

# 脊形波导中导模传输与 损耗的分析与计算\*

马春生 刘式慵  
(吉林大学电子科学系)

## 提 要

本文运用有效折射率法把脊形波导化成等效二维平板波导后,再运用微分法求出弱吸收情况下波导模的吸收损耗,其方法简便,精确度高。

关键词: 集成光学,脊形波导,有效折射率,吸收损耗。

## 一、引 言

脊形波导在集成光学中有广泛的应用,它是薄膜激光器、耦合器、调制器、开关等许多光电器件的基础。由于脊形波导边界复杂,精确地分析其光学特性十分困难,若考虑介质的吸收作用,则难度就更大。本文在弱吸收条件下,给出一种简捷而精确的分析方法。首先运用有效折射率法<sup>[1]</sup>把脊形波导化成一个等效的二维平板波导,然后考虑介质的弱吸收作用,把介质复折射率的虚部消光系数视为其实部实折射率的增量,运用微分法求出模吸收损耗系数的表达式,从而大大地简化了脊形弱吸收介质波导光学特性的分析和计算过程。

## 二、理 论 分 析

图1所示的脊形波导的各介质层均为弱吸收介质,其复折射率为

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

其中  $n_i$ ,  $\kappa_i$  分别为第  $i$  介质层的实折射率和消光系数,且  $\kappa_i$  为小量,对此脊形弱吸收介质波导  $E_{mn}^x$  模光学特性的分析可分下述两步进行:

(1) 因  $\kappa_i$  为小量,以往的计算表明,此时  $H_i$  对模传输特性影响很小,以致在计算模传播常数或有效折射率时可把它略去<sup>[2]</sup>,即令  $H_i=0$  而把波导近似为非吸收型,应用有效折射率法<sup>[1]</sup>,此脊形波导等价成一个  $x$  方向折射率分布为  $N_2, N_1, N_2$  的平板波导,可由特征方程解出<sup>[3]</sup>

$$k_0(n_1^2 - N_1^2)^{1/2}b_1 = n\pi + \operatorname{tg}^{-1} \frac{(N_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{(n_1^2 - N_1^2)^{1/2}} + \operatorname{tg}^{-1} \frac{(N_1^2 - n_3^2)^{1/2}}{(n_1^2 - N_1^2)^{1/2}}, \quad (i=1, 2; n=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

收稿日期: 1987年12月14日; 收到修改稿日期: 1988年1月30日

\* 本文曾在1987年10月成都第四届全国集成光学学术交流会进行交流。

式中  $h$ ,  $a$ ,  $b$  分别代表脊高, 脊宽和波导芯厚度;  $N_1$ ,  $N_2$  分别为  $y$  方向厚度为  $b_1=b$ ,  $b_2=b-h$  平板波导 TE 模的有效折射率;  $k_0=(2\pi/\lambda_0)$  为真空中波数,  $\lambda_0$  为真空中激光波长, 原脊形波导  $E_{mn}^x$  模的实有效折射率即为此  $x$  方向等效平板波导 TM 模的有效折射率  $N$ , 可由特征方程解出<sup>[4]</sup>

$$k_0(N_1^2 - N^2)^{1/2}a = m\pi + 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{N_1^2(N^2 - N_2^2)^{1/2}}{N_2^2(N_1^2 - N^2)^{1/2}}, \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

(2) 因  $\kappa_i$  为小量, 可把(1)式中的  $-j\kappa_i$  视为介质实折射率  $n_i$  的虚增量, 因此由(2)式决定的  $N_1$ ,  $N_2$  和由(3)式决定的  $N$  应获得相应的虚增量

$$\Delta \hat{N}_i = -jL_i, \quad \Delta \hat{N} = -j\Delta N, \quad (4)$$

应用微分法对(2)、(3)式求增量则可得到(见附录)

$$L_i = \frac{n_1}{N_i} \left\{ \kappa_i - \frac{n_i^2 - N_i^2}{n_1} \frac{\frac{n_1\kappa_1 - n_2\kappa_1}{(n_1^2 - n_2^2)(N_i^2 - n_2^2)^{1/2}} + \frac{n_1\kappa_1 - n_3\kappa_3}{(n_1^2 - n_3^2)(N_i^2 - n_3^2)^{1/2}}}{k_0 b_i + (N_i^2 - n_2^2)^{-1/2} + (N_i^2 - n_3^2)^{-1/2}} \right\}, \quad (\phi=1, 2) \quad (5)$$

