

文章编号: 0253-2239(2006)12-1772-5

空间四波导的传输特性分析与应用^{*}

周海峰 杨建义 王明华 江晓清^{**}

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 借助于 Marcatili 原理, 将二维分布的空间四波导分解为波导横截面上两个垂直的五层平板波导的组合, 提出适于用分离变量处理的解析模型。利用微扰方法对模型与实际结构的偏差进行了一级修正, 给出了传播常量的二级和二级近似表达式、静态模场分布、耦合系数以及传输特性公式, 并比较了此方法与有限差分直接解波动方程和光束传输两种数值方法的计算结果, 探讨了该模型的适用性和优点, 并检验了其精确性。应用该理论设计了包含光纤到户交换机常用的 1.31 μm , 1.49 μm , 1.55 μm 波长的四波长粗波分复用器件, 其插入损耗为 0.68 dB, 通过进一步优化分离的输出端口和波导结构可以获得更好的性能。

关键词: 集成光学; 空间波导耦合器; 四波导系统; 波分复用; Marcatili 方法; 微扰理论

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Propagation Characteristic Analysis and Applications of Spatial Four-Waveguide System

Zhou Haifeng Yang Jianyi Wang Minghua Jiang Xiaoqing

(Department of Information Science and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: By employing Marcatili's principle, the two-dimensional spatial four-waveguide system is decomposed as two perpendicular five-layer slab waveguides independently in the cross-section of the waveguides. The analytical model that can be interpreted appropriately by variable separation method is proposed. The first order correction for deviations of the model and practical structure is done by perturbation theory. The expressions of the first and second order propagation constants, static field distributions, coupling coefficient and propagation characteristic are presented. The feasibility and accuracy of the model are demonstrated by comparing the calculation results with finite difference solving semi-vector wave equation and beam propagation method. A coarse wavelength demultiplexer based on spatial four-waveguide system, including three common wavelengths 1.31 μm , 1.49 μm , and 1.55 μm of the triplex transistor in today's fiber-to-home, is designed with the insertion loss 0.68 dB. Further optimization of the separate outputs and waveguide structure can obtain higher qualities.

Key words: integrated optics; spatial waveguide coupler; four-waveguide system; wavelength demultiplexer; Marcatili's principles, perturbation theory

1 引 言

日渐成熟的三维加工技术, 使得集成光学从平面波导器件逐步走向三维集成的空间波导器件^[1], 如多模干涉器件^[2]和垂直型的光学开关^[3]。三维光学器件所具备的尺寸小、空间利用率高、信道密集以及高传输容量等诸多优点而备受青睐。二维分布的空间四波导系统^[4]是由常见的定向耦合器向垂直方向的空间拓展而得出的最简单空间结构, 可以支持多种集成光学器件, 包括光功率合成分配器、调制

器、光开关^[5]等多种器件。如本课题组对二维多模干涉光功分器的实验验证^[6], L. Friedrich^[7]利用 UV 写入和旋涂等成熟的集成工艺实现 4×4 双层方向空间耦合器, 这些成果为三维集成的研究提供了有力实验支持。Li Jian^[4]采用 Galerkin 方法解矢量波动方程对二维分布的空间四波导的传输特性进行了分析, 他们大多数利用的是数值方法, 如有限差分直接求解波动方程方法等, 处理四波导问题时数据量很大, 而且收敛性差, 完整的理论模型尚需建

^{*} 国家自然科学基金(60477018)和国家自然科学基金重点基金(60436020)资助课题。

作者简介: 周海峰(1984~), 男, 安徽宿松人, 浙江大学博士研究生, 主要从事集成光学研究。

^{**} 通信联系人。E-mail: iseejq@zju.edu.cn

收稿日期: 2005-12-21; 收到修改稿日期: 2006-04-11

立。许多文献解析的分析过一维平面上的平板波导、矩形波导的耦合,比如 Marcatili 方法^[8,9],微扰法^[9,10],波导阵列超模法^[11],变分法^[12]等。本文将建立二维分布的空间四波导模型,借助于 Marcatili 原理^[8],定量地分析了传播常量、模场分布和耦合系数等特性,并探索其在粗波分复用器件中的应用。

