

基于道格拉斯格式的宽角有限差分光束传播法 分析大角度交叉波导*

刘 昊 韩德来 张 彤 崔一平**

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘要: 交叉波导是集成光学中的一种重要的器件单元, 针对大角度交叉波导的结构及折射率分布, 运用基于广义道格拉斯算子的宽角多步有限差分光束传播法模拟大角度交叉波导的传输特性, 数值计算出波导中的光场的分布。与 Crank-Nicholson 格式的有限差分光束传播法相比, 该算法在几乎不增加计算时间和计算机内存资源的情况下, 结合了广义道格拉斯格式的有限差分光束传播法截断误差小[只有 $o(\Delta x)^4$]和宽角多步法所具有较高精度的优点, 是光波导器件理想的数值模拟工具。在此基础上计算分析了大角度交叉波导的输出分支波导的能量与交叉角度的关系, 以及交叉角度对波导间能量耦合的影响。这为实际的设计制作光器件的工作提供了极好的基础。

关键词: 导波与光纤光学; 交叉波导; 光束传播法; 宽角光束传播法; 道格拉斯格式

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Analysis of Wide-Angle Crossed Waveguide by Wide-Angle Finite-Difference Beam Propagation Method Based on the Douglas Scheme

Liu Hao Han Delai Zhang Tong Cui Yiping

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096)

(Received 16 June 2003; revised 24 October 2003)

Abstract: Crossing waveguide is an important unit in integrated optics. The generalized Douglas (GD) scheme for variable coefficients is applied to wide-angle multistep finite-difference beam propagation method (FD-BPM). Aiming at the structure and refractive-index profile of wide-angle cross waveguide, the optical field distribution has been calculated by the method. Compared with Crank-Nicholson (CN) scheme in the same computational time and resource, the method has two characteristics: small truncation error of $o(\Delta x)^4$ in the transverse direction and high accuracy. It is a useful tool for designing optical waveguide devices. Normalized output optical power versus intersection angle in the main waveguide and power coupling versus intersection angle are analyzed by the method. Numerical result would lay an foundation for authors' experiment.

Key words: guided wave and fiber optics; crossed waveguide; finite difference beam propagation method; wide angle beam propagation method; douglas scheme

1 引 言

随着现代光通信的发展, 集成光器件成为研究热点。交叉波导是集成光学中一种重要的器件单元, 它的应用包括制作能量分配器、光开关^[1]、低损

耗低串音的交叉光路网络等。数值计算对交叉波导的设计和 optimization 有着重要的意义, 而选择正确的计算方法是交叉波导数值计算的关键。

在诸多的计算方法中, 有限差分光束传播算法 (Finite-difference beam propagation method, FD-BPM 算法)^[2] 是一种目前光波导器件中分析模拟光波传输应用最广泛有效的分析方法之一。有限差分光束传播法利用了通常的波导的本征函数和本征值来计

* 国家杰出青年基金 (Project 60125513) 资助课题。

** E-mail: cyp@seu.edu.cn

收稿日期: 2003-06-16; 收到修改稿日期: 2003-10-24

算^[3], 相对于利用耦合波原理^[4]计算光栅和波导, 有限差分光束传播法方法能计算出比较精确的结果。此方法计算简单, 速度快, 适合不同形状的波导, 如阵列波导光栅^[5], 交叉波导等。

有限差分光束传播法的精确性很大程度上依赖于所设网格点的数目和网格大小。标准的有限差分光束传播法方法采用 Crank-Nicholson (CN) 格式, 其典型的截断误差为 $o(\Delta x)^2$, 要想提高精度可以通过增加网格数, 减小网格尺寸, 但是这会引入计算矩阵过大, 计算时间过长, 并且导致计算的不稳定。改进的有限差分光束传播法算法^[6]是基于可变系数的广义道格拉斯 (generalized Douglas, GD) 格式。其典型的截断误差为 $o(\Delta x)^4$, 相对于标准的有限差分光束传播法, 精度得到很大提高, 而计算矩阵大小和计算时间都没有增加。宽角多步有限差分光束传播法算法^[7]利用了帕德算子, 避免了标准有限差分光束传播法的傍轴误差, 特别是在计算大角度的光束传播时, 能够使计算精度、稳定性得到大大提高。

