

扩散平板光波导的等效阶跃平板波导方法

朱京平^{1,2} 唐天同¹ 侯 洵^{1,2} 李创社¹

(1 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 本文引入一种研究扩散光波导传播特性及设计计算的新方法——等效阶跃平板波导方法. 建立了扩散平板光波导的等效阶跃平板波导模型, 进行了一系列的模拟计算, 得出了一系列波导传播参量、结构参量与工艺参量之间的关系曲线. 这些曲线对于扩散平板光波导的设计计算、工艺参量选择等具有重要指导意义.

关键词 扩散平板光波导;等效阶跃平板波导方法

0 引言

钛扩散光波导基器件在光纤通信、光纤传感器、信息光学及非线性光学等领域有着重要而广泛的应用。扩散波导的折射率分布、扩散厚度、衬底折射率和表面折射率等波导结构参量决定了波导中的场分布,从而决定了扩散波导的传播特性,于是人们对于一定结构参量下扩散波导传播特性的研究一直很感兴趣。扩散波导中光波场的标量波动方程仅对某些折射率分布可以求解析解¹,对于一般梯度折射率的扩散平板波导,人们曾用不同的计算方法进行分析,综合起来,大致分两大类。第一类为近似解析法,如 WKB 方法²、微扰法³、有效折射率法⁴、光线传输方法⁵和变分法⁶等。第二类为数值法,如正弦/余弦展开法⁷,有限差分法⁸、有限元法⁹,矩阵方法¹⁰,动量阻抗边界方法¹¹,传递函数方法¹²与自洽场法¹³等。这些方法各有优点,但若某种方法能够通过图表的形式,根据加工条件迅速查知波导参量或根据所需波导参量迅速确定工艺条件,则更有利于工程应用。

在各种光波导中,阶跃平板结构最简单,光在其中传播的情况也研究得比较清楚,最具代表性.本文探索在折射率分布已知且扩散深度已知的情況下,用一个阶跃平板波导来等效梯度折射率分布扩散平板光波导.

1 扩散波导的等效阶跃平板波导模型

扩散波导梯度折射率分布具有多种形式,我们以高斯分布为例进行分析.取如图 1 的坐标系,其中,以扩散光波导表面为 $z=0$ 的平面.当扩散时间足够长,从而使 $d \ll D_B$ 时,波导中的 Ti^{4+} 浓度分布可用简单的 Gauss 分布近似^[4]

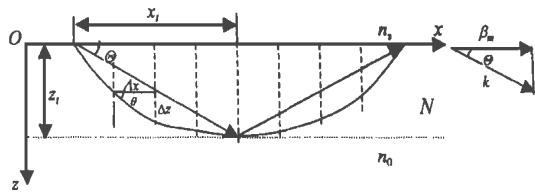


图 1 扩散波导的等效阶跃平板波导示意图

Fig. 1 Scheme of the equivalent step planar waveguide for diffused planar waveguide

$$f(z) = \frac{2\alpha}{\pi D_B} \exp\left(-\frac{z^2}{D_B^2}\right) \quad (z > 0) \quad (1)$$

$$D_B=2 \quad D_z t \quad (2)$$

$$D_z = D_0 \exp(-T_0/T) \quad (3)$$

式中, d 为原始未扩散钛膜厚度; α 为钛膜的原子数密度; D_B 为体扩散深度, 它是扩散温度和扩散时间的函数, 在扩散温度足够高、时间足够长时, D_B 才趋于一个常数. t 为扩散时间; T 为扩散绝对温度; D_s 为体扩散系数, 它是扩散温度的函数.

我们知道,传播常量 β 是表征波导传输性质的最重要的参量. 这里,我们就以传播常量相等为等效原则来建立扩散平板波导的等效模型.