2 理论模型与传输分析

二维分布的空间四波导是折射率为 n_f 的四个波导掩埋于折射率 n_c 的背景材料里的结构(如图 1 所示)。一般可利用的空间耦合发生在折射率差较小或波导间隔较小的情况。这时,可以把空间四波导视为 x 和 y 方向两个独立且垂直的五层平板波导的组合,由此得出图 2 所示的理论模型,与实际结构的差别存在于中心区域和各边缘区域(图 2 中阴影部分)。下面先利用 Marcatili 的分离变量方法建立特性方程,然后用微扰方法来修正。

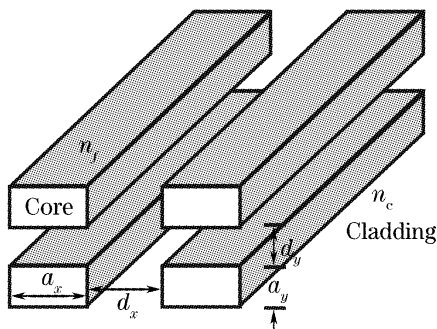


图 1 空间四波导实际结构全图,其四个矩形波导浸在折射率略低于背景介质中

Fig.1 Practical structure of spatial four-waveguide system and the four rectangular-core waveguides surrounded by a dielectric with slightly lower refractive index

根据标量近似,在折射率差较小的情况下,传输模场的横向分量满足下列波动方程:

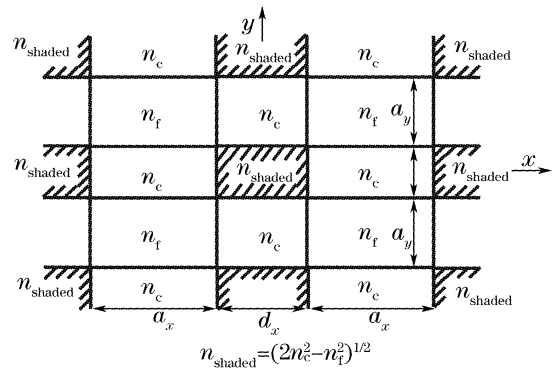


图 2 空间四波导的近似模型与实际结构的折射率分布仅在阴影区域相差 $n_c - (2n_c^2 - n_f^2)^{1/2}$

Fig.2 Proposed approximate model for spatial four-waveguide coupler structure as only $n_c - (2n_c^2 - n_f^2)^{1/2}$ difference compared with the practical model in the shaded areas

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + [k_0^2 n^2(x, y) - \beta^2] \psi = 0, \quad (1)$$

利用经典的分离方法,作为零级近似,可以把横截面分解成二十五个区域并忽略图 2 中所示的九个阴影区域的差别。

显然,空间四波导可以看作是沿 x 和 y 轴的两个独立的五层平板波导。折射率分布具有如下形式:

$$n^2(x, y) = n_x^2(x) + n_y^2(y) - n_f^2, \quad (2)$$

其中

$$n_x^2(x) = \begin{cases} n_c^2, & 0 < |x| < d_x/2 \\ n_f^2, & d_x/2 < |x| < d_x/2 + a_x \\ n_c^2, & |x| > d_x/2 + a_x \end{cases} \quad (3)$$

同理用 y 替换 x 可获得 $n_y^2(y)$ 。阴影区域标示的差别为 $n_c - (2n_c^2 - n_f^2)^{1/2}$,当折射率差非常小时可以忽略。根据分离变量方法,横向模场分布 $\psi(x, y)$ 可以分解为 $X(x)Y(y)$,得到两个方向独立的波动方程。比如在 x 方向,模场可以表示为

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + [k_0^2 n_x^2(x) - \beta_x^2] \right] X(x) = 0, \quad (4)$$

