微扰处理, 属微分运算, 数学处理较简单。对于某些模场分布函数未知但特征方程已知的波导, 无法应用量子力学一级微扰论, 但可用本文的方法求出模吸收损耗。

参 考 文 献

- 1 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. *Opt. Quantum Electron.*, 1989; **21**(2): 117~122
- 2 Kaminow J P, Mammel W L, Weber H P. *Appl. Opt.*, 1974; **13**(2): 396~405
- 3 Casey H C, Panish M B. *Heterostructure Lasers*. New York: Academic Press, 1978: 43~46
- 4 Yeh C, Ha K, Dong S B et al. *Appl. Opt.*, 1979; **18**(10): 1490~1504
- 5 Mabaya N, Lagasse P E, Vandembulcke P. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, 1981; **MTT-29**(6): 600~605
- 6 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. *Opt. Quantum Electron.*, 1988; **20**(2): 145~151
- 7 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. *Opt. Commun.*, 1989; **69**(5,6): 357~361

MODE ABSORPTION LOSS OF OPTICAL WAVEGUIDE WITH PARABOLIC CROSS-SECTION

MA CHUNSHENG, LIU SHIYONG

(Department of Electronics Science, Jilin University, Changchun, Jilin 130023, China)

Using the differentiation method, from the mode equation of the parabolic cross-section waveguide, the expression of the mode absorption loss coefficient is derived, and its relative errors are analyzed.

Key words: Integrated optics, optical waveguides, parabolic cross-section, absorption loss.