

文章编号: 0258-702X(2002)03-0253-04

二维限制多模干涉器非对称自映像特性

江晓清, 马慧莲, 毛慧玲, 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江杭州 310027)

提要 采用导模传输法分析了二维限制多模干涉器(MMI)的自映像效应, 详细讨论了二维限制 MMI 器件的非对称自映像性质, 并用三维全矢量光束传输法验证了分析结果。

关键词 二维限制多模干涉器, 自映像效应, 功分器

中图分类号 TN 256 文献标识码 A

Asymmetrical Self-imaging Effects of MMI Devices with Two-dimensional Confinement

JIANG Xiao-qing, MA Hui-lian, MAO Hui-ling, WANG Ming-hua

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

Abstract The self-imaging effects of multi-mode interference(MMI) devices with two-dimensional confinement are given by using guided-mode propagation analysis method. This paper firstly discusses the asymmetrical characteristic MMI devices with two-dimensional confinement in detail. At the same time, the three-dimensional all-vector finite difference beam propagation method(BPM) is used to confirm the analytical results.

Key words MMI with two-dimensional confinement, self-imaging effect, power splitter

1 引 言

由于光通信技术的迅猛发展和当今社会对信息的要求, 光通信器件必须不断提高数据传输速率和扩大通信信道数, 以满足层出不穷的通信新业务和不断增长的新用户。然而, 当前集成光学器件研究与应用基本上局限于单一平面, 由于相邻波导与光纤相连的最小间距限制了集成光学芯片上的信道数, 为获得较小尺寸的器件, 可采用强限制的波导结构, 但其较小的模场直径降低了与标准通信光纤的耦合效率。因此, 近几年集成光学向三维空间发展, 以提高器件的集成度^[1-2]。

基于自映像效应^[3,4]的多模干涉器(Multi-mode Interference, MMI)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, M-Z 光开关, 光分波/合波器, 环形激光器, 可调多波长光源发射器^[3-7]等。但目前 MMI 的多模波导区只在一个方向上(一般平行于衬底)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, 故属于一维自映像效应。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, 就必须考虑其二维自映像效应, 这样就可以利用三维空间, 将原来的器件平面集成向三维空间集成拓展, 以获得更高的集成度 MMI 器件。

文献[8]给出了一种精确的分析二维自映像效应的计算方法, 但有关二维限制多模干涉器的成像性质等未见报道。本文采用导模传输分析法对二维限制多模干涉器的自映像原理和成像特性进行分析, 分析表明, 二维限制多模干涉器的自映像具有非

收稿日期 2001-08-30; 收到修改稿日期 2001-10-15

基金项目 浙江省自然科学基金(No. 600028) 国家自然科学基金(No. 60177012) 和高等学校骨干教师资助计划资助项目。

作者简介 江晓清(1959—), 男, 浙江人, 副教授(博士), 从事集成光波导器件、激光与光电子技术方面的研究。E-mail:

iseejxq@zju.edu.cn

对称映像特性,并用三维全矢量光束传输法^[9]进行模拟验证。

2 二维限制 MMI 的自映像原理

二维限制 MMI 由三维矩形波导组成(图 1),它是由周围较小折射率的媒质包裹着的折射率 n_c 较

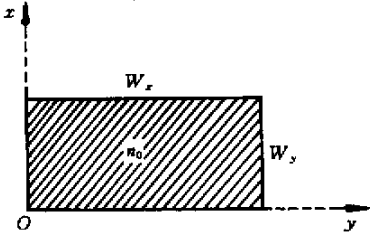


图 1 三维波导的横截面示意图

Fig. 1 Cross-section of three-dimensional waveguide

高的波导区域构成的。设 $W_x^2/W_y^2 = p/q \geq 1$, 并假设为强限制波导,则 TE, TM 模的场强为^[10]

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{v'\pi}{W_x}x\right) \cos\left(\frac{u\pi}{W_y}y\right) \quad \text{TE 模} \quad (1)$$

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{v'\pi}{W_x}x\right) \sin\left(\frac{u\pi}{W_y}y\right) \quad \text{TM 模} \quad (2)$$

其中 $v' = 0, 1, 2, 3, \dots; u = 0, 1, 2, 3, \dots; v, u$ 不能同时为零,分别为 x 方向, y 方向的模次,所以,强限制的矩形波导的模式可写成 x, y 方向分立的表达式

$$\phi_{vu}(x, y) = \phi_0 \phi_v(x) \cdot \phi_u(y) \quad (3)$$

同时沿 z 轴传播的传播常数 $\beta_{v'u}$ 为

$$\beta_{v'u}^2 = k^2 n_c^2 - \left(\frac{v'\pi}{W_x}\right)^2 - \left(\frac{u\pi}{W_y}\right)^2 \quad (4)$$

$k = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为真空中的波长。在一阶近似条件下有

$$\beta_{v'u} \approx kn_c - \frac{1}{2kn_c} \left[\left(\frac{v'\pi}{W_x}\right)^2 + \left(\frac{u\pi}{W_y}\right)^2 \right] \quad (5)$$