沿 x 方向的场分布可表示成

$$X(x) = \begin{cases} A_{+2} \exp\{-k_c[x - (a_x + d_x/2)]\}, & x > a_x + d_x/2 \\ A_1 \cos[k_x(x - a_x) + \varphi_1], & d_x/2 < x < a_x + d_x/2 \\ A_0 \cosh(k_c x + i\gamma), & |x| \leq d_x/2 \\ A_{-1} \cos[k_x(x + a_x) + \varphi_{-1}], & -(a_x + d_x/2) < x < -d_x/2 \\ A_{-2} \exp\{k_c[x + (a_x + d_x/2)]\}, & x < -(a_x + d_x/2) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $k_x = (k_0^2 n_f^2 - \beta_x^2)^{1/2}$, $k_{xc} = (\beta_x^2 - k_0^2 n_c^2)^{1/2}$,其它的参量可以根据边界条件产生。于是用于解传播常量的特征方程为^[8,9]

$$k_x a_x = p\pi - \arctan\left(\frac{k_x}{k_{xc}}\right) - \arctan\left[C \frac{k_x}{k_{xc}} \coth(d_x k_c + i\gamma)\right], \quad (6)$$

$\gamma=0$ 和 $\gamma=\pi/2$ 分别表示对称和反对称模, $C=1$ 和 $C=(n_t/n_c)^2$ 分别对应于准 TE 和准 TM 模式。 y 方向相同。 利用 $\beta^2=(\beta_x^2+\beta_y^2-k_0^2 n_t^2)^{1/2}$, 可以获得零级传播常量:

$$(n_{\text{eff}})^{(0)} = \beta/k_0, \quad (7)$$

沿 x 和 y 轴的对称、反对称模的不同组合可以得出传播常量的四个解 $\beta_{ss}, \beta_{sa}, \beta_{as}, \beta_{aa}$ 分别对应于四个最低模次, 即准 $TE_{00}, TE_{01}, TE_{10}, TE_{11}$ 模式, 如图 3 所示。 当波导关于 x 和 y 轴对称时, 如果完全不考虑

场分量的矢量特性 TE_{01} 和 TE_{10} 是简并的, 具有相同的传播常量, 然而当计入矢量特性, 简并消除。 另外, 当 x 或 y 任一方向上出现非对称等情形所带来的五层平板波导截止, 计算结果会出现等效折射率低于背景折射率的情形, 此时对应的模式也将随之消失。 (7) 式给出了忽略阴影区域差别时的零级近似表达式。 然而, 考虑到中心区域的存在使得对角波导发生耦合以及边缘阴影区域的影响, 利用微扰方法^[9], 可以得出归一化的传播常量的一级近似表达式为

$$(n_{\text{eff}})^{(1)} = \left\{ \left[\int_0^{d_x/2} \int_0^{d_y/2} + \int_{d_x/2+a_x}^{\infty} \int_0^{d_y/2} + \int_0^{d_x/2} \int_{d_y/2+a_y}^{\infty} + \int_{d_x/2+a_x}^{\infty} \int_{d_y/2+a_y}^{\infty} \right] |\psi|^2 dx dy / \left[\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} |\psi|^2 dx dy \right] \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

设光波在波导系统中以四个最低阶模式为主导(入射场与其他模式的交叠积分近乎为零), 根据光束传播理论, 光场传输过程可以视为这四种基本模式的简单叠加。 由于各模式的传播常量不同, 各自相速不同, 总的场分布随 z 值而改变,

$$\begin{aligned} \psi(z) = & a_{ss}(0)\psi_{ss}\exp(-i\beta_{ss}z) + \\ & a_{sa}(0)\psi_{sa}\exp(-i\beta_{sa}z) + \\ & a_{as}(0)\psi_{as}\exp(-i\beta_{as}z) + \\ & a_{aa}(0)\psi_{aa}\exp(-i\beta_{aa}z), \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $a_{ss}(0), a_{sa}(0), a_{as}(0), a_{aa}(0)$ 分别为初始场 $\psi(0)$ 展开为 $\psi_{ss}, \psi_{sa}, \psi_{as}, \psi_{aa}$ 等系统本征模的各自权重, 在数学形式上表现为叠加积分。 当光波从某一波导(如从图 3 中最右边的一个波峰所对应波导)输入时, $a_{ss}(0), a_{sa}(0), a_{as}(0), a_{aa}(0)$ 的相对值分别为 1、1、1、1, 正如文献[4]中所进行的假设。

