

文章编号: 0253-2239(2008)12-2267-05

# 聚合物脊形光波导的变分有效折射率法分析

廖进昆 唐雄贵 陆荣国 李和平 刘永智

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 聚合物脊形光波导是聚合物集成光电子器件的重要构成单元。利用有效折射率法计算聚合物脊形光波导的横向折射率分布及有效折射率, 将各区域中的光场分布近似用分段函数表达。基于导模满足的标量波动方程, 利用变分法确定变分参量, 以求得准确的横向光场分布。对聚合物脊形多模光波导基模和高阶模的色散特性与横向场分布进行分析, 研究了波导结构参数对色散特性的影响, 计算出 TM 基模和高阶模的光场分布, 得出了聚合物脊形光波导的单模传输条件。研究表明, 该方法计算量小、精度高, 对聚合物光电子器件中脊形光波导的理论分析与设计优化提供了简单高效的方法。

**关键词** 电光有机聚合物; 脊形光波导; TE、TM 模; 有效折射率法; 变分法

**中图分类号** TN252.34 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2267

## Variational Effective Index Analysis of Polymer Rib Optical Waveguide

Liao Jinkun Tang Xionggui Lu Rongguo Li Heping Liu Yongzhi

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** Polymer rib optical waveguide is an important component in polymeric integrated optoelectronic devices such as electro-optic modulators. By using effective index method (EIM) to calculate the transverse refractive index distribution and effective index of polymer rib waveguide, the optical field distribution in each region is expressed as piecewise functions approximately. Based on the scalar wave equation that governs the guided modes, the variational parameter is determined by variational method (VM) for obtaining accurate transverse optical field distribution. The dispersion characteristics and transverse field distribution of the fundamental and higher-order modes are analyzed for polymer rib multimode waveguide. An algorithm is implemented to study the effect of the structural parameters and dimensions on the dispersion characteristics, and the optical field distribution of the fundamental and higher-order modes for TM modes is calculated. The single-mode transmission condition for polymer rib optical waveguide is obtained. The approach has advantages of high precision, small calculation complexity and high efficiency, which will provide theoretical reference and optimization method for the fabrication of polymeric electro-optic devices.

**Key words** electro-optic organic polymer; rib optical waveguide; TE, TM mode; effective index method (EIM); variational method (VM)

## 1 引 言

无机非线性光学材料用于制备电光调制器等有源器件存在一定困难<sup>[1]</sup>, 近年来, 有机聚合物光电子器件受到人们更为广泛的关注, 是当前聚合物光子学领域的研究热点之一。与无机晶体材料相比较, 非线性电光有机聚合物具有微波介电常数低, 易于实现光波与微波的相速匹配; 电光相互作用区短、响应速度快、电光系数高、半波电压低; 可与多种衬底

材料结合, 且制备工艺相对简单等优点<sup>[2,3]</sup>。因此, 电光有机聚合物对于制备高性能光电子器件具有很强的吸引力<sup>[4~6]</sup>。

在有机聚合物光电子器件中, 光波导是重要的结构单元。根据聚合物材料的特性, 光波导制备主要运用旋涂和反应离子束蚀刻等工艺, 光波导采用脊形波导结构较为适合, 其横截面结构如图 1 所示。为了设计出性能优异的聚合物光电子器件, 必须首

收稿日期: 2008-03-21; 收到修改稿日期: 2008-05-16

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z269)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0805)资助课题。

作者简介: 廖进昆(1962—), 男, 副教授, 主要从事集成光学器件、量子信息学等方面的研究。E-mail: jklio@uestc.edu.cn

先从理论上对光波导进行分析计算。对脊形光波导而言,由于结构复杂没有严格的解析解,应采用数值方法或近似法进行分析。光波导分析方法常用的有:转移矩阵法、模耦理论、有效折射率法、有限元法、时域有限差分法和束传播法等<sup>[7~9]</sup>。

本文将有效折射率法与变分法相结合,分析了聚合物脊形光波导中基模和高阶模的色散特性与场分布。一般而言,有效折射率法可以分析光波导的色散特性,计算量不大,但是要准确计算横向场的分布存在相当的难度,采用变分法能够获得较精确的光场分布。研究表明,将有效折射率法与变分法相结合,发挥了两种方法的长处,既能获得准确的横向场分布又能对色散特性进行分析。

