

空间交叉波导耦合特性分析

孙一翎^{1,2} 江晓清¹ 杨建义¹ 王明华¹

(¹ 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027; ² 中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 由两根在空间呈 X 型放置的光波导组成的空间交叉波导结构是构成垂直耦合光分束器、垂直耦合光滤波器、垂直耦合光开关和垂直耦合上/下复用器等三维集成光学器件的基本结构单元。提出用一种等效模场匹配法分析空间交叉波导耦合特性, 将矩形波导的场分布看成是对圆对称光纤场分布的微扰, 解决了对角区场分布的表述, 从而计算空间交叉波导的耦合长度, 并用三维全矢量光束传输法验证了分析结果。将两种方法所得的空间交叉波导耦合长度加以比较, 最大误差为 1.2%, 平均误差为 0.9%。结果表明该等效模场匹配法具有精度高、运算速度快等优点, 为基于空间交叉波导的三维集成光学器件的设计和分析提供理论基础。

关键词 三维集成光学; 空间交叉波导; 等效模场匹配法; 耦合特性

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2099

Coupling Characteristics of Spatial X-Crossing Waveguides

Sun Yiling^{1,2} Jiang Xiaoqing¹ Yang Jianyi¹ Wang Minghua¹

(¹ Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(² College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract Spatial X-crossing waveguides consist of two vertically stacked waveguides crossed in an X type shape. These kinds of devices can be served as vertical couplers, vertical coupler filters, vertical optical switches and optical add/drop multiplexers. Based on the perturbation theory, a technique named equivalent field matching method (EFMM) is presented for analyzing the coupling characteristics of spatial X-crossing waveguides. The field profile of the rectangular waveguide is treated as a perturbation to radially symmetric fiber, and more accurate calculation of the coupling lengths of the spatial X-crossing waveguides is presented with the effect of corner regions taken into account. And the three-dimensional full-vector beam propagation method (3D-BPM) is used to verify these analytical results. Comparison of the coupling lengths obtained by the 3D-BPM and EFMM shows that the maximum relative error is 1.2%, and the average relative error is 0.9%. Results show that this proposed method is more convenient compared with other numerical methods. The equivalent field matching method is extremely useful in the accurate design of three-dimensional integrated optical devices based on spatial X-crossing waveguides.

Key words three-dimensional integrated optics; spatial X-crossing waveguides; equivalent field matching method; coupling characteristics

1 引 言

三维集成光学^[1,2]在保持二维集成光学^[3,4]的可靠性和结构稳定性基础上,可有效扩大单个芯片上的信道数,增加集成密度。三维集成光学器件是指利用光波导在三维空间构成的光器件,它在输出面不再是一维分布,而至少是二维分布。集成光学器件从平面结构向三维立体结构发展,是充分利用

集成光学器件体积小、速度快、集成度高等优势的必然结果。

空间交叉波导由不在同一平面的两根直波导组成,不同于平面交叉波导。正如平面交叉波导是二维集成光学器件的基本结构单元,空间交叉波导是构成垂直耦合光分束器^[5]、垂直耦合光滤波器^[6]、垂直耦合光开关^[7]和垂直耦合上/下复用器^[8]等三维

收稿日期: 2008-11-20; 收到修改稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家 973 计划(2007CB613405), 国家自然科学基金(60777015)和国家质检总局科技计划(2007QK59)资助课题。

作者简介: 孙一翎(1972-), 女, 副教授, 博士, 主要从事集成光波导器件的研究。E-mail: sunyl@cjl.u.edu.cn

集成光学器件的基本结构单元。

耦合模理论^[9]为解决两波导或多波导^[10~12]的耦合问题提供了有效方法。文献[13]将平面波导耦合模理论推广到空间多波导之间的耦合,给出了空间多波导的耦合方程及空间波导耦合系数的表达式。计算空间波导的耦合系数要根据矩形波导的场分布,常用的方法是采用马卡梯里近似:考虑远离截止点时,能量大多集中在芯区,将矩形波导的四个对角区的场分布用两个指数衰减函数的乘积来表示。但空间波导结构,两波导之间光功率的交换在横截面方向是通过对角耦合来实现的,而这正是马卡梯里方法所忽略不计的。所以矩形波导对角区的场分布的选择直接影响空间波导耦合系数计算的正确性,仍采用马卡梯里近似计算将带来很大的误差。

