

文章编号: 0258-7025(2008)02-0231-04

基于有限差分的大角度交叉波导光束传输法

王世军 马慧莲 金仲和

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

摘要 采用有限差分光束传输法(FDBPM)分析光波在大角度交叉区域的传输过程,利用 Padé 近似解决大角度传输问题;利用透明边界条件弥补边界光波反射现象,通过追赶法编程计算有限差分方程组,得到在一定光波导结构条件下传输损耗与交叉角度之间的关系。在此基础上,利用低压化学气相沉积技术在硅衬底上制作了二氧化硅交叉波导结构,实验结果表明有限差分光束传输法在分析大角度交叉时具有比较高的计算精度。

关键词 导波光学;交叉波导;光束传输法;大角度

中图分类号 TN 25;TN 256 **文献标识码** A

Finite Difference Beam Propagation Analysis of Wide-Angle Crossed Waveguide

Wang Shijun Ma Huilian Jin Zhonghe

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The characteristic of the light propagation across the wide angle crossed waveguide is analyzed using the finite difference beam propagation method (FDBPM). Padé approximation is used to deal with the wide angle problem and the transparent boundary condition is used to deal with the optical reflection at the boundary. Through calculating the finite difference equations using the pursue after method, the relationship between the propagation loss and the intersection angle has been obtained. On this basis, the crossed silica waveguides are fabricated on silicon substrate by low pressure chemical vapor deposition method. Experiments show that the presented FDBPM has good accuracy and can be used to analyze wide angle crossed waveguides.

Key words guided wave optics; crossed waveguide; beam propagation method; wide angle

1 引 言

光波导环形谐振腔是谐振式微型光学陀螺(R-MOG)的核心敏感部件^[1~3],提高波导谐振腔的清晰度是提高谐振式微型光学陀螺性能的关键技术,是此种陀螺设计和制造中的关键。虽然谐振式微型光学陀螺的标度因子只与谐振腔的等效半径有关,然而在损耗允许的前提下,适当增加环形腔总长可以提高谐振式微型光学陀螺的极限灵敏度^[4]。因此,在一定集成光学芯片尺寸下需要研究集成光学环形腔的多圈技术。在平面型结构的集成光学器件中,若直接采用多圈技术,势必产生波导交叉。尽管交叉波导结构在集成光学器件中已得到广泛研究和

使用,但是在传统器件中交叉波导结构往往都用来完成分束功能,通过交叉点的光是单向的。然而在谐振式微型光学陀螺中,光波在谐振腔中需要双向传输,因此,为了双向工作的两路光信号达到最小损耗和串音,其交叉角都必须尽量接近 90°。然而目前利用耦合原理^[5,6]和光束传输法(BPM)^[7~9]分析集成光学器件的交叉角通常都小于 10°,采用数值计算方法也只是分析到 35°^[10]。本文从此背景出发,采用可以分析光波能量转换的有限差分光束传输法(FDBPM)分析二氧化硅单模波导大角度交叉带来的损耗问题^[11],并实际制作了不同交叉角度的交叉波导结构来验证此方法的有效性。

收稿日期:2007-08-07;收到修改稿日期:2007-09-17

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20060335064)资助项目。

作者简介:王世军(1982—),男,四川人,硕士研究生,主要从事光学传感器方面的研究。E-mail:wangshijun@zju.edu.cn

导师简介:马慧莲(1975—),女,浙江人,副教授,硕士生导师,主要从事集成光学器件和光学传感技术方面的研究。

E-mail:mahl@zju.edu.cn (通信作者)

2 有限差分光束法的数值计算原理

当明确在光波导中传输的光模场的传播方向后可以通过求解标量亥姆霍兹(Helmholtz)方程来获得解析解。于是利用有限差分光束传输法将亥姆霍兹方程转换成有限差分方程组,再通过求解此方程组就可获得近似数值解。

应用有效折射率方法,可以将三维波导问题简化为二维问题。在传播方向上,可以用慢包络近似表示光场的传播,即

$$\phi = E(x, z)\exp(-i\beta z), \quad \beta = kn_{\text{ref}}, \quad (1)$$

式中 β 表示 z 方向的传播常数, k 表示真空中波数, n_{ref} 表示参考折射率, $E(x, z)$ 表示慢包络近似下的光波复振幅。所以亥姆霍兹方程可表示为

$$2i\beta \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + k^2(n^2 - n_{\text{ref}}^2)E, \quad (2)$$

