

$1/ch^2$ 界面介质光波导的模吸收损耗

马春生 刘式墉

(吉林大学, 长春)

1989年11月7日收到

运用微分法由 $1/ch^2$ 界面介质光波导的近似模方程导出了模吸收损耗系数的公式, 并结合计算实例进行了误差分析。

关键词 集成光学, 光波导, $1/ch^2$ 界面, 模方程, 吸收损耗, 微分法

引言

在沟道衬底上外延形成的 GaAs/AlGaAs 光波导具有中间厚两边薄的开放式结构, 其界面可采用 $1/ch^2$ 函数进行模拟, 因此这种波导称为 $1/ch^2$ 界面波导^[1]。由于这种波导边界复杂, 对其光学特性进行精确的数值分析非常困难, 在不考虑介质吸收的情况下, 我们曾在文[1]中运用有效折射率 WKB 法对其传输特性进行简化分析, 给出了一个近似模方程, 此模方程可用来计算这种波导的模有效折射率。

实际上, 组成波导的各介质层都或多或少地具有一定的吸收作用。当考虑介质的吸收作用时, 文[1]中给出的模方程仍可用来近似计算模有效折射率, 但不能直接计算模吸收损耗。本文给出一种运用上述模方程来计算模吸收损耗的方法, 即把组成波导的各介质的消光系数看成是介质折射率的虚增量, 运用微分法对模方程求微分, 则可求得模吸收损耗系数的表达式, 用此公式可方便迅速地计算模的吸收损耗。最后给出了半导体集成光学中常用的 $1/ch^2$ 界面 SiO₂/GaAs/AlGaAs 波导的模吸收损耗的计算结果, 并对其误差进行了估计。

模吸收损耗系数公式的推导

$1/ch^2$ 界面吸收型介质光波导的横截面如图 1 所示。图中 $\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3$ 分别为波导层, 下限制层和上包层介质的复折射率并可表示为

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

式中 n_i, K_i 分别为第 i 层介质的实折射率和消光系数, 且 K_i 为小量。周界曲线 $b(x)$ 可表示为^[1]

$$b(x) = b_0 + \frac{b_1 - b_0}{ch^2(x/a_0)} \quad (2)$$

式中 b_1 为波导层中心的最大厚度, b_0 为波导层两个开放端的极限厚度, $h = b_1 - b_0$ 称

为脊高, a_0 称为形状因子。

当忽略介质吸收的情况下, 即令 $K_i = 0$, 这种波导的 E_{mn}^* 模有效折射率 N 可由下述近似模方程解出^[1]

$$2k_0 a_0 \{ [T(n_1^2 - N^2)^{1/2} [(n_1^2 - N^2)^{1/2} + R]]^{1/2} - [T(n_1^2 - N^2)^{1/2} \cdot [(n_1^2 - N^2)^{1/2} + R] - (n_1^2 - N^2 - R^2)]^{1/2} \} = 2m + 1 \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} R = \frac{(n+1)\pi}{(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0 b_1} \\ T = \frac{k_0(b_1 - b_0)}{(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0 b_1} \end{cases} \quad (4)$$

其中 $m, n = 0, 1, 2, \dots$ 分别为 x, y 方向的模阶数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中波数, λ_0 为真空中激光波长。为了下面运算方便, 把式(3)变形并写成隐函数形式如下

$$F(R, T, W) = (W + R)^{1/2} \{ T^{1/2} W^{1/2} - [R - (1 - T)W]^{1/2} \} - \frac{2m + 1}{2k_0 a_0} = 0 \quad (5)$$

式中

$$W(n_1, N) = (n_1^2 - N^2)^{1/2} \quad (6)$$

当考虑组成波导的各介质层的吸收作用时, 即 $K_i \neq 0$ 且为小量, 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

$$\Delta \hat{n}_i = -jK_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

而形成的, 因此由式(4)定义的 R, T 应分别获得相应的增量 $\Delta \hat{R}, \Delta \hat{T}$, 应用微分法对式(4)求微分可得

$$\begin{cases} \Delta \hat{R} = \frac{\partial R}{\partial n_1} \Delta \hat{n}_1 + \frac{\partial R}{\partial n_2} \Delta \hat{n}_2 + \frac{\partial R}{\partial n_3} \Delta \hat{n}_3 = -j\Delta R \\ \Delta \hat{T} = \frac{\partial T}{\partial n_1} \Delta \hat{n}_1 + \frac{\partial T}{\partial n_2} \Delta \hat{n}_2 + \frac{\partial T}{\partial n_3} \Delta \hat{n}_3 = -j\Delta T \end{cases} \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{R^2}{(n+1)\pi} \left[\frac{n_1 K_1 - n_2 K_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1 K_1 - n_3 K_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right] \\ \Delta T = \frac{T^2}{k_0(b_1 - b_0)} \left[\frac{n_1 K_1 - n_2 K_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1 K_1 - n_3 K_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right] \end{cases} \quad (9)$$

