

文章编号: 1001-3806(2003)05-0431-03

## 波导调制器的 SEM-BPM 法模拟

甘小勇 刘永智 廖进昆

(电子科技大学光电信息学院, 成都, 610054)

**摘要:** 三维级数展开的光束传播法(3D-SEM-BPM)将 BPM 方程转化为一阶常微分方程组,具有计算方法简单和计算效率高的优点。运用该方法分析了铌酸锂 Mach-Zehnder 结构的电光波导调制器,模拟了光场在器件中的分布情况,获得了这种调制器模场损耗曲线和最佳结构参数。模拟时引入正切函数变换将无限平面映射为有限平面,避免了边界截断问题。

**关键词:** 级数展开法(SEM);光束传播法(BPM);铌酸锂调制器;正切函数

**中图分类号:** TN252 **文献标识码:** A

### SEM-BPM simulation for waveguide modulators

Gan Xiaoyong, Liu Yongzhi, Liao Jinkun

(School of Optic-Electronic Information, UESTC, Chengdu, 610054)

**Abstract:** Three-dimensional beam propagation method based on the series expansion method (3D-SEM-BPM) transform the BPM into the first-order normal differential equations. The method has the merits of simple calculation and high calculation efficiency. The lithium niobate electro-optic waveguide modulator with Mach-Zehnder structure is simulated with this method. We got its optical field distribution and acquired its optimal structure and its power loss curve. The function of tangent is applied to map the infinite space into a finite space to avoid boundary truncation.

**Key words:** series expansion method(SEM);beam propagation method(BPM);lithium niobate modulators;function of tangent

## 引言

光波导调制器是光纤通信、CATV、以及光信号处理等光电系统中的关键器件之一,其中 LiNbO<sub>3</sub> 的电光调制器由于具有良好的电光性能和易集成化等优点而获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。文中将分析 Mach-Zehnder 结构的 LiNbO<sub>3</sub> 的电光调制器,模拟其光场分布以及光场在调制器中的传输情况,并对该结构调制器进行优化设计。

采用计算机模拟分析是设计电光器件的有效手段。电光器件的数值模拟设计方法有耦合模理论、有限元法、光束传播法等。其中光束传播法(BPM)<sup>[2]</sup>由于能分析任意折射率分布波导结构,而且能直观分析模场的分布,传输、畸变等而获得广泛的应用。早期的 BPM 法是快速 Fourier 变换的 BPM(FFT-BPM)<sup>[2]</sup>,但其在计算效率、适用范围和

数值精度上均有很大的缺陷,尤其是在计算复杂结构波导时显得无能为力;后来人们提出用有限差分束传播法(FD-BPM)<sup>[3]</sup>作为模拟手段,该方法具有公式简单、无条件稳定、与波导的结构无关等优点,但存在导出矩阵较大和边界截断等缺点。因此本文中基于级数展开法的光束传播法(SEM-BPM)<sup>[4]</sup>来模拟电光调制器,该方法将 BPM 方程转换为一阶常微分方程组,计算效率和数值精度较高,且比 FD-BPM 和 FFT-BPM 的导出矩阵小、方法简单。另外,由于此前对该类调制器的模拟分析,都是借助于有效折射率法(EIM),将三维问题转换为二维问题,只适用于折射率变化较缓的波导,在处理弯曲、分支波导时存在较大的困难。因此,将用三维形式的 SEM-BPM 来分析该类调制器,且在处理边界时引入正切函数变换<sup>[5]</sup>将无限域归一为单位有限域,避免了边界截断问题,使计算的精度较高。

## 1 基本原理

假定光波导在  $y$  方向是均匀的,即  $\partial/\partial y = 0$ ,则对 TE 波而言,  $E_x = E_z = H_y = 0$ , TE 波中的任一分

作者简介:甘小勇,男,1973 年 1 月出生。博士研究生。研究方向为光纤与光纤通信系统。

收稿日期:2002-11-08;收到修改稿日期:2003-02-18

量均可由  $E_y$  来表示, 设  $E_y = E(x, z) \exp(-jk_0 n_0 z)$ 。由 Maxwell 标量波动方程及傍轴近似条件, 可以得出:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + vE \quad (1)$$

式中,  $v = 2jkn_0$ ,  $v = k^2 [n^2(x, y, z) - n_0^2]$ ,  $n(x, y, z)$  为电光波导的折射率分布,  $k$  为自由空间的波数,  $n_0$  为参考折射率,  $E$  为待求电场。