式中 n 表示波导折射率。利用泰勒级数展开^[12]得到二阶差分表达式,其中截断误差的量级是 $(\Delta x)^4$

$$\frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} = \frac{\delta^2 E_i}{(\Delta x)^2} - \frac{1}{12}(\Delta x)^2 \frac{\partial^4 E_i}{\partial x^4}, \quad (3)$$

其中 $\delta^2 E_i = E_{i-1} - 2E_i + E_{i+1}$ 。

在广义道格拉斯(Douglas)模型^[13]中,利用(1)式可得

$$\frac{\partial^4 E_i}{\partial x^4} = \frac{\delta^2}{\Delta x^2} \left(\sigma \frac{\partial E_i}{\partial z} - \nu E_i \right), \quad (4)$$

式中参数

$$\nu = k^2(n^2 - n_{\text{ref}}^2), \quad \sigma = 2i\beta.$$

由于本交叉波导是大角度交叉,所以必须采用 padé 近似^[14, 15]来解决大角度光束传输问题。由(2)式的亥姆霍兹方程进行差分运算得到

$$E^{t+1} = \frac{D - i\Delta z(1 - \alpha)N}{D - i\Delta z\alpha N} E^t, \quad (5)$$

其中
$$\begin{cases} N = P/2kn_{\text{ref}} \\ P = \partial^2/\partial x^2 + \nu \\ D = 1 + (i/2kn_{\text{ref}})(\partial/\partial z) \end{cases},$$

式中 α 为有限差分的控制因子。本文采用与差分运算相匹配的 Crank-Nicholson(CN)格式, $\alpha = 0.5$ 。 m 阶 padé 近似表示为

$$\frac{\partial}{\partial z} \Big|_m = -i \frac{P/2kn_{\text{ref}}}{1 + (i/2kn_{\text{ref}})(\partial/\partial z)_{m-1}}, \quad (6)$$

只要根据 $(\partial/\partial z)|_{-1} = 0$ 就能得到所有的 m 阶 padé 近似。为达到数值计算符合实际并且计算精度较大,计算时间较短的目的,采用 padé(2, 2) 近似计算

$$E^{t+1} = \frac{1 + B_n P + A_n P^2}{1 + B_d P + A_d P^2} E^t = \frac{(1 + c_2 P)(1 + c_1 P)}{(1 + d_2 P)(1 + d_1 P)} E^t, \quad (7)$$

参数 d_1, d_2, c_1, c_2 为一元二次方程的变换系数,其计算表达式为

$$\begin{cases} A_n = \frac{1}{a^4} - i \frac{2\Delta z(1 - \alpha)}{a^3} = c_1 c_2 \\ B_n = \frac{3}{a^2} - i \frac{\Delta z(1 - \alpha)}{a} = c_1 + c_2 \\ A_d = \frac{1}{a^4} + i \frac{2\Delta z\alpha}{a^3} = d_1 d_2 \\ B_d = \frac{3}{a^2} + i \frac{\Delta z\alpha}{a} = d_1 + d_2 \end{cases},$$

$$a = 2kn_{\text{ref}}.$$

运用多步方法将式(7)分解为两个方程,然后得到 $E^{t+1/2}$ 的差分方程

$$E^{t+1/2} - E^t + \nu(d_1 E^{t+1/2} - c_1 E^t) = c_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} E^t - d_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} E^{t+1/2}, \quad (8)$$

又根据有限差分基本运算,可以获得 padé 近似下的差分方程组

$$\begin{cases} \xi_{i-1}^{t+1/2} E_{i-1}^{t+1/2} + \xi_i^{t+1/2} E_i^{t+1/2} + \xi_{i+1}^{t+1/2} E_{i+1}^{t+1/2} = \\ \xi_{i-1}^t E_{i-1}^t + \xi_i^t E_i^t + \xi_{i+1}^t E_{i+1}^t, \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \xi_{i\pm 1}^{t+k} = \frac{2\Delta z + \sigma(c_1 - d_1)}{6\Delta z} + \left[\frac{5\nu}{12} + \frac{1}{(\Delta x)^2} \right] \Gamma \\ \xi_i^{t+k} = \frac{\Delta z - \sigma(c_1 - d_1)}{3\Delta z} + \left[\frac{\nu}{6} - \frac{2}{(\Delta x)^2} \right] \Gamma \end{cases},$$

$$\Gamma = \begin{cases} d_1 & k = 1/2 \\ c_1 & k = 0 \end{cases},$$

根据上述差分求解,同理可以得到 E^{t+1} 的差分方程组。再采用透明边界条件^[16, 17],目的是消除计算窗口的边界反射现象,通过编程计算上述差分方程组就能获取交叉波导的数值近似解。