等效折射率定义为导波传播常数 β 与光波矢 k_0 之比,即 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, 于是

$$\beta = k_0 n_{\text{eff}} \tag{4}$$

在有效折射率方法中,考虑上、下界面全反射相移 Φ_s, Φ_d , 则 m ($m=0, 1, 2, \dots$ 表示导模阶数) 阶导模存在的基本条件可用模式色散方程表示为^[4]

$$\sum \Phi_s + 2\Phi_d + 2\Phi_s = 2m\pi \quad (m=0, 1, 2, \dots) \tag{5}$$

式中,深 z_i 处传输距离沿 X 方向增加 Δz_i 时,相应的相位变化为^[4] $\Phi = k_0 n(z_i) \sin \theta \Delta z_i$, $\theta = \arccos(n_{\text{eff}}/n(z_i))$, 上界面反射相移 $2\Phi_s = -\pi$ 下界面相移 $2\Phi_d = -\pi/2$. 据此可以得出扩散波导的归一化折射率 b 与归一化厚度 V 间关系曲线(即 b - V 曲线), 以及有效折射率与扩散深度关系曲线等一系列关系曲线.

在此基础上,我们构造一个等效阶跃平板波导模型,其上包层与扩散波导相同,例如选为空气,而衬底折射率与扩散波导的衬底体折射率相等,波导层折射率为 N , 于是在这一阶跃平板波导中, m 阶导模的传播常数可表示为

$$\beta_m = k_0 N \sin \alpha_m \tag{6}$$

式中 α_m 为等效光传播矢量 $\vec{k} = k_0 N$ 与 m 阶导波传播矢量 $\vec{\beta}_m$ 间的夹角,下标 m 表示导模阶数,因而求传播常量 β 便转化为先求出相应的 α_m .

如图 1,由于扩散波导折射率分布的不均匀性,光在其中以曲线轨迹行进,而等效阶跃平板光波导区被等效为折射率为 N 的均匀介质层,于是我们将在扩散光波导中以曲线轨迹行进的光线用等效阶跃平板光波导中在上下界面以射线形式反射的光线来等效,并定义这一等效阶跃平板波导的波导层厚度等于扩散波导中导模透入波导的最大深度 z_t, z_b 可以根据形成 m 阶导模所需的横向驻波条件通过模拟获得. 如果再令 m 阶导模在等效阶跃波导中行进一个周期沿传播方向所走的距离等于它在扩散波导中行进一个周期沿传播方向所走的距离 $2x_{t,m}$, 则根据 $z_{t,m}$ 与 $x_{t,m}$ 的比值,将其求反正切就可以求出上述 α_m 值,即

$$\alpha_m = \arctan(z_{t,m}/x_{t,m}) \tag{7}$$

可见,求出 $z_{t,m}$ 及 N 即得到了等效阶跃波导,等效的原则是 m 阶导模在扩散波导中和相应阶跃平板波导中有相同的传播常量 β_m . 在 x_t 远小

于波导器件的特征尺寸时,这种等效是可以容许的.

2 模拟结果与分析

首先用 MATHCAD 模拟扩散平板波导有效折射率 n_{eff} 时取不同值时, m 阶导模的等效阶跃平板波导折射率 N_m 的变化情况,图 2 为模拟结果.

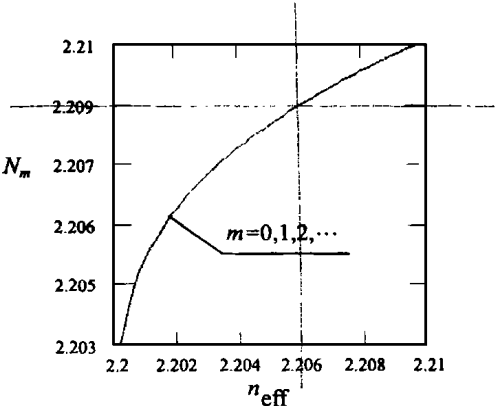


图 2 m 阶导模等效阶跃平板波导折射率 N_m 与扩散波导有效折射率 n_{eff} 关系图

Fig. 2 The index N_m of m th order mode for the equivalent step lanar waveguide corresponding to the diffused planar waveguide effective index n_{eff}