本文基于微扰理论提出一种等效模场匹配法,选择更为精确的矩形波导对角区场分布表达式对空间波导的耦合系数和空间交叉波导的耦合长度进行计算,在此基础上分析空间交叉波导的耦合特性,并用三维全矢量光束传输法^[14]验证了分析结果。

2 微扰理论

空间交叉波导由不在同一平面的两根直波导组成,如图 1 所示。其主要的结构参数为两波导之间夹角 θ (在本文中被称为交叉角)及两波导的垂直间距。空间交叉波导可以看成横截面竖直方向间距固定不变(如图 2 中所标的 t),横截面水平方向间距(如图 2 中所标的 h)渐变的空间波导。

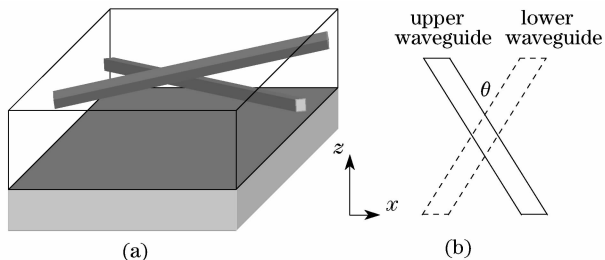


图 1 空间交叉波导的透视图(a)及俯视图(b)

Fig. 1 Spatial X-crossing waveguides (a) Perspective view, (b) top view

采用基于微扰理论的等效模场匹配法分析空间交叉波导耦合特性的基本思路:把横截面为正方形的矩形波导场分布看成是具有圆对称的光纤场分布加微扰,用一阶微扰对光纤的模场分布进行修正,得到矩形波导场分布。光纤与矩形波导具有相同的芯区折射率和包层折射率。这一模型的理论根据是掩埋式弱限制矩形波导与光纤的模场具有很高的(如

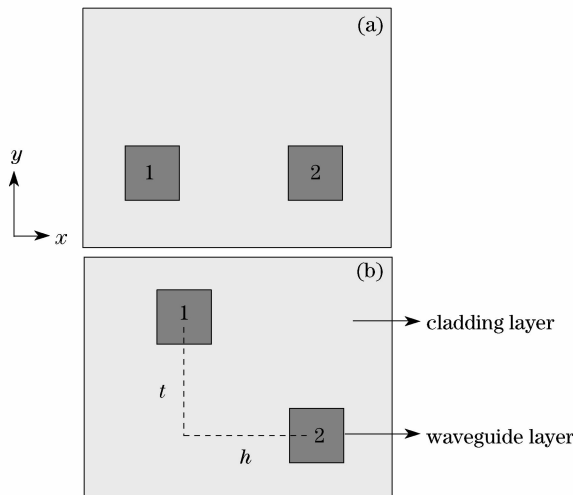


图 2 平面波导(a)及空间交叉波导(b)的横截面示意图
Fig. 2 Cross section of planar waveguides (a) and spatial x-crossing waveguides (b)

直接耦合效率已经达 93%)匹配性。

矩形波导场分布 ψ 和传播常数 β 满足亥姆霍兹方程

$$\nabla_t^2 \psi + [k_0^2 n_r^2(x, y) - \beta^2] \psi = 0, \quad (1)$$

式中 $n_r(x, y)$ 为矩形波导的折射率分布, k_0 为真空中的波数,将上式改写成算符 \hat{H} 满足的本征值方程

$$\hat{H}\psi = \beta^2 \psi, \quad (2)$$

(2)式中算符 \hat{H} 可写成算符 \hat{H}_0 和算符 \hat{H}' 的和,即

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}', \quad (3)$$

\hat{H}_0 为等效光纤所对应的算符,其本征函数 ϕ_0 及本征值 β_0^2 满足以下本征值方程

$$\hat{H}_0 \phi_0 = \beta_0^2 \phi_0, \quad (4)$$

在弱导引条件下,算符 \hat{H}' 可以看成是对算符 \hat{H}_0 的微扰

$$\hat{H}' = k_0^2 n_r^2(x, y) - k_0^2 n_f^2(x, y), \quad (5)$$

(5)式中 $n_f(x, y)$ 为等效光纤的折射率分布,微扰算符 \hat{H}' 是由矩形波导和等效光纤的折射率差异引起的,只有在 4 个 1 区域和 4 个 2 区域内不为零,区域 1 和区域 2 分别如图 3 所示。