$$\Delta N = \frac{N_1}{N} \left\{ L_1 - \frac{2(N_1^2 - N^2)}{N_1} \frac{\frac{N_1 L_1 - N_2 L_2}{(N^2 - N_2^2)^{1/2}} + 2(N^2 - N_2^2)^{1/2} \left( \frac{L_1}{N_1} - \frac{L_2}{N_2} \right)}{k_0 a \left[ \frac{N_1^2}{N_1^2} (N_1^2 - N^2) + \frac{N_1^2}{N_2^2} (N^2 - N_2^2) \right] + \frac{2(N_1^2 - N_2^2)}{(N^2 - N_2^2)^{1/2}}} \right\} \quad (6)$$

$E_{mn}^x$  模的吸收损耗系数  $\alpha$  则为

$$\alpha = 2k_0 \Delta N_0. \quad (7)$$

### 三、计算结果与讨论

作为实例我们计算了半导体集成光路中应用  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  脊形弱吸收波导  $E_{mn}^x$  模的有效折射率  $N$  和吸收损耗系数  $\alpha$ , 计算结果如图 2、图 3 所示, 选用的有关参数为: 真空中激光波长  $\lambda_0=1.06 \mu\text{m}$ , 在此波长下, 高纯 GaAs 波导层可认为是非吸收介质, 其消光系数  $\kappa_1=0$ , 折射率  $n_1=3.48$ <sup>[5]</sup>;  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  下包层的体吸收系数  $\alpha_2=0.2 \text{mm}^{-1}$ , 相应的消光系数  $\kappa_2=(\alpha_2/2k_0)=1.68704 \times 10^{-5}$ , 折射率  $n_2=3.42$ <sup>[5]</sup>;  $\text{SiO}_2$  上包层的非吸收介质, 其消光系数  $\kappa_3=0$ , 折射率  $n_3=1.45$ 。

图 2 给出了  $E_{00}^x$  模的有效折射率  $N$  和吸收损耗系数  $\alpha$  随归一化脊高( $h/b$ )变化的曲线, 图 3 给出了一种典型结构的脊形波导 [ $h=(b/4)$ ,  $a=2b$ ]  $E_{mn}^x$  模的有效折射率  $N$  和吸收损耗系数  $\alpha$  随芯厚  $b$  变化的曲线, 对于这种  $\kappa \neq 0$ ,  $\kappa_1, \kappa_3=0$  的情况可得到下述结论

- (1) 有效折射率  $N$  随脊高  $h$  的增大而减小, 随脊宽  $a$  和芯厚  $b$  的增大而增大;
- (2) 吸收损耗系数  $\alpha$  随脊高  $h$  的增大而增大, 随脊宽  $a$  和芯厚  $b$  的增大而减小。

由图 2、图 3 可知, 若欲减少模的吸收损耗, 应尽量减小脊高, 增大脊宽和芯厚, 值得注

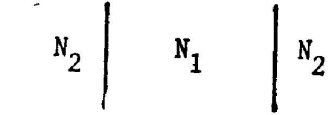
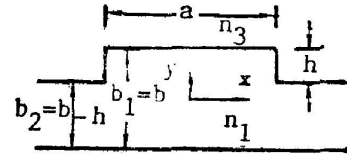


Fig. 1 Cross-sections of ridge waveguide and its equivalent slab waveguide ( $n_1 > n_2 > n_3$ )