3 计算与讨论

下面根据以上模型, 分析不同结构时空四波导系统的模场分布和传输特性, 同时验证该模型的适用情况。 先考虑波导的尺寸和间隔在 x 和 y 方向比例完全相等的情况(方向比为 1), 也即 $a_x=a_y$ 且 $d_x=d_y$ 。 根据对称性, 波导系统在 x 和 y 方向的耦合特征完全相同。 以常见的聚合物材料为例, 芯层和背景材料折射率分别为 $n_c=1.526$ 和 $n_t/n_c=1.005$, 设各波导的横截面为以 $6 \mu\text{m}$ 为边长的正方形。 选择 $1.55 \mu\text{m}$ 为光波波长, 利用(7)式和(8)式可以计算出有效折射率。 通过扫描 d_x/a_x , 得出有效折射率随 d_x/a_x 的变化曲线(如图 4 所示实线)。 图 4 中方块点是根据有限差分直接解波动方程得到的结果。 为精确计算有效折射率, 需要准确划分格子以求得更好的收敛性, 需处理的数据量特别大, 耗时特别长。 只有当不断提高计算精度和划分更密的格子, 此数值方法所得结果才越来越接近我们的解析结果。 另外, 虽然空间四波导在结构上存在很好的对称性, 但是由于准 TE 模和准 TM 模的不同偏

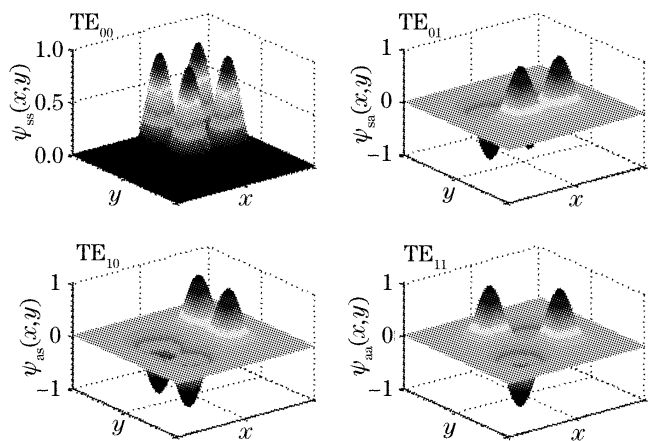


图 3 空间四波导对应于不同传播常量的四个最低阶次的准本征模式

Fig. 3 Four lowest order quasi-eigenmodes of the spatial four-waveguide structure, corresponding to different propagation constants

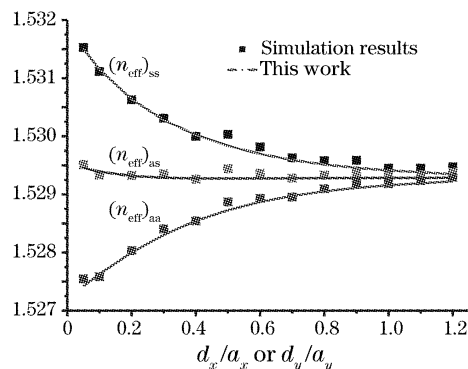


图 4 归一化有效折射率的计算与有限差分数值方法的比较
Fig. 4 Calculations of normalized effective refractive indices compared with finite-difference numerical method