可见,对于同一 n_{eff} , 不管 m 取何值,对应的等效阶跃平板波导的波导层等效折射率与扩散波导有效折射率关系曲线完全重合,其等效阶跃平板波导折射率都相等,即 n_{eff} 与 N 有一一对应关系,这证实了平板波导等效过程是合理的. 因此,后续各阶模式的等效平板波导层折射率用 N 表示即可. 有了这一图示,我们就可以从中直接查出某一有效折射率相应的等效波导层折射率.

不同模式数所需扩散深度 D_B (单位: μm) 与等效平板波导折射率 N 间关系模拟结果如图 3

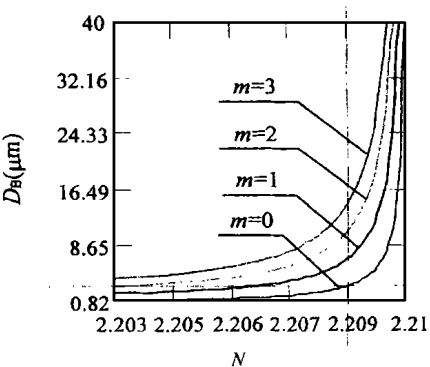


图 3 不同模数扩散深度 D_B 与等效阶跃平板波导折射率 N 间关系曲线

Fig. 3 Diffusion depth D_B versus the equivalent step planar waveguide index N

所示·可见,若要扩散形成 m 个导模的波导,则扩散深度越小,导模等效折射率越大,等效折射率随扩散深度的增加而减小,开始时,各阶导模等效折射率减小很快,也就是说“变化很陡峭”,而扩散到一定深度之后,等效折射率随深度的变化就越来越缓和了;同时还可以看到,同一扩散深度下,模式阶数越高,等效阶跃平板波导的折射率就越小·

根据图 3 和图 2,就可以得到某一导模传播常量所需的扩散深度,从而决定形成某阶模式所需的扩散温度和扩散时间参量组合·

等效阶跃平板波导中 m 阶导模波导等效折射率 N 、波导厚度 $z_{t,m}$ 及传播方向 Θ 间关系模拟结果如图 4·可见, m 阶导模的等效平板波导厚度 $z_{t,m}$ 随等效折射率 N 而变化,在 N 从衬底折射率 n_0 开始的很大一个范围内(图中从 2.203 到 2.207)变化斜率趋于零,到接近表面折射率 n_s (图中 n_s 取 2.21)时斜率逐渐增大,直到 n_s 处斜率趋于无穷大;同一 N 取值,导模阶数越高,等效波导的厚度也越大·图中还表示各阶模式的 N - Θ 关系曲线重合,因而 Θ 可用 N 来表示·

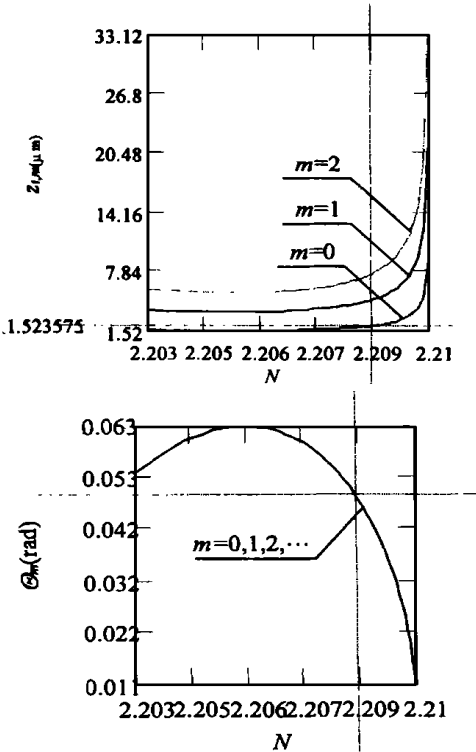


图 4 等效阶跃波导中折射率 N 与 m 阶导模波导厚度 $z_{t,m}$ 及传播方向 Θ 间的关系曲线

Fig. 4 The waveguide thickness $z_{t,m}$ and transmission direction Θ versus equivalent index N in the equivalent step planar waveguide