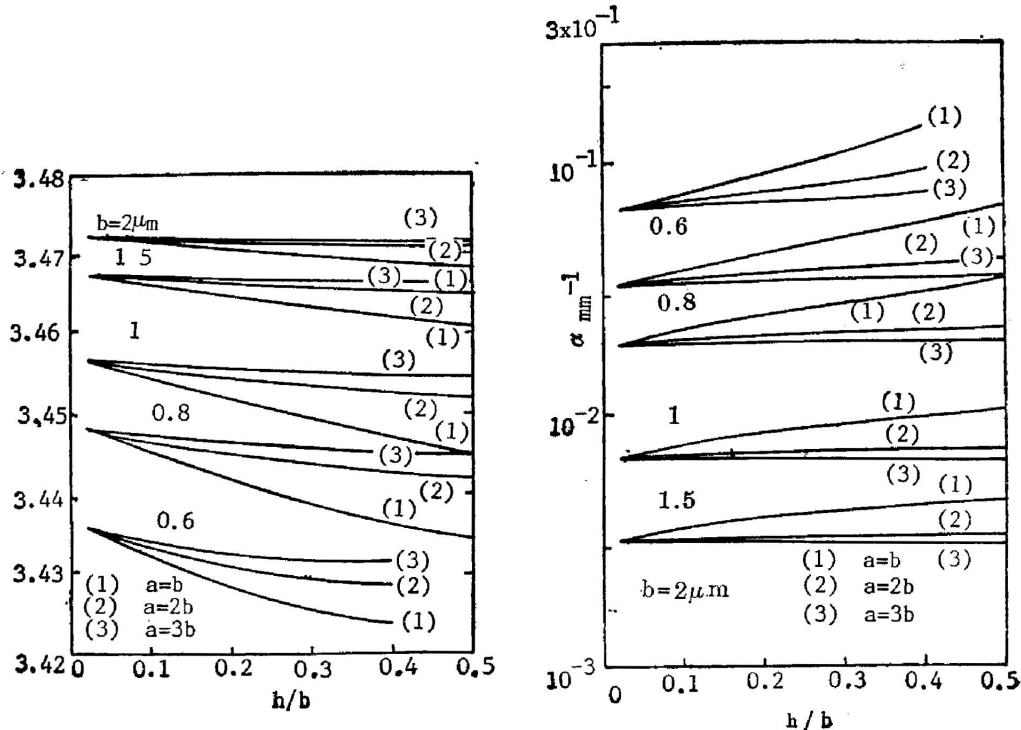
(a)  $N-h/b$  curves(b)  $\alpha-h/b$  curves

Fig. 2  $E_{00}^x$  mode effective index  $N$  and absorptive loss coefficient  $\alpha$  versus normalized ridge height  $h/b$

意的是, 脊形波导芯的左右两侧是通过有效折射率差  $\delta N = N_1 - N_2$  对芯内光场加以限制的, 当脊高过小时,  $\delta N$  变得过小, 从而使光场不能很好地限制在芯内, 所以, 脊高只能根据实际情况进行适当地选择。此外, 由图中还可看到, 当脊宽和芯厚较大时, 如  $a, b \geq 2\mu\text{m}$ , 脊高对吸收损耗的影响不太显著, 对于这种情况, 脊高的选择范围则可适当放宽。

为了检验本文介绍的方法的精确度, 可以应用等效折射率法<sup>[6]</sup>, 把脊形波导等效成一个矩形波导, 然后用复数运算和插值法对此等效矩形波导的  $E_{mn}^x$  模复特征方程<sup>[7]</sup> 进行数值求解, 所得数值结果与本文方法的计算结果之间的最大相对误差, 对于有效折射率  $N$  约为  $3 \times 10^{-6}$ , 对于吸收损耗系数  $\alpha$  约为  $5 \times 10^{-8}$ , 两种结果的曲线相互对应重合, 因此, 可以认为本文的方法是一种高精度的分析方法, 并使分析和计算过程得以简化, 与数值分析相比, 计算程序编排容易, 并可节省大约 90% 以上的计算时间。

本文的算例属于  $\kappa_2 \neq 0, \kappa_1, \kappa_3 = 0$  的情况, 对于其它的介质吸收情况如  $\kappa_1 \neq 0, \kappa_2, \kappa_3 = 0$  或  $\kappa_3 \neq 0, \kappa_1, \kappa_2 = 0$  乃至更复杂的情况如  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3 \neq 0$ , 都可应用本文的方法进行分析计算, 并能得到十分精确的结果。

