

文章编号 : 0253-2239(2002)02-0196-05

# 二维限制多模干涉器自镜像效应分析\*

马慧莲 江晓清 王明华

(浙江大学信电系, 杭州 310027)

摘要: 采用导模传输分析法对二维限制多模干涉器的自镜像效应进行分析,并用三维全矢量光束传输法对其分析结果作了进一步的验证。分析表明,一维限制多模干涉器的自镜像效应可以完全拓展到二维上。

关键词: 二维限制;多模干涉;自镜像效应;导模传输分析法;三维全矢量光束传输法

中图分类号: TN25 文献标识码: A

## 1 引 言

当前,集成光学的研究与应用基本上局限于波导平行于衬底的单一平面,因此,相邻波导的最小间距限制了集成光学芯片上的信道数。通常,这个最小间距是由相邻波导间的耦合情况或输入、输出波导与光纤相连时由光纤的几何尺寸所决定。为获得较小尺寸的器件,通常采用强限制的波导结构。然而,其较小的模场直径降低了与标准通信光纤的耦合效率。近几年提出的向第三维空间发展的集成光学可以有效地解决这对矛盾<sup>[1,2]</sup>。

基于自镜像效应(SIE)的多模干涉(MMI)器由于其具有结构紧凑、插入损耗低、频带较宽、制作工艺简单和容差性好等优点,近年来广泛应用于光功分器、TE/TM 模式分离器、马赫-曾德尔光开关、光分波/合波器、环形激光器、可调多波长光源发射器<sup>[3-7]</sup>等,可见,多模干涉器几乎参与到了每一个复杂的器件或小系统中,它是集成光学中相当重要的一个组成部分。

然而以往的多模干涉器的多模波导区只在一个方向上(平行于衬底)支持多模,而在另一个方向(垂直于衬底方向)只允许单模传输,故对其分析和应用在器件的横截面上都局限于一维自镜像效应,当多模干涉区横截面两个方向尺寸相当时,也就是在垂直于衬底方向也支持多模传输时(如目前应用较多的全 SiO<sub>2</sub> 和有机聚合物材料),必须考虑其二维自镜像效应,而且也可以利用其二维自镜像效应将原

来的器件平面集成向空间集成拓展,以获得更高的集成度。

在一维自镜像效应的分析中,人们研究了许多数值和解析方法,其中导模传输分析法是一种快速、简单、有效的近似方法<sup>[3]</sup>。

本文采用导模传输分析法对二维限制多模干涉器的自镜像效应进行分析,分析表明,一维限制多模干涉器的自镜像效应可以完全拓展到二维上,并用三维全矢量光束传输法<sup>[8]</sup>对其分析结果作了进一步的验证。

## 2 三维矩形波导的 Marcatili 分析<sup>[9]</sup>

本文分析的二维限制多模干涉器的基本波导结构如图 1(a)所示,它是由周围被较小折射率  $n_2$  的限制媒质包裹着的折射率  $n_1$  的波导区域构成。在限制媒质中的折射率不必在所有区域中都一样。假设模是良好被导的,也就是远离截止,所以场在区域 2、3、4 和 5 呈指数衰减,大部分功率限制在区域 1,在图 1(b)的划斜线角形区域中场的幅度小到可以忽略不计。因此,麦克斯韦方程可以通过假设简单的正弦和指数场分布,并且只沿着区域 1 的四边匹配边界条件来解。可以证明波导维持离散数目的导模分为  $E_{\nu\mu}^x$  和  $E_{\nu\mu}^y$  ( $\mu, \nu = 1, 2, 3, \dots$ ) 两族,其中模数  $\mu$  和  $\nu$  分别对应在  $x$  和  $y$  方向场分布的峰的数目。 $E_{\nu\mu}^x$  模的横向场分量是  $E_x$  和  $H_y$ , 而  $E_{\nu\mu}^y$  模的横向场分量是  $E_y$  和  $H_x$ 。模的形状由它在指数区域内的消光系数  $\eta_2, \xi_3, \eta_4$  和  $\xi_5$  以及在区域 1 中的传播常数  $k_x$  和  $k_y$  表征。设  $k_{xa}$  和  $k_{ya}$  ( $a = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 是在各个媒质中沿  $x$  和  $y$  方向的横向传播常数。匹配边界条件需假设

$$k_{x1} = k_{x2} = k_{x4} = k_x, \quad (1)$$

\* 浙江省自然科学基金(600028) 高等学校骨干教师、浙江省自然科学基金(601130)资助课题。

E-mail: hzmahl@163.net

收稿日期: 2001-06-22; 收到修改稿日期: 2001-09-07

以及  $k_{y1} = k_{y3} = k_{y5} = k_y$ . (2) 近似如下:

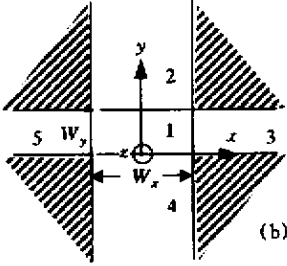
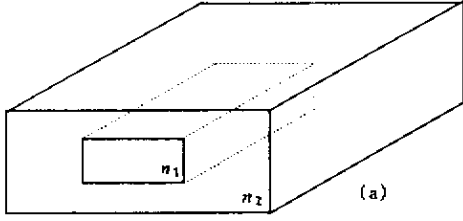


Fig.1 (a) Schematic diagram of three-dimensional waveguide.  $n_1 > n_2$ . (b) Cross-section of three-dimensional waveguide 还可以证明区域 1 中的纵向传播常数  $\beta$  满足

$$\beta = (k_1^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2}, \quad (3)$$

其中  $k_1 = kn_1 = (2\pi/\lambda_0)n_1$ ,  $\lambda_0$  为真空中的波长。在集成光路的通常情形中,  $n_1$  仅稍大于其他的  $n_i$  ( $\nu$  次模的有效折射率) 因此  $k_x$  和  $k_y \ll k_1$  利用二项式展开 (3) 式可近似为

$$\beta \approx k_1 - \frac{1}{2} \frac{k_x^2}{k_1} - \frac{1}{2} \frac{k_y^2}{k_1}, \quad (4)$$

由区域 1 的边界上匹配场分量得出超越方程

$$k_x W_x = \mu\pi - \arctan\left[ k_x (k_1^2 - k_3^2 - k_x^2)^{-1/2} \right] - \arctan\left[ k_x (k_1^2 - k_5^2 - k_x^2)^{-1/2} \right], \quad (5)$$

$$k_y W_y = \nu\pi - \arctan\left[ \frac{n_2^2}{n_1^2} k_y (k_1^2 - k_2^2 - k_y^2)^{-1/2} \right] - \arctan\left[ \frac{n_4^2}{n_1^2} k_y (k_1^2 - k_4^2 - k_y^2)^{-1/2} \right]. \quad (6)$$

然而对于良好限制的模可以假设大部分光功率是在区域 1 中。因此

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_x^2}{k_1^2 - k_3^2} \ll 1, \quad \frac{k_x^2}{k_1^2 - k_5^2} \ll 1, \\ \frac{k_y^2}{k_1^2 - k_2^2} \ll 1, \quad \frac{k_y^2}{k_1^2 - k_4^2} \ll 1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

使用 (7) 式的假设, 通过把 (5) 式中的反正切函数按幂级数展开, 只保留前两项, 可以得到  $k_x$  和  $k_y$  的近似解,

$$k_x = \frac{\mu\pi}{W_{x\text{eff}}}, \quad k_y = \frac{\nu\pi}{W_{y\text{eff}}}, \quad (8)$$

其中  $W_{x\text{eff}}$  和  $W_{y\text{eff}}$  分别是  $x$  和  $y$  方向的有效宽度, 可

$$W_{x\text{eff}} \approx W_x + \frac{1}{\pi} \frac{\lambda_0}{2} [(n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_5^2)^{-1/2}], \quad (9)$$

$$W_{y\text{eff}} \approx W_y + \frac{1}{\pi} \frac{\lambda_0}{2} \left[ \frac{n_2^2}{n_1^2} (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + \frac{n_4^2}{n_1^2} (n_1^2 - n_4^2)^{-1/2} \right]. \quad (10)$$

以上分析的是  $E_{y\omega}^y$  模, 对于  $E_{y\omega}^x$  模, 将  $W_{x\text{eff}}$  表达式和  $W_{y\text{eff}}$  表达式互换即可。

### 3 二维限制多模干涉器工作原理

多模干涉器的工作原理是基于 Ulrich 发现的多模波导的自镜像效应, 自镜像效应是波导中被激励起来的模式间的相长性干涉的结果。通过这个效应, 沿波导的传播方向将周期性地产生输入场的一个或多个像。导模传输分析法由于不考虑辐射模的影响, 而把输入场看成所有导模的线性组合, 故该方法比较简单, 在输入场的空间谱窄到不能激励起辐射模的情况下, 这是一种非常有效的近似方法。设光波从  $z = 0$  处入射到多模波导区, 输入场  $\psi(x, y)$  可写成所有导模的线性组合,

$$\psi(x, y, 0) = \sum_{\mu} \sum_{\nu} c_{\mu\nu} \varphi_{\mu\nu}(x, y), \quad (11)$$