当 R, T 获得虚增量 $\Delta \hat{R}, \Delta \hat{T}$ 时, 通过式(5) W 应获得相应的增量 $\Delta \hat{W}$, 应用微分法对式(5)求微分可得

$$\Delta \hat{W} = - \left(\frac{\partial F}{\partial R} \Delta \hat{R} + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta \hat{T} \right) / \frac{\partial F}{\partial W} \quad (10)$$

当 n_1, W 分别获得虚增量 $\Delta \hat{n}_1, \Delta \hat{W}$ 时, 由式(6)规定的 N 应获得相应的增量 $\Delta \hat{N}$, 应用

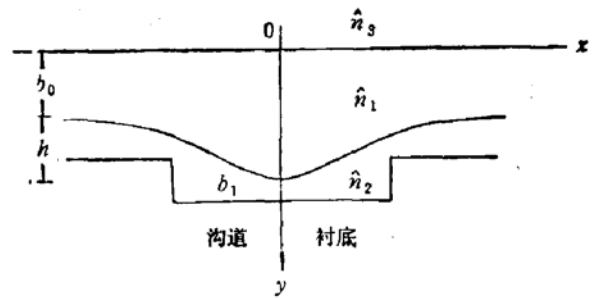


图1 $1/ch^2$ 界面波导的横截面图

微分法对式(6)求微分可得

$$\Delta \hat{N} = \left(\Delta \hat{W} - \frac{\partial W}{\partial n_1} \Delta \hat{n}_1 \right) / \frac{\partial W}{\partial N} = (n_1 \Delta \hat{n}_1 - W \Delta \hat{W}) / N \quad (11)$$

把式(10)代入式(11)得到

$$\Delta \hat{N} = \frac{1}{N} \left[n_1 \Delta \hat{n}_1 + W \left(\frac{\partial F}{\partial R} \Delta \hat{R} + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta \hat{T} \right) / \frac{\partial F}{\partial W} \right] \quad (12)$$

把式(7)(8)代入式(12)可把 $\Delta \hat{N}$ 写成

$$\Delta \hat{N} = -j \Delta N \quad (13)$$

式中

$$\Delta N = \frac{1}{N} \left[n_1 K_1 + W \left(\frac{\partial F}{\partial R} \Delta R + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta T \right) / \frac{\partial F}{\partial W} \right] \quad (14)$$

对隐函数(5)求偏导得到

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial R} = - \frac{2k_0 a_0 (W+R)^{3/2} - (2m+1)[R - (1-T)W]^{1/2}}{4k_0 a_0 (W+R)[R - (1-T)W]^{1/2}} \\ \frac{\partial F}{\partial T} = - \frac{(2m+1)W^{1/2}}{4k_0 a_0 T^{1/2}[R - (1-T)W]^{1/2}} \\ \frac{\partial F}{\partial W} = \{ [(2m+1)W^{1/2} + 2k_0 a_0 T^{1/2}(W+R)^{3/2}][R - (1-T)W]^{1/2} \\ + 2k_0 a_0 W^{1/2}(1-T)(W+R)^{3/2} \} / 4k_0 a_0 W^{1/2}(W+R)[R - (1-T)W]^{1/2} \end{cases} \quad (15)$$

因此 $1/\text{ch}^2$ 界面介质光波导的 E_{mn}^z 模吸收损耗系数 α 的表达式为

$$\alpha = -2k_0 \text{Im}(\Delta \hat{N}) = 2k_0 \Delta N \quad (16)$$

式中 ΔN 由式(14)规定, R, T, W 由式(4)(6)定义, $\Delta R, \Delta T$ 和 $\frac{\partial F}{\partial R}, \frac{\partial F}{\partial T}, \frac{\partial F}{\partial W}$ 分别