我们把广义道格拉斯格式有限差分光束传播法和宽角多步有限差分光束传播法结合起来, 在计算时间和复杂性不显著增加的情况下, 比较精确的计算和分析了 TE1 模式在交叉波导中的传播。计算波导损耗, 波导间能量耦合等特性。

2 分析方法

对于弱导特性的交叉波导, 使用标量有限差分光束传播法进行模拟。

首先对于 TE 波, 标量亥姆霍兹方程可以近似为

$$\frac{\nabla^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\nabla^2 E_y}{\partial z^2} + k^2 n^2 E_y = 0, \quad (1)$$

使用帕德(2,2)近似, 相对标准有限差分光束传播法算法, 2 阶帕德被分解为 2 小步, 每步可表示为^[8]

$$E^{m+k/2} = \frac{1 + a_k P}{1 + a_k^* P} E^{m+(k-1)/2}, \quad (2)$$

这里 $P = \partial^2 / \partial x + \gamma$, $\gamma = k_0^2 [n^2(x, z) - n_0^2]$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是自由空间波数, $n(x, z)$ 是折射率分布, n_0 是参考折射率, 上标 m 表示 z 轴位置, a 的值可以由一个 2 阶代数方程解出。利用广义道格拉斯格式和帕德(2,2) 近似最后可以得到

$$\begin{aligned} C_{i+1}^{m+k/2} E_{i+1}^{m+k/2} + C_i^{m+k/2} E_i^{m+k/2} + C_{i-1}^{m+k/2} E_{i-1}^{m+k/2} = \\ C_{i+1}^{m+(k-1)/2} E_{i+1}^{m+(k-1)/2} + C_i^{m+(k-1)/2} E_i^{m+(k-1)/2} + \\ C_{i-1}^{m+(k-1)/2} E_{i-1}^{m+(k-1)/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

这里

$$C_{i+1}^{m+(k-1)/2} = \frac{1}{12} + \Gamma_k \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{12} \gamma_{i+1}^{m+1/2} \right), \quad (4)$$

$$C_i^{m+(k-1)/2} = \frac{5}{6} - \Gamma_k \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{5}{6} \gamma_i^{m+1/2} \right), \quad (5)$$

当上标为 $m + (k - 1)/2$ 时, $\Gamma_k = a_k$; 当上标为 $m + k/2$ 时, $\Gamma_k = a_k^*$ 。

(3) 式为宽角有限差分光束传播法的差分格式, 它是一个三对角矩阵方程, 可以用追赶法解出。此公式的计算时间与 CN 格式的计算时间相当。我们选用的帕德(2,2), 宽角计算时间近似于标准有限差分光束传播法计算时间的 2 倍。

计算窗口边界处反射回来的辐射模可能引起不必要的干涉。必须对边界条件进行设定。可以采用边界处插入吸收区的方法, 此方法要设定一个吸收系数, 但是对计算时间和内存需要很大。这里我们采用透明边界条件(TBC)方法^[9], 有效的抑制了边界的反射波, 并且比较容易编程实现。

3 交叉波导的数值计算

我们采用如图 1 所示的计算模型。

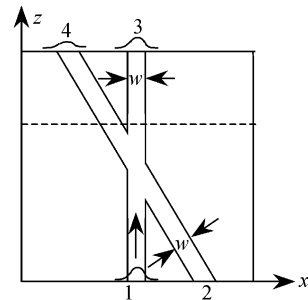


Fig. 1 Calculation model

芯层折射率 n_1 取为 1.520, 包层折射率 n_2 取为 1.512, 交叉区折射率同芯层。为了数值计算的方便, 取入射波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$, 芯层宽度 $w = 3 \mu\text{m}$ 。选取的窗口大小, x 方向取 $200 \mu\text{m}$, 512 个点; z 方向取 $973.93 \mu\text{m}$, 1000 个点。