其中  $\varphi_{\mu\nu}(x, y)$  是  $x$  方向为  $\mu$  次模、 $y$  方向为  $\nu$  模的场分布,  $c_{\mu\nu}$  为其场激励系数。在多模波导终端  $z = L$  处的横向场分布为

$$\psi(x, y, L) = \sum_{\mu} \sum_{\nu} c_{\mu\nu} \varphi_{\mu\nu}(x, y) \exp(j\omega t - j\beta_{\mu\nu}L), \quad (12)$$

其中  $\beta_{\mu\nu}$  为  $\varphi_{\mu\nu}(x, y)$  的纵向传播常数。

由 (4) 式和 (8) 式得

$$\beta_{\mu\nu} \approx \frac{2\pi n_1}{\lambda} - \frac{\mu^2\pi}{3L_x} - \frac{\nu^2\pi}{3L_y}, \quad (13)$$

其中

$$L_x = \frac{4n_1 W_{x\text{eff}}^2}{3\lambda}, \quad L_y = \frac{4n_1 W_{y\text{eff}}^2}{3\lambda}. \quad (14)$$

从 (12) 式隐去一个模恒等于 1 的公因子

$$\exp(-j\beta_{11}L + j\omega t),$$

并利用 (13) 式得

$$\psi(x, y, L) = \sum_{\mu} \sum_{\nu} c_{\mu\nu} \varphi_{\mu\nu}(x, y) \times$$

$$\exp\left\{ \left[ j \frac{(\mu + 1)(\mu - 1)\pi}{3L_x} + j \frac{(\nu + 1)(\nu - 1)\pi}{3L_y} \right] L \right\} \quad (15)$$

令  $\mu' = \mu - 1, \nu' = \nu - 1$  ( $\mu', \nu' = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) 则 (15) 式可写成:

$$\psi(x, y, L) = \sum_{\mu'} \sum_{\nu'} c_{\mu'\nu'} \varphi_{\mu'\nu'} \times \exp\left\{ \left[ j \frac{(\mu' + 2)\nu'\pi}{3L_x} + j \frac{(\nu' + 2)\mu'\pi}{3L_y} \right] L \right\} \quad (16)$$

对照一维限制多模干涉器工作原理<sup>[3]</sup>, 二维限制多模干涉器工作原理可描述如下: 当多模干涉区长度  $L$  满足以下关系时

$$L = \frac{mp_x}{q_x} 3L_x = \frac{np_y}{q_y} 3L_y, \quad (17)$$

$x$  和  $y$  方向将分别成  $q_x$  和  $q_y$  重像,  $p_x$  和  $p_y$  分别是和  $q_x, q_y$  互质的整数,  $m$  和  $n$  分别是  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面的干涉机理因子, 一般干涉原理,  $m(n) = 1$ , 成对干涉原理,  $m(n) = 1/3$ , 对称干涉原理  $m(n) = 1/4$ .

### 4 应用举例和分析比较

设定波导芯层折射率  $n_1 = 1.46$ , 波导限制层折射率  $n_2 = 1.45$ , 工作波长  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ , 则输入、输出单模波导芯区尺寸可取  $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}^2$ . 在以下的分析中, 输入光场均采用芯径为  $6 \mu\text{m}$  的单模光纤基模, 并且都是针对  $E_{y\nu}^x$  模。

示例 1 选取  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面结构完全对称, 设多模干涉区芯区尺寸为  $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ , 即  $W_x = W_y = W$ , 由 (9) 式、(10) 式和 (14) 式可知,  $L_x = L_y$ . 设输入光场中心坐标为  $(-21, 3, 0)$ , 即  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面均为一般输入模式, 此时干涉机理因子  $m = n = 1$ , 为获得较小尺寸的器件, 一般取  $p_x = p_y = 1$ , 这样由 (17) 式可知, 要同时在  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面成完整的像, 必须令  $q_x = q_y$ , 此时二维限制自镜像效应在  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面将完全对称. 令  $q_x = q_y = 2$ , 由 (14) 式、(17) 式得,  $L \approx 4900 \mu\text{m}$ . 图 2 给出了  $z = 4900 \mu\text{m}$  时的  $x$ - $z$  平面输出光场分布示意图。

在图 3 中, 我们用导模传输分析法进一步分析了器件附加损耗与多模干涉区长度的关系. 结果表明, 二维限制多模干涉器件类似于 一维限制多模干涉器件有较大的工艺制作容差性。