## 2 基本理论

脊形光波导的结构如图 1 所示,脊的宽度为  $w$ ,上、下包层的折射率分别为  $n_1$  和  $n_3$ ,芯层的折射率为  $n_2$ ;芯层的厚度为  $d$ ,脊处的厚度为  $D$ 。在等效的平板波导中,分别在区域 I、II、III 中考虑 TE、TM 模,利用有效折射率法得到如下本征方程:

$$\gamma_2 H = \arctan\left(c_1 \frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) + \arctan\left(c_2 \frac{\gamma_3}{\gamma_2}\right) + q\pi, \quad (1)$$

$(q = 0, 1, 2, \dots)$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff1}}^2 - n_1^2}, \\ \gamma_2 &= k_0 \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff1}}^2}, \\ \gamma_3 &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff1}}^2 - n_3^2}, \\ k_0 &= 2\pi/\lambda_0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0, \quad (3)$$

式中  $i=1, 2, 3$ , 分别对应上述三个区域。在区域 I

和 III 中,  $H = d$ , 在区域 II 中,  $H = D$ 。对于基模  $q = 0$ ,  $\lambda_0$  为自由空间工作波长。对于 TE 模,  $c_1 = c_2 = 1$ ; 对于 TM 模,  $c_1 = n_2^2/n_1^2$ ,  $c_2 = n_2^2/n_3^2$ 。求解本征方程 (1) 可得出三个区域的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ , 即有效折射率的横向分布。

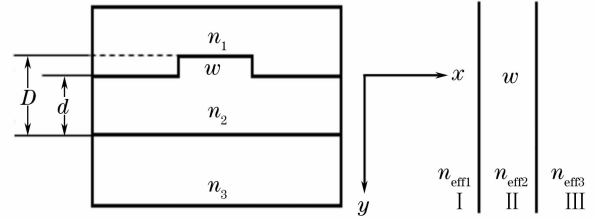


图 1 脊型波导结构及等效的平板波导

Fig. 1 Rib waveguide structure and its equivalent slab waveguide

根据有效折射率的横向分布,考虑下述本征方程:

$$\gamma_2 w = \arctan\left(c_1 \frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) + \arctan\left(c_2 \frac{\gamma_3}{\gamma_2}\right) + p\pi, \quad (4)$$

$(p = 0, 1, 2, \dots)$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff2}}^2 - n_{\text{eff1}}^2}, \\ \gamma_2 &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff2}}^2 - n_{\text{eff1}}^2}, \\ \gamma_3 &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff2}}^2 - n_{\text{eff3}}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

对于 TE 模,  $c_1 = n_{\text{eff2}}^2/n_{\text{eff1}}^2$ ,  $c_2 = n_{\text{eff2}}^2/n_{\text{eff3}}^2$ ; 对于 TM 模,  $c_1 = c_2 = 1$ 。求解方程 (4) 可得出脊型光波导中 TE<sub>pq</sub> 或 TM<sub>pq</sub> 模的等效折射率  $n_{\text{eff}}$ , 其中 pq 是模式标号。

如图 1 所示,由有效折射率法<sup>[10]</sup>可得平板波导  $y$  方向近似的场分布函数,在区域 I 和 III 中:

$$Y_1(y) = \begin{cases} \cos(\gamma_2 d + \alpha) \exp[-\gamma_1(y-d)], & y > d \\ \cos(\gamma_2 y + \alpha), & 0 < y < d \\ \cos \alpha \exp(\gamma_3 y), & y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff1}}^2 - n_1^2}, \quad \gamma_2 = k_0 \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff1}}^2}, \quad \gamma_3 = k_0 \sqrt{n_{\text{eff1}}^2 - n_3^2}, \\ \alpha &= -\arctan\left(c_2 \frac{\gamma_3}{\gamma_2}\right) + q\pi, \quad (q = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\alpha = -\arctan\left(c_2 \frac{\gamma_3}{\gamma_2}\right) + q\pi, \quad (q = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

在区域 II 中:

$$Y_2(y) = \begin{cases} \cos(\gamma_2' D + \beta) \exp[-\gamma_1'(y-D)], & y > D \\ \cos(\gamma_2' y + \beta), & 0 < y < D \\ \cos \beta \exp(\gamma_3' y), & y < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_1' &= k_0 \sqrt{n_{\text{eff2}}^2 - n_1^2}, \quad \gamma_2' = k_0 \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff2}}^2}, \quad \gamma_3' = k_0 \sqrt{n_{\text{eff2}}^2 - n_3^2}, \\ \beta &= -\arctan\left(c_2 \frac{\gamma_3'}{\gamma_2'}\right) + q\pi, \quad (q = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\beta = -\arctan\left(c_2 \frac{\gamma_3'}{\gamma_2'}\right) + q\pi, \quad (q = 0, 1, 2, \dots) \quad (11)$$