由式(9)(15)给出, N 由方程(3)解出。

实算结果及误差分析

作为实例我们计算了半导体集成光学中应用的具有 $1/\text{ch}^2$ 界面的 $\text{SiO}_2/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 波导的 E_{mn}^z 模吸收损耗系数 α 。选真空中激光波长 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$, 在此波长下, 高纯 GaAs 波导层可看成是非吸收介质, 其折射率 $n_1 = 3.48$, 消光系数 $K_1 = 0^{[2]}$; $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 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 $K_2 = \alpha_2/2k_0 = 1.68704 \times 10^{-5[2]}$; SiO_2 上包层为非吸收介质, 其折射率 $n_3 = 1.45$, 消光系数 $K_3 = 0$ 。应用公式(16)的计算结果由图 2, 3 给出。

图 2 给出了 E_{00}^z 主模的吸收损耗系数 α 随归一化脊高 h/b_1 的变化曲线, 分别选取 $b_1 = 1, 2, 3, 4, 5 \mu\text{m}$, $a_0/b_1 = 0.5, 0.7, 0.9$ 。可以看出模吸收损耗系数 α 随波导层最大厚度 b_1 和形状因子 a_0 的增大而减小, 随脊高 h 的增大而增大。

图 3 给出了 E_{mn}^z 模的吸收损耗系数 α 随波导层最大厚度 b_1 的变化曲线, 分别选取 $b_0/b_1 = 0.5$, $a_0/b_1 = 0.7$, $m, n = 0, 1, 2$ 。由文 [1] 的计算结果可知, 当波导层最大厚度 $b_1 \approx 0.9 \mu\text{m}$, 相应的 $b_0 = 0.5b_1 \approx 0.45 \mu\text{m}$, $a_0 = 0.7b_1 \approx 0.63 \mu\text{m}$, 此时 E_{10}^z 及其

它高阶模都已截止,波导中只允许传输 E_{00}^* 主模。由图 3 可以看出,此时 E_{00}^* 主模的吸收损耗系数 $\alpha \approx 2.9 \times 10^{-2} \text{mm}^{-1}$, 即波导中 E_{00}^* 主模以低损耗进行传输,此时波导成为只允许传输 E_{00}^* 主模的低损耗单模波导。

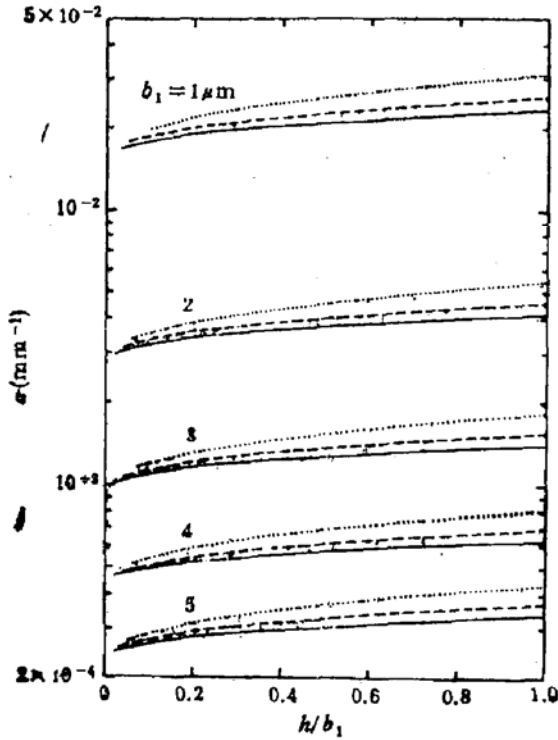


图 2 E_{00}^* 主模吸收损耗系数 α 随归一化脊高 h/b_1 的变化曲线
 $a_0/b_1 = 0.5$; ---- $a_0/b_1 = 0.7$;
 — $a_0/b_1 = 0.9$