3 计算分析和实验测试

图 1 为谐振式微型光学陀螺中核心敏感器件谐振腔的多圈波导结构,其中可以看到存在多个交叉

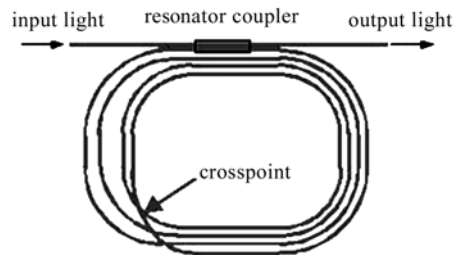


图 1 具有多个交叉点的多圈环形腔结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the multi-turn ring resonator with crossed points

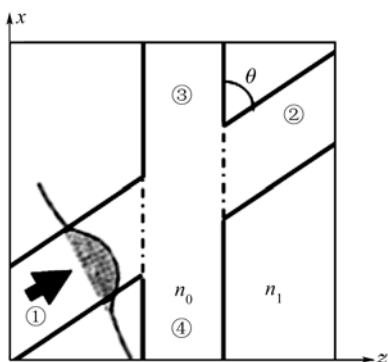


图 2 交叉波导计算模型

Fig. 2 Computing model for the crossed waveguides

点;图 2 给出了交叉点波导结构示意图。两交叉波导结构都选择硅基二氧化硅单模光波导,其结构、尺寸都相同且工作于单模状态;波导宽度 2ρ 为 $5.5 \mu\text{m}$,芯层折射率 n_0 为 1.45,包层 n_1 为 1.44,波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$ 。光波从端口①输入,端口②输出。选取的窗口大小: z 方向取 $1000 \mu\text{m}$,5000 个格点; x 方向取 $500 \mu\text{m}$,500 个格点。对于三层平板波导,其输入光场可表示为

$$\Psi = \cos(\pi x/2\rho)\exp(i\beta z). \quad (10)$$

根据交叉角度和波导的结构参数,利用追赶法编程处理有限差分方程组,在确定输入光场和格点分布条件下通过 Matlab 编程可以得到光波在经过交叉区域传输后产生的损耗与角度 θ 的关系,如图 3 所示。

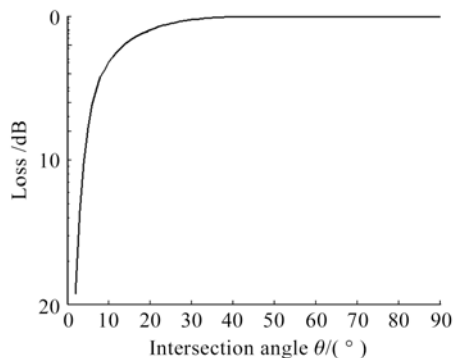


图 3 交叉点损耗与交叉角度的关系

Fig. 3 Excess loss of the crossed waveguides versus the intersection angle

利用低压化学气相沉积技术在硅衬底上制作了多种交叉角度的二氧化硅交叉波导结构,如图 4 所示,同时也设计与交叉波导结构主通道波导完全一致的直波导结构。其中图 4(a)给出的是 45° 交叉结构芯片封装后的照片,图 4(b),(c),(d) 依次给出了 90° , 45° 和 20° 交叉结构的局部芯片扫描电子显微镜照片。通过对比测试直波导和交叉波导结构的输

入输出功率关系,得到三种不同交叉角度的损耗,测试结果如图 5 所示,即 90° 的交叉损耗为 0.013 dB, 45° 为 0.315 dB, 20° 为 0.899 dB。作为对照,图 5 同时给出了利用数值方法分析大角度交叉波导的计算结果。由图 5 可知, 90° 和 20° 交叉损耗与数值计算基本重合,而 45° 交叉损耗偏移小于 0.07 dB。由以上分析可知,基于有限差分的大角度光束传播多步数值分析方法在处理大角度交叉时具有比较高的计算精度。

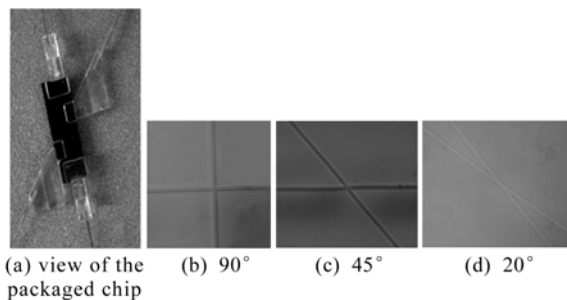


图 4 实际制作的不同角度交叉波导结构

Fig. 4 Photos of fabricated crossed waveguides with different intersection angles