采用高斯场基模入射, 从计算模型的 1 处入射, 入射场方程为

$$E = \cos \left[\sqrt{k_0^2 n_{\text{core}}^2 - \beta^2} \left(x - \frac{w_x}{2} \right) \right], \quad \left| x - \frac{w_x}{2} \right| \leq \frac{w}{2}, \quad (6)$$

$$E = \cos\left(\sqrt{k_0^2 n_{\text{core}}^2 - \beta^2} \cdot \frac{w}{2}\right) \exp\left[-\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_{\text{clad}}^2} \left(\left|x - \frac{w_x}{2}\right| - \frac{w}{2}\right)\right], \quad \left|x - \frac{w_x}{2}\right| > \frac{w}{2}, \quad (7)$$

式中 x 为 x 轴方向的坐标值, w_x 为窗口 x 方向宽度, $\beta = n_0 k_0$ 为本征模所对应的传播常量, $n_{\text{core}}, n_{\text{clad}}$ 分别为波导芯层和包层的折射率。

4 结果与结论

4.1 交叉波导的能量分布

在输出端可以通过由有限差分光束传播法计算出的场分布与本征模的重叠积分来求取本征模的能量值, 各分支输出的本征模归一化功率为

$$p = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, z) E_{\text{out}}^*(x - x_c, z) \exp(i\beta_{\text{out}} x \sin \theta) dx \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} E(x, 0) E^*(x, 0) dx \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{out}}(x - x_c, z) E_{\text{out}}^*(x - x_c, z) dx}, \quad (8)$$

其中 $E(x, z)$ 是用有限差分光束传播法计算出的场强值, $E_{\text{out}}(x, z)$ 是输出分支的本征模, β_{out} 为 E_{out} 所对应的传播常量, x_c 是输出平面处分支波导的中心坐标。

高斯光束由计算模型的 1 处输入, 从 3 处输出。图 2 是交叉角 5° 时的光传播算法算出的三维模拟图。图中可以看出原直波导中的能量, 只有很少一部分耦合至交叉分支波导中。图 3 表示沿直通波导中心纵向的场强分布。从中可以清楚的看出, 经过交叉区域后, 光能量分布产生波动。在交叉区域中, 波动很剧烈, 并且波动随着传播方向逐渐趋缓。按照耦合模理论, 交叉波导的交叉点处结构变化较大, 芯层中奇模和偶模的干涉, 光波的能量会在两波导之间交换变化, 引起能量起伏。但随着波导间距的增大, 能量交换减小, 能量主要在直波导中传播。同时由于存在导模和辐射模之间的耦合, 部分能量进入包层, 形成损耗。

图 4 是用有限差分光束传播法计算传播方向

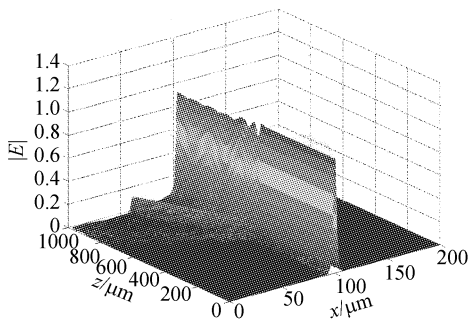


Fig. 2 Simulation optical wave power in a main waveguide with an intersection angle of 5°

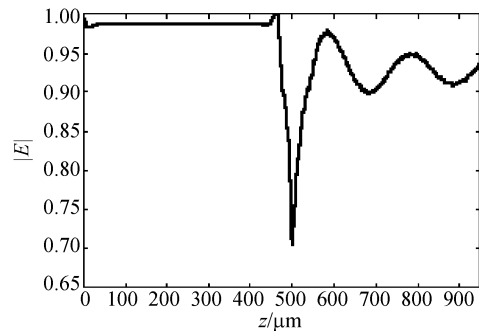


Fig. 3 Field distributions along propagation direction in the main waveguide

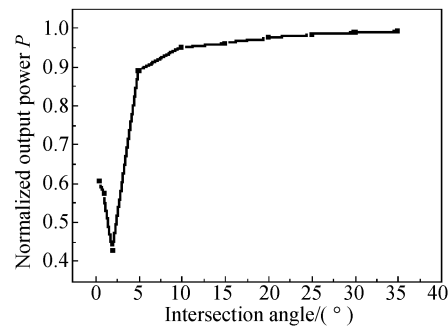


Fig. 4 Normalized output optical power P versus intersection angle in the main waveguide