振方向,使得 β_{sa} 并不等于 β_{as} ,但很接近。对应于不同传播常量的模场分布如图 3 所示。

在弱耦合且方向比等于 1 的情况下,空间四波导的耦合系数可以定义为

$$\kappa = 1/(\beta_{ss} - \beta_{aa}), \quad (10)$$

且 $\beta_{as} \approx \beta_{sa} \approx (\beta_{ss} + \beta_{aa})/2$ 。对于四波导的耦合长度可以定义为对角波导间能量发生一次交换的周期,也即可以定义为 $L = \pi\kappa$ 。为了对比本文的解析方法与光束传输法(BPM)的计算结果,图 5 给出了耦合长度 L 随 d_x/a_x 的变化曲线。很显然,当波导间隔偏小时,两种方法得出的结果非常相近。例如,当波导间隔 d_x 等于 $0.5a_x$ 时,通过数值模拟的耦合长度为 $1384 \mu\text{m}$,相比本文方法计算值 $1389 \mu\text{m}$,仅存在 0.36% 的相对误差。然而,随着波导间隔的增加,分离变量法提供耦合长度的绝对数值欠精确,主要因为对角波导通过中心区域发生直接耦合效应愈来愈强。如利用曲线拟合将会发现,耦合长度随波导间隔成指数上升趋势。

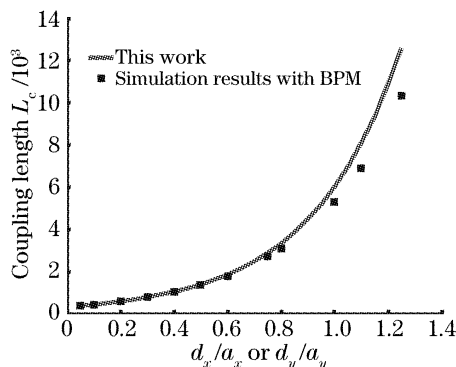


图 5 空间四矩形波导的耦合长度随波导结构的变化曲线

Fig. 5 Coupling length L_c of spatial four rectangular-core waveguides coupler versus the spacing and size of the waveguides

4 应用举例——粗波分复用器件

空间耦合四波导系统对于波长具有较强的灵敏性,利用这一特征可以设计粗波分复用器件^[13]。这里举例设计了包含光纤到户交换机常用的 $1.31 \mu\text{m}$, $1.49 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ 波长的粗波分复用器。某一特定波长在 x 和 y 方向的耦合长度 L_x, L_y 不同,当满足 $L = mL_x = nL_y$ (m, n 为整数)时,从某一波导输入的光束将会从特定端口输出,比如 m 为奇数、 n 为偶数时从入射波导 x 方向的相邻波导输出。对不同波长的光波其周期也不同,因此,如果在某一特定长度下,不同光波分别满足在四个不同输出端口的条件将可以实现波分复用功能。

图 6 为提出的四波导波分复用器结构,四个波导的宽度 $a_x = 7 \mu\text{m}$,高度 $a_y = 6 \mu\text{m}$,在 x 和 y 方向的间距 d_x, d_y 分别为 $4 \mu\text{m}$ 和 $3.5 \mu\text{m}$ 。选用三维工艺成熟且折射率差较小的聚合物材料作为例子进行分析。取填充和覆盖区域的折射率 n_c 为 1.526 ,芯层折射率 $n_f/n_c = 1.005$ 。为了精确控制四个波导的耦合长度,在输出端采用了如图 6 中所示的结构,对角尽量分开,且用不同的弯曲使相邻输出波导分离,也就是图示中的 x_{bent} 和 $2x_{\text{bent}}$ 。通过参量优化,取 $x_{\text{bent}} = 30 \mu\text{m}$, $L_{\text{bent}} = 3500 \mu\text{m}$ 。另外在图 6 的左上角给出了从 y 方向所观察的器件 $x-z$ 平面图。