我们知道,加工条件不同,所得到的折射率分布不同;在加工条件变化不大的情况下,折射率分布曲线类型确定,但扩散深度有所不同·图 5 就表示了某一种折射率分布下,不同扩散深度导致的等效阶跃平板波导各参量的变化情况·图 6 是对图 5 中等效折射率和导模传播方向随扩散深度变化曲线的放大·

例如,当一个扩散平板光波导的有效折射率为 2.206 时,由图 2 可得其等效折射率 N 为 2.209, N 知道后,由图 4 可以确定单模时该扩散波导的等效波导厚度为 2.1 μm ,传播波矢与光轴

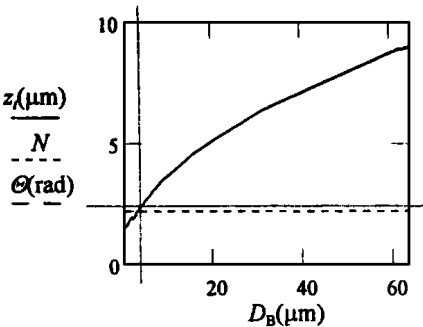


图 5 等效单模阶跃波导各参量 $z_{t,m}$ 、 N 、 Θ 随扩散波导扩散深度 D_B 变化关系

Fig. 5 The parameters of single mode equivalent step planar waveguide versus diffusion depth D_B of diffused planar waveguide

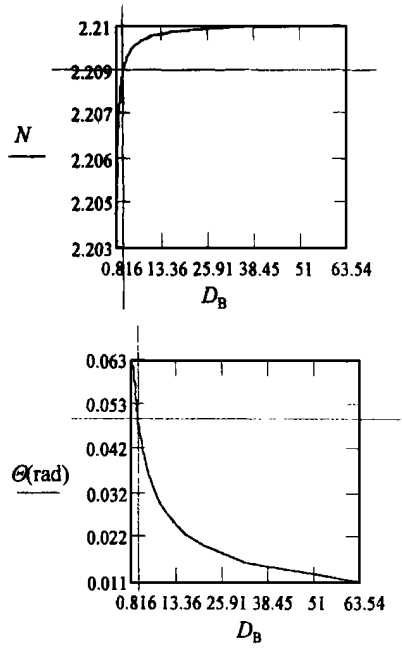


图 6 等效单模平板波导参量 N 、 Θ 随扩散波导扩散深度 D_B 变化关系

Fig. 6 The index N and transmission direction Θ of the equivalent step planar waveguide versus diffusion depth D_B of diffused planar waveguide

夹角为 0.048rad , 从而就可以得到其等效阶跃平板波导及光在其中的等效传播情况; 同时, 由图 3 还可得出扩散深度为 $3\text{ }\mu\text{m}$, 从而确定其加工工艺条件为 1050°C , 10h .

3 结论

通过对扩散平板光波导中光传播参量、扩散波导结构参量、扩散波导工艺参量与等效阶跃平板波导各参量之间的关系模拟, 可以发现扩散波

导的等效阶跃平板波导模型是一种直观、有效处理扩散平板波导中光传播的方法; 所得出的一系列波导结构参量与工艺参量之间的关系曲线, 可以帮助我们根据加工条件的不同, 很快建立起相应的等效阶跃平板波导, 以方便地进行传播及性能分析. 也可以根据所需传播性质, 给出其阶跃平板波导参量, 再根据关系曲线查出其工艺参量进行加工. 这对于扩散平板光波导的实际加工、设计具有重要意义.