$z = 506.953 \mu\text{m}$ 处(图 1)的能量值, 直通波导分支出口的光能量 P 随分支交角的变化曲线。由图可以看出, 随着交叉角增大, 直通波导的归一化能量越接近 1。当交叉角超过 5° 左右时, 直通波导归一化能量超过 0.9。

4.2 交叉波导输出端的能量耦合

在波导芯层内模场为余弦分布的, 在包层中呈指数衰减, 所以在包层中还存在指数衰减的光场, 指

数衰减场向外延伸,与相邻输出分支波导的模场部分重叠,光场能量可被耦合进邻近波导。交叉波导模型符合耦合模理论,从中得出耦合波导系统中传输的光能量^[10]。

图 5 所示在传播方向 $z=506.953 \mu\text{m}$ 处,计算波导间的功率耦合值。图中表明两波导间距越大功率耦合越低。这是因为波导间距越大,波导模场的指数衰减部分与临近波导模场的重叠越小,相应的耦合越弱,功率耦合越低。

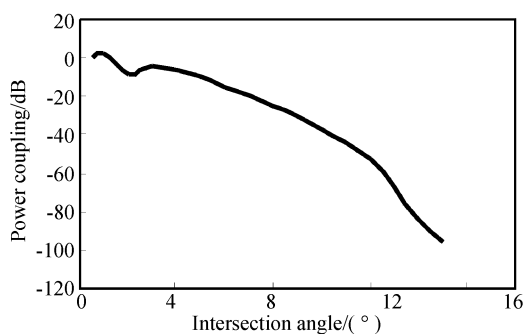


Fig. 5 Power coupling versus intersection angle

在用有限差分光束传播法计算宽角交叉波导的光传输特征时,采用基于可变系数的广义道格拉斯宽角有限差分光束传播法算法,数值计算时网格数可以少一点,对于大角度波导,该方法计算稳定。模拟出的数值合乎本征模在波导中的传播,尤其是宽角度波导中传播的物理事实。数值计算结果表明随着交叉角增大,直通的波导的归一化能量越接近 1.0;两波导间距越大,波导间能量耦合值越低。

结论 广义道格拉斯格式的宽角多步有限差分光束传播法方法计算稳定,精确度高;所用计算时间和计

算资源没有显著的增加。因此是分析大角度交叉波导的一种有效的分析方法。

参 考 文 献

- 1 Liu Jun, Jin Guoliang, Ying Zaisheng *et al.*. Study of arc-type all-optical waveguide switch based on self-focusing substrate. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(7): 957~961 (in Chinese)
- 2 Yevick D, Glasner M. Forward wide-angle light propagation in semiconductor rib waveguides. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(3):174~176
- 3 Feit M D, Fleck J A. Computation of mode eigenfunctions in graded-index optical fibers by the propagation beam method. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(13):2240~2246
- 4 Yevick D, Thylén L. Analysis of gratings by the beam-propagation method. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(8): 1084~1087
- 5 Zhou Qingcun, Dai Daoxin, Sheng Zhouyan *et al.*. Calculation of the far field pattern from a planar waveguide using a modified Gaussian beam approximation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5):587~592 (in Chinese)
- 6 Sun Lizhong, Gar Lam Yip. Modified finite-difference beam-propagation method based on the Douglas scheme. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(15):1229~1331
- 7 Hadley G R. Wide-angle beam propagation using padé approximant operators. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(20):1426~1428
- 8 Kawano K, Kitoh T. *Introduction To Optical Waveguide Analysis*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 2001. 204~215
- 9 Hadley G R. Transparent boundary condition for beam propagation method. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1):363~370
- 10 Liu Yuliang, Liu Enke, Liu Zhiming *et al.*. Transmission characteristic of crossing waveguide structure constructed by large single-mode rib semiconductor waveguide. *Acta optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(3):292~295 (in Chinese)