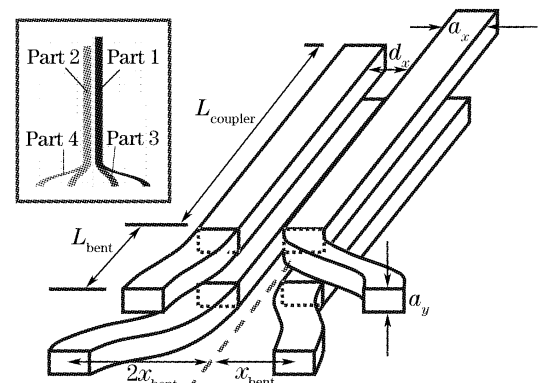


图 6 基于空间四波导的粗波分复用器,左上角的插入图为器件在 $x-z$ 平面的投影

Fig. 6 Schematic layout of the coarse wavelength division multiplexer (CWDM) consisting of spatial four-waveguide system. The insert in the upper-left corner shows the map picture of the device in the $x-z$ plane

借助于 Matlab 软件计算给出的理论传输曲线,可以得到四种不同波长的传输特性曲线,如图 7。当 $L_{\text{coupler}} = 17900 \mu\text{m}$ 左右时(图中用“ \times ”标示的位置),四个不同波长从不同的输出端口输出,从而确定了波分复用的长度窗口,设计的器件总长为 2.2 cm 。如果改变材料或者缩小波导之间的间隔或波导尺寸,完全可使器件的长度缩小到几毫米,以提高集成度。

利用 Beamprop 软件模拟得出图 8 所示的波谱响应曲线。从图中可以看出,在中心波长分别为 $1.31 \mu\text{m}$, $1.38 \mu\text{m}$, $1.49 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 位置时,各端口的输出展现出波分功能,其串扰低于 -11.32 dB ,通过进一步优化,有望获得更好的结果,但是耦合特性决定了只有有一些特殊波长组合(它们之间耦合长度成不同的倍数关系)达到很高的消光比。由于波导的空间限制作用,避免了衍射损耗,插入损耗仅有 0.68 dB ,使得光能利用率非常高。此外,器件偏振不灵敏,而常见的波分复用器件,比如阵列波导光栅

实现的密集波分复用器, 偏振损耗和因偏振导致的串扰非常明显。

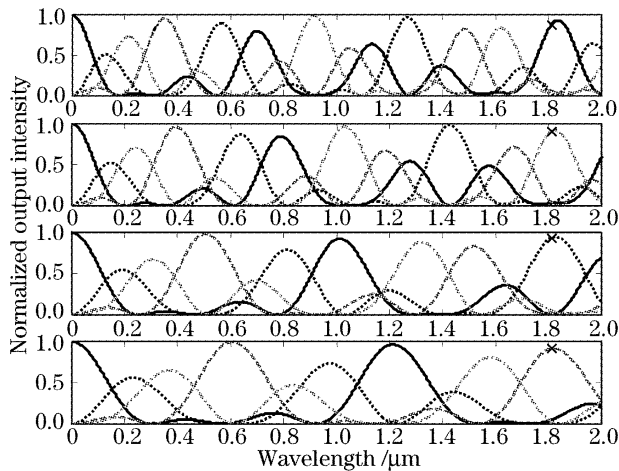


图 7 四个不同波长的传输曲线。实线、点线、划线和点划线分别依次对应于四个不同波导。图中的叉号标记了用于粗波分复用的耦合长度窗口

Fig. 7 Transmission curves of the four different wavelengths. The solid, dotted, dashed and dotted-dashed curves correspond to the four different waveguides in sequence. Four cross-marks denote the coupling window for coarse wavelength division multiplexer (CWDM)

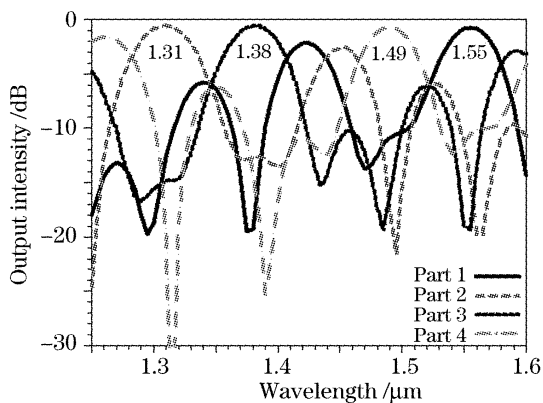


图 8 设计的波分复用器的波谱响应。四个通带的中心波长分别为 $1.31 \mu\text{m}$ 、 $1.38 \mu\text{m}$ 、 $1.49 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$, 从四个不同的输入波导输入可以得到相似的强度曲线