$$\hat{H}' = \begin{cases} k_0^2 (n_2^2 - n_1^2), & \text{区域 1} \\ k_0^2 (n_1^2 - n_2^2), & \text{区域 2} \end{cases} \quad (6)$$

其中 n_1, n_2 分别为芯区和包层的折射率。由一阶微扰理论得矩形波导的传播常数 β 应满足以下方程

$$\beta^2 = \beta_0^2 + \frac{k_0^2 \int_s [n_r^2(x, y) - n_f^2(x, y)] \psi_0^2(x, y) ds}{\int_s \psi_0^2(x, y) ds}, \quad (7)$$

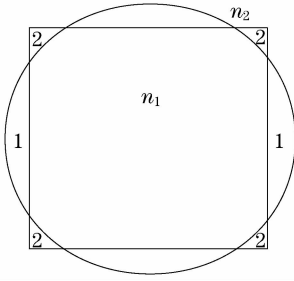


图3 矩形波导及等效光纤的截面图

Fig. 3 Cross section of rectangular waveguide and its equivalent optical fiber

(7)式中 ϕ_0 为阶跃光纤的基模横向场分布

$$\phi_0 = \begin{cases} \frac{J_0(ur/a)}{J_0(u)}, & r < a \\ \frac{K_0(wr/a)}{K_0(w)}, & r > a \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} u^2 &= a^2 k_0^2 n_1^2 - \beta^2 a^2, \\ w^2 &= \beta^2 a^2 - a^2 k_0^2 n_2^2, \end{aligned} \quad (9)$$

通过改变光纤的芯半径,使本征值的一级修正为零,即满足条件

$$\begin{aligned} \int_{\text{area1}} (k_0^2 n_2^2 - k_0^2 n_1^2) \frac{J_0^2\left(\frac{ur}{a}\right)}{J_0^2(u)} dx dy + \\ \int_{\text{area2}} (k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2) \frac{K_0^2\left(\frac{wr}{a}\right)}{K_0^2(w)} dx dy = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

此时,矩形波导的传播常数等于光纤的传播常数

$$\beta = \beta_0, \quad (11)$$

这时的光纤为矩形波导的等效光纤,光纤的半径为等效芯半径 a_{eq} 。

取真空中的波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, 波导芯区的折射率 $n_1 = 1.534$, 波导包层的折射率 $n_2 = 1.526$, 横截面为正方形的矩形波导宽度和厚度为 $4 \mu\text{m}$ 。计算得等效光纤的芯半径 $a_{\text{eq}} = 2.228 \mu\text{m}$ 。为了验证分析结果,采用基于三维全矢量光束传输法的 BeamPROP 软件求解矩形波导和等效光纤的传播常数,得到有效折射率分别为 1.527533 和 1.527531。不难验证,芯半径为 $2.228 \mu\text{m}$ 的光纤与宽度和厚度都为 $4 \mu\text{m}$ 的矩形波导具有相同的传播常数。

3 空间波导的耦合系数

应用的微扰法,求出矩形波导的等效光纤,再用等效光纤的场分布来计算空间 1 波导和 2 波导之间的耦合系数^[13]。

$$K_{12} =$$

$$\frac{\omega \epsilon_0 (n_1^2 - n_2^2) \text{Re} \iint_{\text{WG1}} \mathbf{E}_1^{(-)}(x, y) \cdot \mathbf{E}_2(x, y) dx dy}{4}, \quad (12)$$

其中 $\mathbf{E}_1(x, y)$ 和 $\mathbf{E}_2(x, y)$ 分别为波导 1 和波导 2 单独存在时归一化的场分布,计算时用等效光纤的场分布,积分的区域为波导 1, ω 为角频率, ϵ_0 为真空中的介电常数。