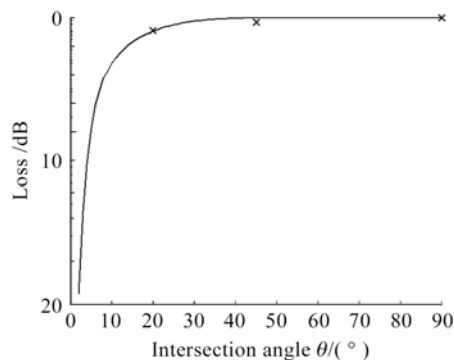


图 5 实验数据与理论关系曲线

Fig. 5 Curve of the experimental results and the theoretical values

4 结 论

通过对有限差分光束传输法的分析,采用 padé 近似的多步分析法和透明边界条件,得到了光波在经过交叉区域后的传输损耗与交叉角的关系。当交叉角低于 20° 时,损耗迅速增加,一部分是端面反射和串音,致使能量进入输入端和交叉分支波导;另一部分能量是由于经过交叉区域时光波不能在原传播方向上有效传输,以辐射模的形式泄漏出波导;当交叉角大于 45° 时传输损耗较小且变化不大,与波导材料传输损耗相比可以忽略;最后通过实际测试交叉损耗验证了基于有限差分的大角度光束传输多步

数值分析方法在计算大角度交叉时具有比较高的计算精度。以上分析结果将为大角度交叉波导特别是多圈集成光学环形腔的优化设计提供理论依据和实验参考。

参 考 文 献

- 1 W. Y. Chen, R. Grover, T. A. Ibrahim *et al.*. High-finesse laterally coupled single-mode benzocyclobutene microring resonators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 470~472
- 2 K. Iwatsuki, M. Saruwatari, M. Kawachi *et al.*. Waveguide-type optical passive ring-resonator gyro using time-division detection scheme [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(11):688~689
- 3 Neil Barbour, George Schmidt. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, **1**(4):332~339
- 4 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Optimal design of ring resonator in silica optical waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1330~1332
马慧莲,金仲和,丁纯等. 二氧化硅光波导环形谐振腔[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1330~1332
- 5 Gary E. Betts, William S. C. Chang. Crossing-channel waveguide electrooptic modulators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(7):1027~1038
- 6 S. Gevorgyan, A. Hovsepyan. Power distribution in symmetric integrated optic xjunction [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(12): 788~789
- 7 A. Neyer, W. Mevenkamp, L. Thylen *et al.*. A beam propagation method analysis of active and passive waveguide crossings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(3):635~642
- 8 Chai Liqun, Chen Zheng. Discussion about the selection of calculation models of wide-angle crossed waveguides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4):435~437
- 柴立群,陈铮. 大角度交叉波导计算模型选取探讨[J]. *光子学报*, 2001, **30**(4):435~437
- 9 T. Zhang, H. Liu, Y. S. Qian *et al.*. Power loss of X-junction in solid state optical gyrometer simulated by beam propagation method [C]. *SPIE*, 2005, **5644**:479~482
- 10 Liu Hao, Han Delai, Zhang Tong *et al.*. Analysis of wide-angle crossed waveguide by wide-angle finite-difference beam propagation method based on the Douglas scheme [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):456~459
刘昊,韩德来,张彤等. 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[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):456~459
- 11 Longzhi Li, Yi Tang, Jianyi Yang *et al.*. Compact all-optical switches based on photo-induced suppression of mode interference [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2):93~95
- 12 J. Yamauchi, J. Shibayama, O. Saito *et al.*. Improved finite-difference beam-propagation method based on the generalized Douglas scheme and its application to semivectorial analysis [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **LT-14**(10):2401~2405
- 13 J. Yamauchi, J. Shibayama, M. Sekiguchi *et al.*. Finite-difference beam propagation method based on the generalized Douglas scheme for a nonuniform grid [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(1):67~69
- 14 G. Ronald Hadley. Multistep method for wide-angle beam propagation [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(24):1743~1745
- 15 Zhou Qincun, Dai Daoxin, He Sailing. Simulation of arrayed waveguide gratings using a finite difference beam propagation method [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2002, **23**(12):1313~1319
周勤存,戴道锌,何赛灵. 基于FD-BPM方法的阵列波导光栅模拟[J]. *半导体学报*, 2002, **23**(12):1313~1319
- 16 G. Ronald Hadley. Transparent boundary condition for beam propagation [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(9):624~626
- 17 G. Ronald Hadley. Transparent boundary condition for the beam propagation method [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1):363~370