Fig. 8 Spectrum response curves of the proposed demultiplexer. Four bands with the central wavelength about $1.31 \mu\text{m}$, $1.38 \mu\text{m}$, $1.49 \mu\text{m}$ and $1.55 \mu\text{m}$ respectively are illustrated. The routes originating from any of the four ports can get similar output intensity

按照耦合原理和改变波导的横纵向参量, 可以对许多不同的波长组合的光波进行波分复用, 设计非常灵活。但由于耦合长度强烈依赖于波导间隔, 所以波导间隔需要精确控制, 容差较小, 从而加大了工艺难度。

5 结 论

本文利用分离变量和微扰修正的方法, 提出了计算二维分布的空间四波导系统的解析模型, 给出了估算传播常量、限制模的场分布、耦合系数等参量以及传输特性的表达式, 这一方法对设计基于空间四波导的集成光学器件有指导作用, 并且很容易推广到通道数更多的空间波导系统, 如二维空间波导阵列、矩形介质柱的光子晶体等, 尤其是对于低折射率差的情况。此外, 本文探索了空间四波导在波分复用器中的应用, 设计了适于光交换机的粗波分复用器, 并对器件性能作了简要分析。空间多波导系统在三维空间集成光学系统有许多应用前景, 基于这一理论可分析如空间分束器件、定向耦合器件和空间光互连等等。

参 考 文 献

- 1 C. Wächter, Th. Hennig, Th. Bauer. Integrated optics towards third dimension[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3278**: 102~111
- 2 Y. L. Sun, X. Q. Jiang, Y. Tang *et al.*. Two-dimensional overlapping-image multimode interference coupler [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 154~155
- 3 K. H. Kim, M. S. Kwon, S. Y. Shin *et al.*. Vertical digital thermo-optic switch in polymer [J]. *J. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 783~785
- 4 Jian Li, Andreas Weisshaar, Bijai K. Tripathi. An axially symmetrical four waveguide coupler [C]. *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS '93 Conference Proceedings IEEE*, 1993. 15~18
- 5 C. Wächter, Th. Bauer, M. Cumme *et al.*. Active and passive component of 3D integrated optics [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3936**: 130~137
- 6 Y. L. Sun, X. Q. Jiang, J. Y. Tang *et al.*. Experimental demonstration of two-dimensional multimode-interference optical power splitter [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(12): 2182~2184
- 7 L. Friedrich, P. Dannberg, C. Wächter *et al.*. Directional coupler device using a three-dimensional waveguide structure [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**: 239~243
- 8 E. A. J. Marcatili. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics [J]. *Bell. Syst. Technol. J.*, 1969, **48**: 2071~2101
- 9 Arun Kumar, A. N. Kaul, A. K. Ghatak. Prediction of coupling length in a rectangular-core directional coupler; an accurate analysis [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 86~88
- 10 Arun Kumar, K. Thyagarajan, A. K. Ghatak. Analysis of rectangular-core dielectric waveguides; an accurate perturbation approach [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**: 63~65
- 11 S. Somekh, E. Garmire, A. Yariv *et al.*. Channel optical waveguide directional couplers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**: 327~329
- 12 W. P. Huang, S. K. Chaudhuri. Variational couple-mode theory of optical couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(10): 1565~1570
- 13 Liu Qing, Ma Weidong, Wang Wenmin *et al.*. The research of coarse wavelength division multiplexer based on arrayed waveguide grating with broadened pass-band and low crosstalk [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1265~1268 (in Chinese) 刘青, 马卫东, 王文敏等. 一种通带平坦的粗波分复用/解复用器件的研制 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1265~1268