在横向  $(x, y)$  方向引入正切变换:

$$\begin{aligned} x &= x' \cot(\alpha) \\ y &= y' \cot(\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $x', y'$  为转换比例因子, 根据文献[5], 最佳转换比例因子为波导在该方向芯区的半宽。经过变换, 无限平面  $x_v[-\infty, +\infty], y_v[-\infty, +\infty]$  映射为单位平面  $x_v[0, 1], y_v[0, 1]$ 。则方程(1)变为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{d}{dx} \frac{\partial^2 E}{\partial x'^2} + \frac{d}{dy} \frac{\partial^2 E}{\partial y'^2} + vE \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $v = k^2 [n^2(x', y', z) - n_0^2]$ 。将电场  $E(x', y', z)$  在区间  $x_v[0, 1], y_v[0, 1]$  展开可得:

$$\begin{aligned} E(x', y', z) &= \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} C_{mn}(z) \sin(m\pi x') \sin(n\pi y') = \\ &= \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} C_{mn}(z) \sin(m\pi x') \sin(n\pi y') \end{aligned} \quad (4)$$

式中的正整数  $N_x, N_y$  分别为  $x, y$  方向上所取基函数的项数,  $C_{mn}(z)$  为展开系数, 展开基函数  $\sin(m\pi x')$ ,  $\sin(n\pi y')$  为一组正交完备的正弦函数:

$$\begin{aligned} \sin(m\pi x') &= \sqrt{2} \sin(m\pi x) \\ \sin(n\pi y') &= \sqrt{2} \sin(n\pi y) \end{aligned} \quad (5)$$

很显然, 基函数在区域  $x_v[0, 1], y_v[0, 1]$  的边界自然满足边界条件, 也就没有了边界截断问题。

将(4)式代入方程(3), 两边乘以基函数  $\sin(l\pi x')$ ,  $\sin(t\pi y')$  并在单位区域积分得:

$$\sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} \left[ -\delta_{lm} \delta_{tn} \frac{dC_{mn}(z)}{dz} + \frac{1}{4} (I_l + S(z) - k^2 n_0^2 \delta_{lm} \delta_{tn}) C_{mn}(z) \right] = 0 \quad (6)$$

式中,  $I_i$  为 4 个二重积分, 文献[5]中给出了其解析表达式,  $\delta$  为 Kronecker delta 函数, 式中,  $S(z) = \int_0^1 \int_0^1 k^2 n^2(x', y', z) \sin(l\pi x') \sin(t\pi y') \sin(m\pi x') \sin(n\pi y') dx' dy'$ 。方程(6)为一阶常微分方程组, 只要给定初始条件  $E(x', y', z=0)$ , 便可以获得场在  $z > 0$  各处的分布。

## 2 模拟结果

调制器平面结构如图 1 所示。假设衬底材料的

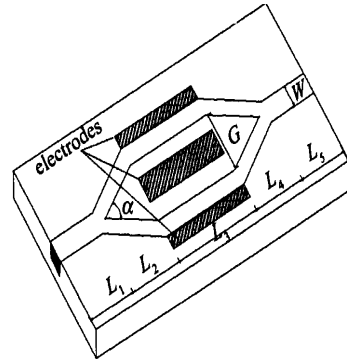


Fig. 1 Schematic of Mach-Zehnder modulator structure

折射率为  $n_b = 2.15$ ,  $D = 0.002$ , 工作波长为  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。根据文献[6], 一般的扩散形成的波导的横向  $(x)$  方向折射率分布表示为:

$$n(x, y) = n_b + n \exp[-(y/d)^2] g(2x/W) \quad (7)$$

式中,  $x, y$  分别表示波导的宽度和深度方向;  $n$  为波导折射率,  $n_b$  为衬底折射率,  $n$  为  $n$  与  $n_b$  之差的最大值,  $W$  为波导宽度,  $d$  为扩散深度, 且有  $g(2x/W) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \frac{W/2+x}{d} + \operatorname{erf} \frac{W/2-x}{d} \right]$ , 当加上与 TE 模方向一致的外加电场  $E$  时, 则  $L_3$  波导中的折射率改变为:

$$n = n_b - \frac{1}{2} n(x, y)^2 \chi_{33} E = n_b - \frac{1}{2} n(x, y)^2 \chi_{33} \frac{V}{D} \quad (8)$$