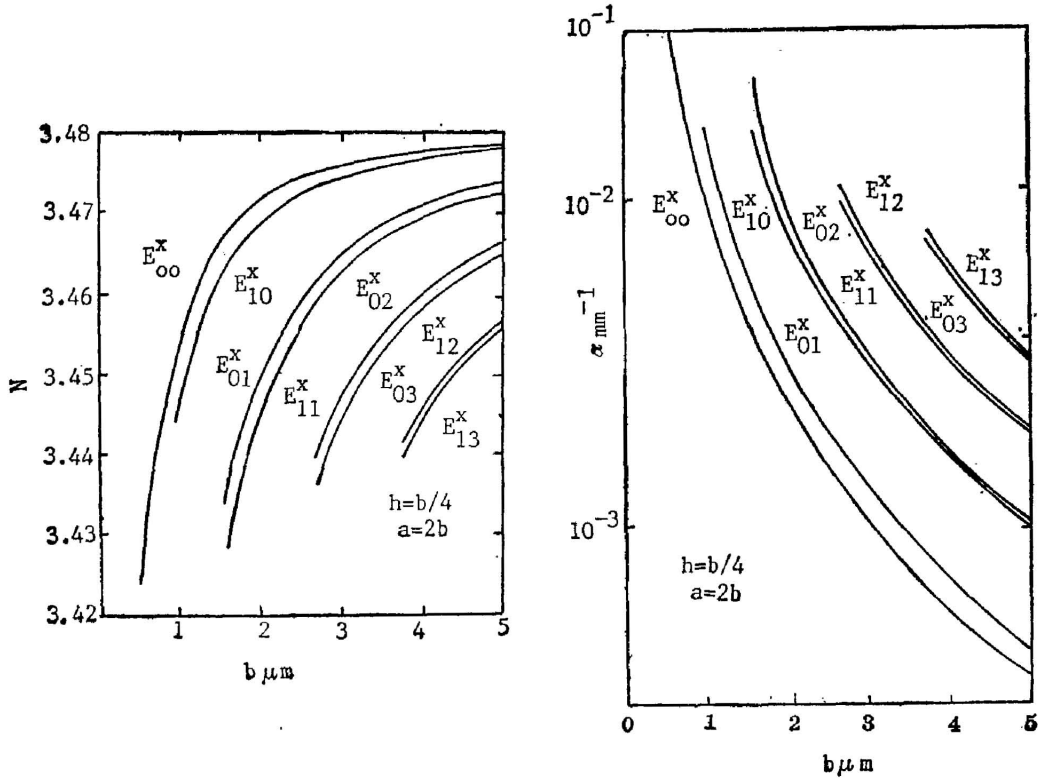
(a)  $F$ - $b$  curves(b)  $\alpha$ - $b$  curves

Fig. 3  $E_{mn}^x$  mode effective index  $N$  and absorptive loss coefficient  $\alpha$  versus guide thickness  $b$

## 附 录

把(2), (3)式写成隐函数的形式

$$P(n_1, n_2, n_3, N_i) = n_1 x + \operatorname{tg}^{-1} \frac{(N_i^2 - n_2^2)^{1/2}}{(n_1^2 - N_i^2)^{1/2}} + \operatorname{tg}^{-1} \frac{(N_i^2 - n_3^2)^{1/2}}{(n_1^2 - N_i^2)^{1/2}} - k_0(n_1^2 - N_i^2)^{1/2} b_i = 0 \quad (i=1, 2), \quad (1A)$$

$$Q(N_1, N_2, N) = m_1 x + 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{N_1^2 (N^2 - N_2^2)^{1/2}}{N_2^2 (N_1^2 - N^2)^{1/2}} - k_0(N_1^2 - N^2)^{1/2} a = 0, \quad (2A)$$

对隐函数(1A)求微分得到

$$\frac{\partial P}{\partial n_1} \Delta n_1 + \frac{\partial P}{\partial n_2} \Delta n_2 + \frac{\partial P}{\partial n_3} \Delta n_3 + \frac{\partial P}{\partial N_i} \Delta N_i = 0. \quad (3A)$$

令  $\Delta n_i = -j n_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 代入上式得到

$$\Delta N_i = j \frac{\frac{\partial P}{\partial n_1} n_1 + \frac{\partial P}{\partial n_2} n_2 + \frac{\partial P}{\partial n_3} n_3}{\frac{\partial P}{\partial N_i}} \quad (4A)$$