在(8)式与(11)式中,对 TE 模  $c_2=1$ ,对 TM 模  $c_2=n_2^2/n_3^2$ 。

同样,平板波导  $x$  方向近似的场分布为

$$X(x) = \begin{cases} \cos \phi \exp[\gamma_1''(x + \omega/2)], & x < -\omega/2 \\ \cos[\gamma_2''(x + \omega/2) + \phi], & -\omega/2 < x < \omega/2 \\ \cos(\gamma_2''\omega + \phi) \exp[-\gamma_3''(x - \omega/2)], & x > \omega/2 \end{cases} \quad (12)$$

式中

$$\gamma_1'' = k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{eff}1}^2}, \quad \gamma_2'' = k_0 \sqrt{n_{\text{eff}2}^2 - n_{\text{eff}}^2}, \quad \gamma_3'' = k_0 \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{eff}3}^2}, \quad (13)$$

$$\phi = -\arctan\left(c_1 \frac{\gamma_3''}{\gamma_2''}\right) + p\pi, \quad (p = 0, 1, 2, \dots) \quad (14)$$

上式中  $c_1 = n_{\text{eff}2}^2/n_{\text{eff}1}^2$  时为 TE 模,  $c_1 = 1$  时为 TM 模。

为得出较精确的光场分布,考虑二维标量波动方程<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + k_0^2 [n^2(x, y) - n_{\text{eff}}^2] \psi = 0, \quad (15)$$

利用上述有效折射率法的结果,光波导中场分布  $\psi(x, y)$  可表示为子区域中场的叠加,即

$$\psi(x, y) = X(x)[Y_1(y) + RY_2(y)], \quad (16)$$

其中  $X(x)Y_1(y)$  与  $X(x)Y_2(y)$  分别是区域 I、III 和 II 中的近似光场分布,  $R$  为待定的变分参量。为确定变分参量,将(15)式两边乘以  $\psi$ ,在横截面计算窗口内积分:

$$\iint \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right] \psi dx dy + k_0^2 \iint n^2 \psi^2 dx dy - k_0^2 n_{\text{eff}}^2 \iint \psi^2 dx dy = 0. \quad (17)$$

将(16)式代入(17)式,整理得到如下的二次代数方程:

$$aR^2 + bR + c = 0, \quad (18)$$

计算出  $a, b, c$  后代回(18)式可以解出变分参量  $R$ , 计算表明变分参量有两个解,必须取  $|R|$  较小的一个,由(16)式即可得出光波场的横向分布。

### 3 脊形波导中 TE、TM 模的色散特性分析

脊形波导结构如图 1 所示,上包层采用紫外固

化环氧 NOA61,其折射率  $n_1=1.55$ ;下包层采用紫外固化环氧 UV15,其折射率  $n_3=1.50$ ;芯层是由聚砜中掺入重量百分比 25% 的生色团 ICP-E 构成,折射率为  $n_2=1.67$ (以上三种材料的折射率分别由各自的生产公司 Norland、Masterband 和 Corning Corp. 提供)。 $\omega$  是脊形波导中脊的宽度,脊的高度取为  $D-d=0.3 \mu\text{m}$ 。利用上述理论对 TE、TM 模分别进行分析,取脊宽的变化范围为  $3\sim 9 \mu\text{m}$ ,步长  $\Delta\omega=1 \mu\text{m}$  其有效折射率随脊宽的变化曲线如图 2 所示。

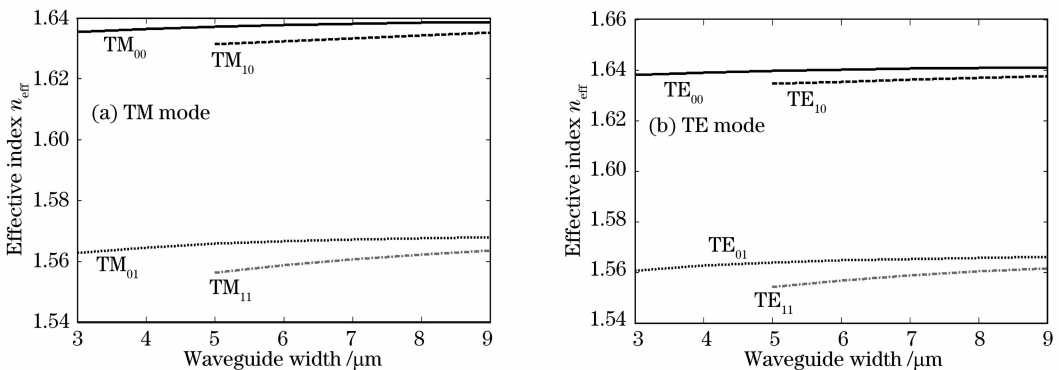


图 2 有效折射率随脊宽的变化曲线

Fig. 2 Curves of effective refractive index versus rib width

工作波长的变化范围取为  $1.0\sim 1.7 \mu\text{m}$ ,步长  $\Delta\lambda=0.1 \mu\text{m}$ ,TE、TM 基模等效折射率随波长的变

化曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出等效折射率随波长的增加而单调下降。

脊高的变化范围取为  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ , 步长  $\Delta h = 0.1 \mu\text{m}$ , TE、TM 基模等效折射率随脊高的变化曲

线如图 4 所示。由图 4 可见基模等效折射率随脊高的增加而单调增加。

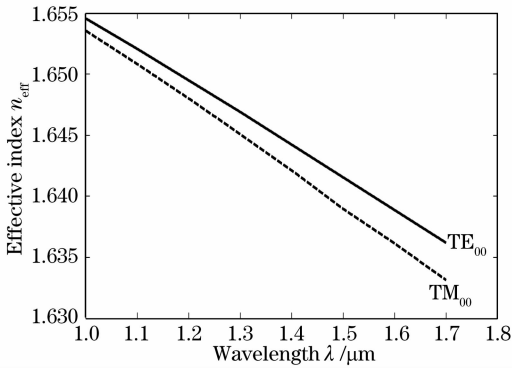


图 3 基模有效折射率随工作波长的变化曲线

Fig. 3 Fundamental mode's effective refractive index versus operating wavelength

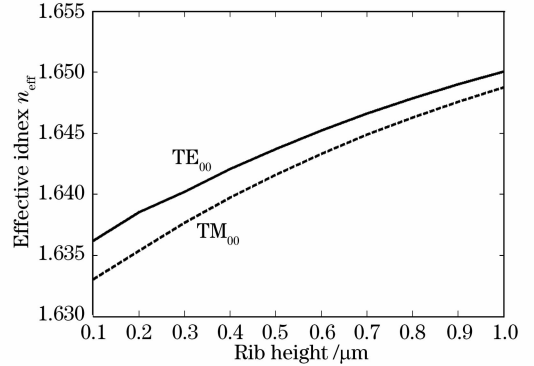


图 4 基模有效折射率随脊高的变化曲线

Fig. 4 Fundamental mode's effective refractive index versus rib height

从上述计算结果可以看出, 聚合物脊型光波导具有下列一些特点: 1) 有效折射率随脊宽的变化较缓慢, 随着模式阶数的增加有效折射率明显降低; 2) 等效折射率随波长的增加单调下降, 随脊高的增加单调上升; 3) 在结构参数与工作波长相同的情况下, 同一阶 TM 模的有效折射率较 TE 模的有效折射率要小。对多模光波导而言, 高阶模的传输条件对应于相应的本征方程具有实解, 由此可以得到: 当芯层厚度与脊宽分别满足  $d \leq 1.5 \mu\text{m}$ ,  $w \leq 5 \mu\text{m}$  时, 聚合物光波导实现单模传输<sup>[12]</sup>。

#### 4 TM 模的横向光场分布

应用变分有效折射率法, 对脊型光波导计算出

TM 基模和高阶模的横向场分布, 对应的光强分布如图 5 所示, 其中波导材料结构参数为  $D = 1.9 \mu\text{m}$ ,  $d = 1.6 \mu\text{m}$ ,  $w = 6 \mu\text{m}$ ; 工作波长为  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 。计算窗口选为  $x: [-10 \mu\text{m}, +10 \mu\text{m}]$ ;  $y: [-4 \mu\text{m}, +6 \mu\text{m}]$ 。

图 5 分别对  $\text{TM}_{00}$ 、 $\text{TM}_{10}$  给出了光场的横向分布, 其中图 5(a)、图 5(b) 是由变分有效折射率法计算所得的结果, 图 5(c)、图 5(d) 是用商用软件 Optiwave 仿真得出的光场分布。比较可见, 其基模与高阶模的光斑花样及其位置十分吻合, 这表明使用变分有效折射率法进行光场分布的计算, 在保证精度一致的前提下大大降低了计算的复杂度。同样, 利用此方法可计算出 TE 模的光场分布。