式中,  $\chi_{33}$  为铌酸锂的电光系数,  $\int$  为电光重叠积分因子,  $V$  为外加电压,  $D$  为电极间距。

文献[7]中用 3D-SEM-BPM 方法计算了阶跃光纤的基模的有效折射率, 其误差仅为 0.001%, 且计算的电场与解析解吻合较好, 表明该方法是一种高精度的数值计算方法。对图 1 的电光器件的模拟表明, 为获得较大消光比和较低的插损, 波导的最佳参数为  $L_1 = L_5 = 2500 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = L_4 = 2000 \mu\text{m}$ ,  $L_3 = 11000 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 0.8^\circ$ ,  $G = 25 \mu\text{m}$ ; 当  $W = 6 \mu\text{m}$ ,  $d = 2 \mu\text{m}$  时波导仅支持单模传输, 图 2 给出了无外电压时光强的传输情况, 传输损耗为 0.17dB。图 3 给出了外加电压与输出光强的关系, 当  $\chi_{33} = 30.9 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{V}$ ,  $\alpha = 0.5$  时得到半波电压  $V = 4.50 \text{V}$ , 理论计算值为 4.30V, 误差为 4.7%。当未加电压时归一化输出光强为 0.962, 加半波电压时归一化输出光强为  $10^{-4}$ , 即消光比为 39.8dB。图 4、图 5 分别给出了在深度  $d = 0$  处, 未加电压和加半波电压时的光场在  $x-z$  平面的分布。

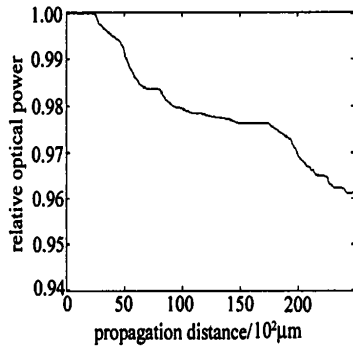


Fig. 2 The relative optical intensity variation without applied voltage

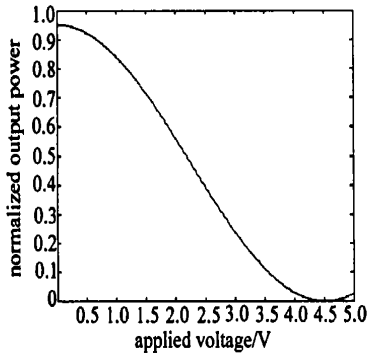


Fig. 3 The relation between output optical power and applied voltage

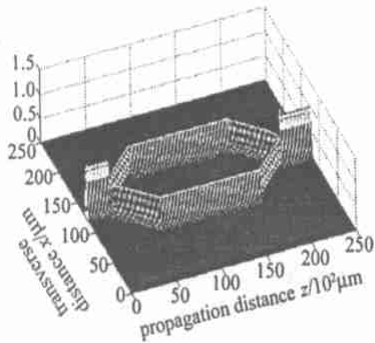


Fig. 4 The optical field distribution without applied voltage

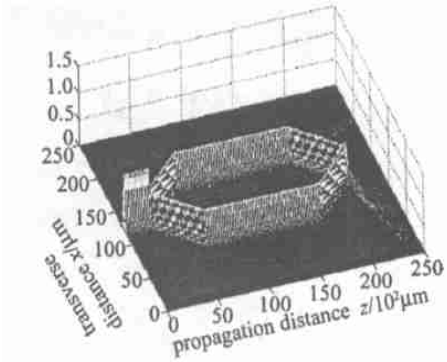


Fig. 5 The optical field distribution with applied voltage of  $V$

### 3 结 论

运用基于级数展开法的三维光束传播法 (3D-SEM-BPM) 分析了铌酸锂 Mach-Zehnder 结构的电光波导调制器, 准确地模拟了光场在波导中的传播和分布情况以及外加电场与输出光强的关系, 获得了调制器半波电压和优化的波导结构参数。该方法将 BPM 方程归结为一阶常微分方程, 方法简单, 导出矩阵小, 计算效率高, 且没有边界截断, 具有很高的数值精度, 是波导调制器优化设计中的理想方法。

### 参 考 文 献

- [1] Wooteen E L, Kissa K M, Alfredo Y Y *et al.* IEEE J Selected Topics In Quantum Electronics, 2000, 6(1) : 69 ~ 82.
- [2] Feit M D, Fleck A, Jr J A *et al.* Appl Opt, 1978, 17(24) : 3990 ~ 3998.
- [3] Chung Y, Dagli N. IEEE J Q E, 1990, 26(8) : 1335 ~ 1339.
- [4] Qing W P, Fang D G, Huang W P. Microwave & Opt Technol Lett, 2000, 24(2) : 125 ~ 129.
- [5] Hewlett S J, Ladouceur F. J Lightwave Technol, 1995, 13(3) : 357 ~ 383.
- [6] Kawano K. IEEE J Q E, 1993, 29(9) : 2466 ~ 2475.
- [7] 肖金标, 孙小蕊, 张明德 *et al.* 电子学报, 2002, 30(5) : 705 ~ 707.