设光传播的方向为 z 方向,若两空间波导在 x 方向和 y 方向的中心间距都等于 $6 \mu\text{m}$, 计算得耦合长度为 $1195.8 \mu\text{m}$ 。为了验证分析结果,采用基于三维全矢量光束传输法的 BeamPROP 软件模拟得耦合长度为 $1197.8 \mu\text{m}$, 如图 4 所示。可见在弱导引条件下,用等效模场匹配法求解空间波导,具有着较高的精度。

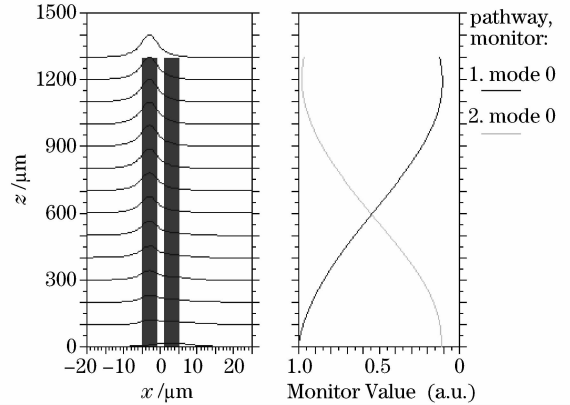


图4 空间波导 BeamPROP 软件模拟图

Fig. 4 Spatial waveguides simulated by the BeamPROP software

4 空间交叉波导耦合特性分析

空间交叉波导可以看成横截面垂直方向间距 gap_y 固定不变,横截面水平方向间距 gap_x 渐变的交叉波导。水平方向间距是 z 的函数,设图 1 中两波导的一端设置在 $z=0$ 处,另一端设置在 $z=L$ 处,则水平方向间距满足

$$h = 2|z - L/2| \tan(\theta/2), \quad (13)$$

利用空间波导耦合系数计算公式方程(12)式,得到耦合系数随 $|z-L/2|$ 的变化关系,如图 5 所示。空间交叉波导的耦合长度 L_c 满足方程

$$\int_0^{L_c} \kappa_{12}(z) dz = \frac{\pi}{2}. \quad (14)$$

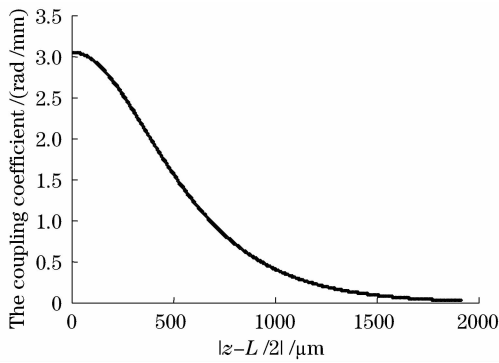
图5 耦合系数随 $|z-L/2|$ 的变化关系Fig. 5 Coupling coefficient as a function of $|z-L/2|$ with $t=6 \mu\text{m}$

表1 由3D-BPM和EFMM获得的耦合长度

Table 1 Coupling length obtained from 3D-BPM and EFMM

$\theta/(\circ)$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$L_c/\mu\text{m}$ (3D-BPM)	507	510	515	518	523	534	548	575	588	628	660
$L_c/\mu\text{m}$ (EFMM)	513	514	517	522	529	539	552	569	591	621	655
Relative error / %	1.2	0.8	0.4	0.8	1.2	0.9	0.7	1.0	0.5	1.1	0.8

若固定空间交叉波导的交叉角 θ ，用基于微扰理论的等效模场匹配法求解不同垂直间距 gap_y 的空间交叉波导，得到耦合长度如图6所示。耦合长度随着垂直间距的增大而迅速增加。由此可见，基于空间交叉波导的三维集成光学器件制作时要严格控制两波导的垂直间距和交叉角的大小。