示例 2: 由 (17) 式不难发现, 要同时在  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面成完整的像, 多模干涉区芯区尺寸  $W_x$  和  $W_y$  的比值将只能是某些离散数值, 同时  $W_x$  和  $W_y$  的取值也决定了  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面的成像情况. 取  $m = n =$

4,  $p_x = p_y = 1, q_x = 4, q_y = 2$ , 这样由 (17) 式可知, 要同时在  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面成完整的像, 必须令  $W_x = \sqrt{2}W_y$ . 图 4 和图 5 分别给当多模干涉区芯区尺寸为  $48\sqrt{2} \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$  时,  $z = 1225 \mu\text{m}$  处的  $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面输出光场分布示意图。

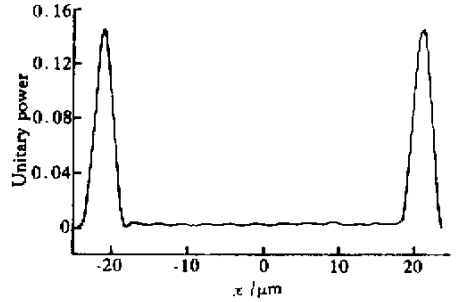


Fig.2 Schematic diagram of output field distribution at  $z = 4900 \mu\text{m}$  under general-fed condition

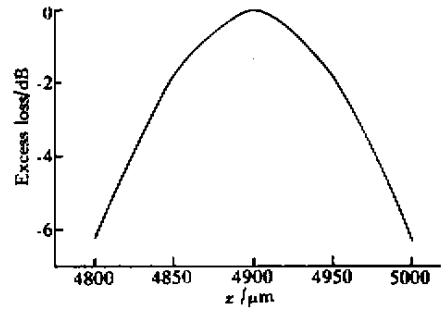


Fig.3 Excess loss versus the MMI section length with other parameters fixed

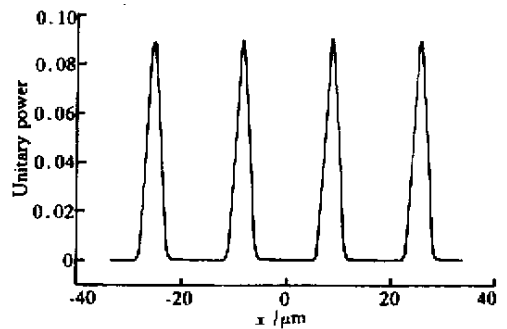


Fig.4 Schematic diagram of output field distribution at  $x$ - $z$  plane  $z = 1225 \mu\text{m}$  under center-fed condition

光束传输法是模拟光在介质中传播的一种非常有效的方法, 光束传输法从早期的快速傅里叶变换二维标量光束传输法, 发展到三维全矢量光束传输法<sup>[8]</sup>, 在模拟精度和运算速度上都有较大改进, 故本文直接采用三维全矢量光束传输法来进一步验证导模传输分析法在二维限制多模干涉器上的分析精度。

图 6 是直接采用三维全矢量光束传输法模拟了

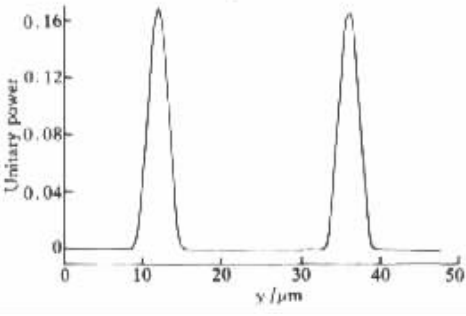


Fig. 5 Schematic diagram of output field distribution at  $y-x$  plane  $z = 1225 \mu\text{m}$  under center-fed condition

示例 1 多模干涉器在  $y = 3 \mu\text{m}$  时,  $x-z$  平面的输出功率演变情况, 从图 6 可知,  $x-z$  平面输出光功率的最大值出现在  $4920 \mu\text{m}$  附近。