对隐函数(1a)求偏导数可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial n_1} &= -\frac{n_1}{(n_1^2 - N_i^2)^{1/2}} \left[ \frac{(N_i^2 - n_2^2)^{1/2}}{n_1^2 - n_2^2} + \frac{(N_i^2 - n_3^2)^{1/2}}{n_1^2 - n_3^2} + k_0 b_i \right] \\ \frac{\partial P}{\partial n_2} &= -\frac{n_2}{n_1^2 - n_2^2} \frac{(n_1^2 - N_i^2)^{1/2}}{(N_i^2 - n_2^2)^{1/2}}, \\ \frac{\partial P}{\partial n_3} &= -\frac{n_3}{n_1^2 - n_3^2} \frac{(n_1^2 - N_i^2)^{1/2}}{(N_i^2 - n_3^2)^{1/2}}, \\ \frac{\partial P}{\partial N_i} &= -\frac{N_i}{(n_1^2 - N_i^2)^{1/2}} \left[ (N_i^2 - n_2^2)^{-1/2} + (N_i^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0 b_i \right] \end{aligned} \right\} \quad (5A)$$

把(5A)式代入(4A)式即可得到(5)式。

对隐函数(2A)求微分得到

$$\frac{\partial Q}{\partial N_1} \Delta \hat{N}_1 + \frac{\partial Q}{\partial N_2} \Delta \hat{N}_2 + \frac{\partial Q}{\partial N} \Delta \hat{N} = 0. \quad (6A)$$

把(4)式中第一式代入上式得到

$$\Delta \hat{N} = j \frac{-\frac{\partial Q}{\partial N_1} L_1 + \frac{\partial Q}{\partial N_2} L_2}{\frac{\partial Q}{\partial N}}, \quad (7A)$$

对隐函数(2A)求偏导数可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial N_1} &= -\frac{N_1}{(N_1^2 - N^2)^{1/2}} \left[ \frac{2N_2^2(N^2 - N_2^2)^{1/2} [N_1^2 - 2(N_1^2 - N^2)]}{N_2^2(N_1^2 - N^2) + N_1^2(N^2 - N_2^2)} + k_0 a \right], \\ \frac{\partial Q}{\partial N_2} &= -\frac{2N_2^2 N^2 (N_1^2 - N^2)^{1/2} [N_2^2 + 2(N^2 - N_2^2)]}{[N_1^2(N_1^2 - N^2) + N_1^2(N^2 - N_2^2)] (N^2 - N_2^2)^{1/2}}, \\ \frac{\partial Q}{\partial N} &= \frac{N}{(N_1^2 - N^2)^{1/2}} \left[ \frac{2N_2^2 N_1^2 (N^2 - N_2^2)}{[N_2^2(N_1^2 - N^2) + N_1^2(N^2 - N_2^2)] (N^2 - N_2^2)^{1/2}} + k_0 a \right] \end{aligned} \right\} \quad (8A)$$

把(8A)式代入(7A)式,则可得如正文中的(6)式。

### 参 考 文 献

- [1] T. Tamir; «*Integrated Optics*», (Second Corrected and Updated Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979), 62~66.
- [2] 马春生, 颜冠群; «*吉林大学自然科学学报*», 1988, No. 1 (Feb) (待发表)。
- [3] M. S. Sodha, A. K. Ghatak; «*Inhomogeneous Optical Waveguides*», (Plenum Press, New York, London, 1977), 24~29.
- [4] *ibid* [3], 20.
- [5] H. C. Casey, M. B. Panish; «*Heterostructure Lasers*», (Academic Press, New York, San Francisco, London, 1978), 43~46.
- [6] H. Furuta, H. Noda, A. Ihaya; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 2 (Feb), 322.
- [7] Y. Yamamoto, T. Kamiya, H. Yanai; *Appl. Opt.*, 1975, 14, No. 2 (Feb), 322.

## Analysis and computation on mode propagation and loss in ridge waveguide

MA CHUNSHENG AND LIU SHIYONG

(Jilin University)

(Received 14 December 1987; revised 30 January 1988)

### Abstract

After transforming the ridge waveguide into an equivalent slab waveguide by means of the effective index method, we have derived the expression of mode absorptive loss coefficient using the differentiation method. Based on this method, the optical characteristics of the ridge weak absorptive dielectric waveguide can be easily analysed and calculated with high accuracy.

**Key words:** integrated optics; ridge waveguide; effective index; absorptive loss.