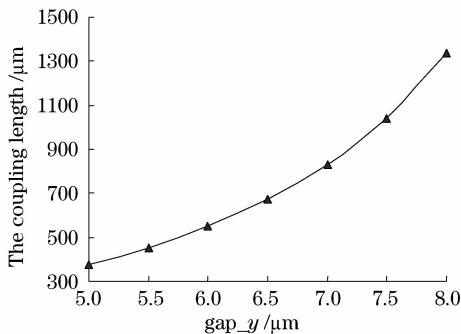


图6 垂直间距对耦合长度的影响

Fig. 6 Coupling length as a function of the center-vertically apart with $\theta=0.6^\circ$

5 结 论

本文基于微扰理论提出一种等效模场匹配法，选择更为精确的矩形波导对角区的场分布表达式对空间交叉波导的耦合长度进行求解，在此基础上分

若固定 y 方向中心间距 $t=6 \mu\text{m}$ ，分别用三维全矢量光束传输法(3D-BPM)和基于微扰理论的等效模场匹配法(EFMM)求解不同交叉角 θ 的空间交叉波导，得到耦合长度列于表1。耦合长度随着交叉角的增大而增加。将两种方法加以比较，最大的相对误差为1.2%，平均相对误差为0.9%。可见在弱导引条件下，用等效模场匹配法求解空间交叉波导，具有着较高的精度。由于两波导水平方向间距随交叉角的增大而增加，当交叉角增加到一定值时，就不能实现能量的完全耦合。也就是找不到一个耦合长度使得方程(14)成立。在上述参数下，当交叉角大于 1.3° 时，两根交叉波导就不能实现能量的完全耦合。

析了交叉角和垂直间距对耦合长度的影响，并用三维全矢量光束传输法验证了分析结果。分析结果表明，等效模场匹配法具有精度高、运算速度快等优点，为基于空间交叉波导的三维集成光学器件的设计和制造提供理论基础。本文分析的矩形波导截面为正方形，若分析截面为长方形的矩形波导，等效光纤截面为一椭圆。

参 考 文 献

- 1 S. M. Garner, S. S. Lee, V. Chuyanov *et al.*. Three dimensional integrated optics using polymers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8):1146~1155
- 2 Zhou Haifeng, Yang Jianyi, Wang Minghua *et al.*. Propagation characteristic analysis and applications of spatial four-waveguide system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12):1772~1776
周海峰,杨建义,王明华等. 空间四波导的传输特性分析与应用 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(12):1772~1776
- 3 Liu Jiayong, Xu Ping, Xu Haidong *et al.*. Design and analysis of novel planar integrated optical correlator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1735~1739
刘加勇,徐平,徐海东等. 新型平面集成光学相关器设计与分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1735~1739
- 4 Wang Mahua, Cui Yiping, Zhang Tong. Investigation on the optimization for the coupling coefficient of polymer integrated optic gyros [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10):1793~1796
王马华,崔一平,张彤. 聚合物集成光学陀螺最佳耦合系数的研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1793~1796
- 5 Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham *et al.*. Fused vertical couplers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(21):2637~2638

- 6 Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham *et al.*. Fused InP-GaAs vertical coupler filters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(1):93~95
- 7 Kaixin Chen, Pak L. Chu, Kin Seng Chiang *et al.*. Design and fabrication of a broadband polymer vertically coupled optical switch [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(2): 904~911
- 8 Bin Liu, Ali Shakouri, P. Abraham *et al.*. Optical add/drop multiplexers based on X-crossing vertical coupler filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4):410~412
- 9 Amnon Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**:919~933
- 10 Sun Yiling, Pan Jianxia. Modulation properties of spatial three-waveguide system using weakly coupled mode theory [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2):86~88
- 11 C. M. Kim, Y. J. Im. Switching operations of three-waveguide optical switches [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 2000, **6**(1):170~174
- 12 Jia Yubin. Coupling among three nonparallel waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1161~1165
贾玉斌. 三个非平行波导间的耦合[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1161~1165
- 13 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi *et al.*. Analysis of spatial multiwaveguide system based on weakly coupled mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12):1781~1786
孙一翎, 江晓清, 杨建义等. 基于弱耦合模理论的空间多波导耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12):1781~1786
- 14 E. E. Kriezis, A. G. Papagiannakis. A three-dimensional full vectorial beam propagation method for z -dependent structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(5):883~890