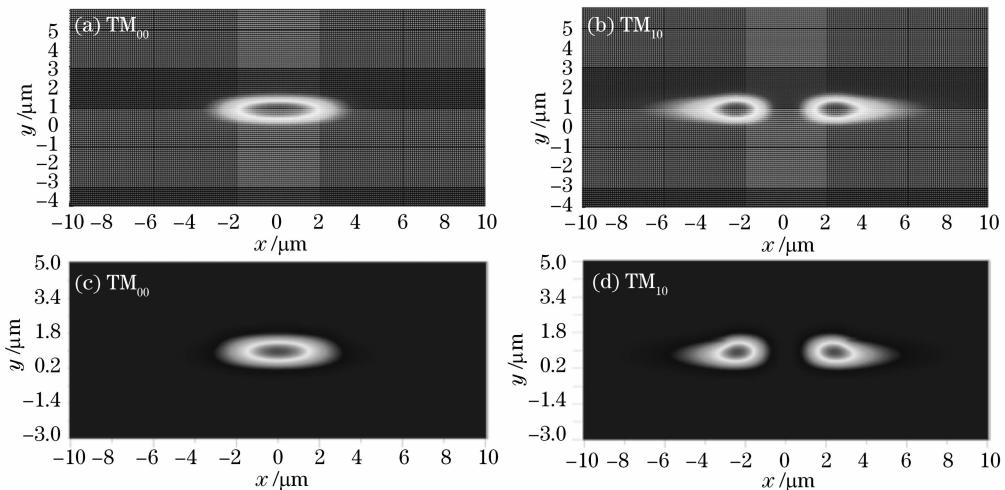


图 5 基模和高阶模的横向场分布

Fig. 5 Transverse field distribution of fundamental and higher-order modes

## 5 结 论

本文将有效折射率法与变分法相结合,分析了有机聚合物多模光波导的色散特性并计算出 TM 基模和高阶模的横向场分布,同时还对上述材料制成的脊形光波导确定出单模传输条件。研究表明,该方法计算量小、精度高,其计算结果与当前流行的商业软件的分析结果相符,为有机聚合物脊型光波导的设计提供了理论依据和数值分析方法。

**致谢** 感谢美国康宁公司贺明谦博士的长期合作与支持。

## 参 考 文 献

- Ed L. Wooten, K. M. Kissa, A. Yi-Yan *et al.*. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2000, **6**(1): 69~82
- S. S. Lee, S. M. Garner, V. Chuyanov *et al.*. Optical intensity modulator based on a novel electrooptic polymer incorporating a high  $\mu\beta$  chromophore[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(5): 527~532
- G. L. Li, P. K. L. Yu. Optical intensity modulators for digital and analog applications[J]. *IEEE J. Light. Technol.*, 2003, **21**(9): 2010~2030
- Yongqiang Shi, Cheng Zhang, Hua Zhang *et al.*. Low (Sub-1-Volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophore shape[J]. *Science*, 2000, **288**: 119~122
- Mark Lee, Howard E. Katz, Christoph Erben *et al.*. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer[J]. *Science*, 2002, **298**: 1401~1403
- George T. Paloczi, Yanyi Huang, Amnon Yariv *et al.*. Replicated electro-optic polymer Mach-Zehnder modulator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(10): 1662~1664
- Zhang Yali, Zhang Tao, Zhu Ninghua *et al.*. Variational analysis of buried ion-exchanged optical waveguide by using Hermite-Gaussian field approximations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 981~986
- 张雅丽,张 韬,祝宁华等. 掩埋型离子交换玻璃光波导的变分分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 981~986
- Xu Jianfeng, Bo Zhongyang, Bai Jian *et al.*. Synthetic subdomain method for large-scale integrated optical waveguide FDTD simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 5~9
- 徐建锋,薄中阳,白 剑等. 大规模集成光波导时域有限元差分法仿真的子域合成法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 5~9
- H. Nishihara, M. Haruna, T. Suhara. *Integrated Optical Circuits* [M]. Liang Ruilin transl., Beijing: Science Press, 2004
- 西原浩,春名正光,栖原敏明著. 集成光路[M]. 梁瑞林译,北京: 科学出版社, 2004
- Kenji Kawano, Tsutomu Kitoh. *Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equations and the Schrödinger Equation* [M]. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2001
- Weiping Huang, Hermann A. Huas. A simple variational approach to optical rib waveguides[J]. *IEEE J. Light. Technol.*, 1991, **9**(1): 56~61
- Richard A. Soref, Joachim Schmidtchen, Klaus Petermann. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub> [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(8): 1971~1974