参考文献

- 1 Conwell E M. Modes in optical waveguides formed by diffusion. Appl Phys Lett, 1973, 23(6) : 328~329
- 2 Anemogiannis E, Glytsis E N, Gaylord T K. Efficient solution of eigenvalue equations of optical waveguiding structures. J Lightwave Technol, 1994, 12(12) : 2080~2084
- 3 Srivastave R, Kar C K, Ramaswamy R V. WKB analysis of planar surface waveguides with truncated index profiles. J Lightwave Technol, 1987, 5(11) : 1605~1609
- 4 Hocker G B, Burns W K. Modes in diffused optical waveguides of arbitrary index profile. IEEE J Quantum Electron, 1975, 11(6) : 270~276
- 5 石邦任, 文雨水. 高斯型折射率分布的扩散光波导模式. 光学学报, 1984, 4(6) : 541~545
- 6 Korotky S K, Minford W J, et al. Mode Size and Method for Estimating the Propagation Constant of Single-Mode Ti : LiNbO₃ Strip Waveguides. IEEE J Quantum Electron, 1982, 18(10) : 1796~1801
- 7 Weisshaar A, Tripathi V K. Modal analysis of step discontinuities in graded-index dielectric slab waveguides. J Lightwave Technol, 1992, 10(5) : 593~602
- 8 Huang Weiping, Xu Chenglin, Chu Saitak, et al. The finite-difference vector beam propagation method: analysis and assessment. J Lightwave Technol, 1992, 10(3) : 295~305
- 9 Katstriku F A, Rahman B M A, Thomas K, et al. Finite element analysis of diffused anisotropic optical waveguides. J Lightwave Technol, 1996, 14(5) : 780~786
- 10 Ghatak A K, Thyagarajan K, Shenoy M R. Numerical analysis of planar optical waveguides using matrix approach. J Lightwave Technol, 1987, 5(5) : 660~667
- 11 Weisshaar A. Impedance boundary method of moments for accurate and efficient analysis of planar graded-index optical waveguides. J Lightwave Technol, 1994, 12(11) : 1943~1950
- 12 冯莹, 李湘荣, 李海洋等. 扩散平面光波导的传递函数方法. 光学学报, 1999, 19(1) : 50~56
- 13 高伯龙, 金世龙. 光波导的自洽场计算 I. 扩散型平面波导. 光学学报, 1999, 1(5) : 626~632
- 14 Burns W K, Klein P H, West E J. Ti diffusion in Ti : LiNbO₃ planar channel optical waveguides. J Appl Phys, 1979, 50(10) : 6175~6182

THE EQUIVALENT STEP PLANAR WAVE-GUIDE METHOD FOR DIFFUSED PLANAR WAVE-GUIDE

Zhu Jingping^{1,2}, Tang Tiantong¹, Hou Xun^{1,2}, Li Chuangshe¹

¹ School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049

² Xi'an Institute of Optics & Fine Mechanics, C.A.S., Xi'an 710068

Received date: 2000-05-22

Abstract The equivalent step planar wave-guide method is proposed to study the propagation properties and design of diffused planar wave-guide. The model was established, and a set of simulation has been done, and a series of relationship curves among the parameters of wave-guide propagation, structure and technics are obtained. These curves are helpful to diffused planar wave-guide design and technical parameter selection.

Keywords Diffused planar optical wave-guide; Equivalent step planar wave-guide method



Zhu Jingping was born in 1967, in Shanxi Province, China. She received the Ph.D. degree in Physical Electronics from Xi'an Jiaotong University in 2000. She is now an associate-Professor in the Department of Electronic Science & Technology, Xi'an Jiaotong University. Her current research interests are the theory and device of optronics, guide-wave optics, and their application in fiber communication, optical sense, optical network, and optical storage, etc.