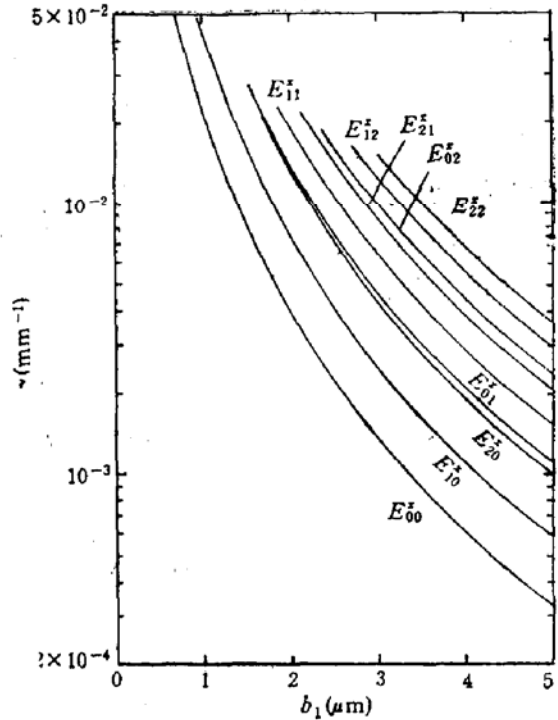


图 3 E_{00}^* 模吸收损耗系数 α 随波导层最大厚度 b_1 的变化曲线
 $b_0/b_1 = 0.5, a_0/b_1 = 0.7$

对于具有任意截面的波导,以前的某些文献虽曾给出了对其传输特性的分析方法,但对其损耗特性的分析还未曾见诸报道^[3,4],因此本文的结果无法与其它结果进行比较,式(16)可能产生的误差只能进行估计。式(16)是由近似模方程(3)运用微分法而导出的,因此式(16)可能产生的误差应由下述两部分误差所决定:一种是由模方程(3)计算模有效折射率 N 产生的误差,一种是由微分法计算模吸收损耗系数 α 产生的误差。计算表明在模截止区附近,计算误差最大。由文[1]和文[5]的计算结果可知,在模截止区附近,上述两种相对误差分别约为 1.5×10^{-3} 和 5×10^{-3} 。因此在模截止区附近,公式(16)计算结果与数值结果之间的总相对误差约为 6.5×10^{-3} ,而且当波导层最大厚度 b_1 增大使模远离截止时,此误差将迅速地减小^[6]。由此可以看出,公式(16)是比较精确的,用式(16)可对 $1/ch^2$ 界面介质光波导的模吸收损耗进行方便迅速的计算,并能得到较精确的结果,同时节省了大量的计算时间。

结 论

1. 以前的某些文献曾采用 $1/ch^2$ 函数对某些平面光波导的折射率分布进行模拟^[7],

本文及文[1]则是对某些两端开放式的三维介质光波导的界面采用 $1/ch^2$ 函数进行模拟。前者属于渐变折射率平面光波导问题,而后者属于阶梯折射率曲面界面光波导问题。

2. 本文在文[1]的基础上把 $1/ch^2$ 界面介质光波导由非吸收型推广到吸收型,即由实数域推广到复数域。

3. 本文把吸收介质复折射率的虚部视为其实部的增量,运用微分法由特征方程求得模吸收损耗系数的公式。这一方法的优点是只要知道波导特征方程的具体形式,一般情况下运用微分法即可求出模的吸收损耗。这一方法本质上也是一级微扰法的一种,但与其它微扰法不同,其它某些微扰法都是对模场分布做微扰处理^[8-10],本方法则是对特征方程做微扰处理。对于某些模场分布未知但特征方程已知的波导,显然其它那些微扰法无法应用,而本文的方法则可以用来求出模吸收损耗。本文给出的 $1/ch^2$ 界面介质光波导即是其中的一例。

参 考 文 献

- [1] 马春生,刘式塘,半导体学报,10,733(1989).
- [2] H. C. Casey and M. B. Panish, Heterostructure Lasers, Academic Press, New York, San Francisco, London, 43—46(1978).
- [3] C. Yeh, K. Ha, S. B. Dong and W. P. Brown, *Appl. Opt.*, 18, 1490(1979).
- [4] N. Mabaya, P. E. Lagasse and P. Vandembulcke, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-29, 600 (1981).
- [5] Chunsheng Ma and Shiyong Liu, *Opt. and Quantum Electron.*, 20, 145(1988).
- [6] Chunsheng Ma and Shiyong Liu, *Opt. Commun.*, 69, 357(1989).
- [7] P. M. Asbeck, D. A. Cammack and J. J. Daniele, *Appl. Phys. Lett.*, 33, 504(1978).
- [8] W. Streifer, R. D. Burnham and D. R. Scifres, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-12, 177(1976).
- [9] T. Kuroda, M. Nakamura, K. Aiki and J. Umeda, *Appl. Opt.*, 17, 3264(1978).
- [10] 张敬明,郑宝珍,半导体学报,5,74(1984).

Mode Absorption Loss of Dielectric Waveguide with $1/ch^2$ Cross-Section

Ma Chunsheng and Liu Shiyong

(Jilin University, Changchun)

Abstract

By using the differentiation method on the mode equation of the $1/ch^2$ cross-section dielectric waveguide, the expression of the mode absorption loss coefficient is derived. The computed results for $\text{SiO}_2/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ waveguides are performed and the relative errors are discussed.

Key words Integrated optics, Optical waveguide, $1/ch^2$ cross-section, Mode equation, Absorption loss, Differentiation method