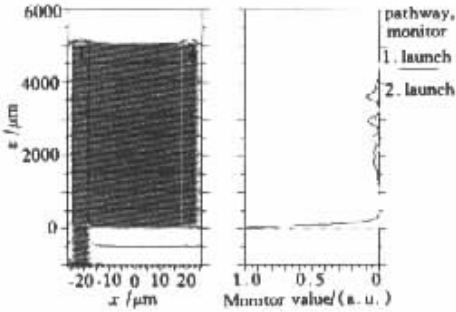


Fig. 6 Evolution of output power in  $x-z$  plane at  $y = 3 \mu\text{m}$

图 7 是对称输入时, 示例 2 多模干涉器  $z = 1225 \mu\text{m}$  处的输出光场分布情况。

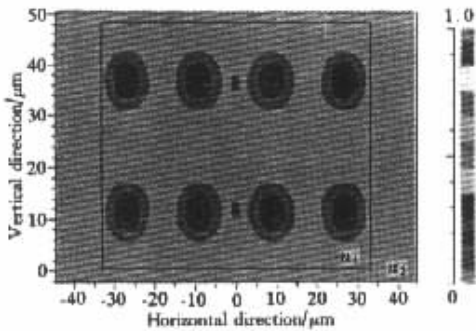


Fig. 7 Diagram of output field distribution at  $z = 1225 \mu\text{m}$  under center-fed condition when  $W_x = W_y = 48\sqrt{2} \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ ,  $z = 1225 \mu\text{m}$

可见, 以往分析一维限制多模干涉器自镜像效应的导模传输分析法可以在保证其快速、简洁的特点下, 能以较高的分析精度给出自镜像位置, 从而简化二维多模干涉器的设计。分析结果的误差主要来自(4)式、(9)式和(10)式的近似, 完全类似于导模传输分析法在分析一维限制多模干涉器自镜像效应时所产生的误差影响, Huang 的文章中以对这种近似

所产生的误差作过较详细的分析, 并提出了减小误差的相应补偿措施<sup>[10]</sup>。

总结 本文采用导模传输分析法对二维限制多模干涉器的自镜像效应进行分析, 并用三维全矢量光束传输法对其分析结果作了进一步的验证。分析表明, 一维限制多模干涉器的自镜像效应可以完全拓展到二维上, 这将大大提高器件的集成度。而且, 这种器件结构也较容易在目前研究较多的全  $\text{SiO}_2$  或有机聚合物材料上实现, 当输入波导位于多模干涉区底部时, 利用通常的光刻工艺就可实现, 至于输出波导, 可采用光纤和 V 型槽加以引出, 不过值得指出的是, 这种器件的优势在考虑许多器件单片集成时将有更大的体现。

参 考 文 献

[1] Garner S M, Lee S S, Chuyanov V *et al.*. Three-dimensional integrated optics using polymers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **QE-35**(8):1146 ~ 1155

[2] Wachter C, Hennig T, Bauer T *et al.*. Integrated optics towards third dimension. *Proc. SPIE*, 1998, **3278**:102 ~ 111

[3] Bachmann, Besse P A, Melchier H. General self-imaging properties in  $N \times N$  multimode interference couplers including phase relations. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18):3905 ~ 3911

[4] Yanagisawa M, Hashimoto T, Elisawa F *et al.*. A 2.5 Gb/s hybrid integrated multiwavelength light source composed of eight DFB-LD's and an MMI coupler on a silica PLC platform. *ECOC '98*, Madrid Spain. 1998.77 ~ 78

[5] Kin G, Kang B, Lee S *et al.*. A multimode-interferenced electrooptic TE/TM mode splitter. *CLEO Pacific Rim*. 1999. 585 ~ 586

[6] Augustsson T. Bragg grating-assisted MMI-coupler for add-drop multiplexing. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(8):1517 ~ 1522

[7] Kudo K, Yashiki K, Sasaki T *et al.*. 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength-selectable microarray DFB-LD's with monolithically integrated with MMI combiner, SOA, and EA-modulator. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3):242 ~ 243

[8] Kriezis E E, Papagiannakis A G. A three-dimensional full vectorial beam propagation method for  $z$ -dependent structures. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(5):883 ~ 890

[9] Marcatilli E A J. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. *Bell Syst. Tech.*, 1969, **48**:2071 ~ 2102

[10] Huang J Z, Hu M H, Fujita J *et al.*. High-performance metal-clad multimode interference devices for low-index-contrast material systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4):561 ~ 563

## Self-Imaging Effect Analysis of MMI Devices with Two-Dimensional Confinement

Ma Huilian Jiang Xiaoqing Wang Minghua

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

( Received 22 June 2001 ; revised 7 September 2001 )

**Abstract :** The guided-mode propagation analysis method is used to analyze self-imaging effect of multi-mode interference ( MMI ) devices with two-dimensional confinement. And the three-dimensional full vectorial beam propagation method ( BPM ) is used to confirm the analytical results. The analysis indicates that the self-imaging effect can be widened to the two-dimensional confinement on the basis of the one-dimensional confinement.

**Key words :** two-dimensional confinement ; multi-mode interference ; self-imaging effect ; guide-mode propagation analysis method ; three-dimensional full vectorial beam propagation method