因为 $W_x^2/W_y^2 = p/q \geq 1$, u, v' 不能同时为零,以及便于同一维自映像原理比较,令 $v = v' - 1, L_\pi =$

$\frac{4n_c W_x^2}{3\lambda_0}$, 则最小的模式 $\beta_{00} = kn_c - \frac{\pi\lambda_0}{4n_c W_x^2}$ 。

设光波从 $z = 0$ 处入射到多模波导区,输入场 $\psi(x, y, 0)$ 可写成所有本征模的线性组合

$$\psi(x, y, 0) = \sum_v \sum_u C_{vu} \phi_{vu}(x, y) = \sum_v C_v \phi_v(x) \cdot \sum_u C_u \phi_u(y) \quad (6)$$

C_v, C_u 分别为 x, y 方向的场激励系数,在多模波导终端 $z = L$ 处的横向场分布为

$$\psi(x, y, L) = \sum_v C_v \phi_v(x) \cdot \sum_u C_u \phi_u(y) \cdot \exp(j\omega t - j\beta_{vu}L) \quad (7)$$

隐去时间因子 $\exp(j\omega t)$, 并乘上 $\exp(j\beta_{00}L)$ 因子(7)式可写成

$$\begin{aligned} \psi(x, y, L) &= \sum_v C_v \phi_v(x) \cdot \sum_u C_u \phi_u(y) \cdot \\ &\exp\left[j\frac{v(v+2)\pi}{3L_\pi}L + j\frac{p}{q} \cdot \frac{u^2\pi}{3L_\pi}L\right] = \\ &\sum_v C_v \phi_v(x) \exp\left[j\frac{v(v+2)\pi}{3L_\pi}L\right] \cdot \\ &\sum_u C_u \phi_u(y) \exp\left[j\frac{p}{q} \cdot \frac{u^2\pi}{3L_\pi}L\right] \quad (8) \end{aligned}$$

从公式(8)可知,二维 MMI 的自映像可看成两个相互垂直、独立的一维自映像效果的叠加,但只有 p, q 为两个互不可约的整数时(包括 $q = 1$),才能成理想的像。

3 非对称自映像特性的分析和数值模拟

根据一维限制的自映像原理^[3,4],由公式(8)可知,在 x 轴方向成像规律完全相同,如当 $L = 3L_\pi/2, 3L_\pi/2, 3L_\pi/2, \dots, 3L_\pi/2$ (s, N 为两个互不可约的整数)时分别成两对称像、反演像、正像和 N 重像以及具有周期成像的规律。对于 $W_x = W_y$ 二维限制对称的 MMI 器件,其成像规律完全与一维相同,原 N 重像变成 $N \times N$ 像,只是限制性成对干涉成像情况较复杂。对于非对称波导构成的二维 MMI 器件,其成像规律具有非对称性质。下面以几个非对称特例加以说明。把 $L = s(3L_u)/N$ 代入公式(8)得

$$\begin{aligned} \psi(x, y, L) &= \sum_v C_v \phi_v(x) \exp\left[j\frac{sv(v+2)}{N}\pi\right] \cdot \\ &\sum_u C_u \phi_u(y) \exp\left(j\frac{s'u^2}{M}\pi\right) \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\frac{s'}{M} = \frac{sp}{qN} \quad (10)$$

s', M 要求为两个互不可约的整数。从公式(9)可知,在 x 轴方向为标准的 N 重像^[4],同理可知在 y 轴方向为 M 重像。

1) 当 $p/q = 2, L = 3L_\pi/3$ 时,由公式(10)得 $s' = 2, M = 3$,成 3×3 重像,而 $L = 3L_\pi/2$ 时, $s' = M = 1$,为 2×1 重像(图 2)。由公式(9)(10)可知,当 $p/q = t$ 整数时,只能产生 $N \times M$ ($M \leq N$) 重像, M 值是分数 $\frac{t}{N}$ 不可约时分母的数值。在图 2 的数值

模拟中(以下模拟条件相同),我们采用了由 Rsoft 公司根据三维全矢量有限差分 BPM 法^[9]编写的 BeamPROP 软件,以硅基的 SOI 材料条载波导为例,波导横向尺寸 $W_x = 10 \mu\text{m}$,波导芯层折射率 $n_c = 3.45$,下限制层折射率为 1.45,包层为空气,工作波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 。为明显起见输入光场设为单模圆形光斑,芯区尺寸为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。从图中可看出,

当非对称输入($x = 4 \mu\text{m}, y = 1 \mu\text{m}$)时,由 x, y 二个方向的相互耦合叠加,在不同的 L 处,其输出光场分布再现输入光场的非对称成像。由于实际模拟的条件是非理想强限制波导,成像并非完善成像,这是计算模型产生的误差^[11]。如根据理论计算 $L_\pi = 297 \mu\text{m}$,而模拟时约为 $309 \mu\text{m}$ 最佳。

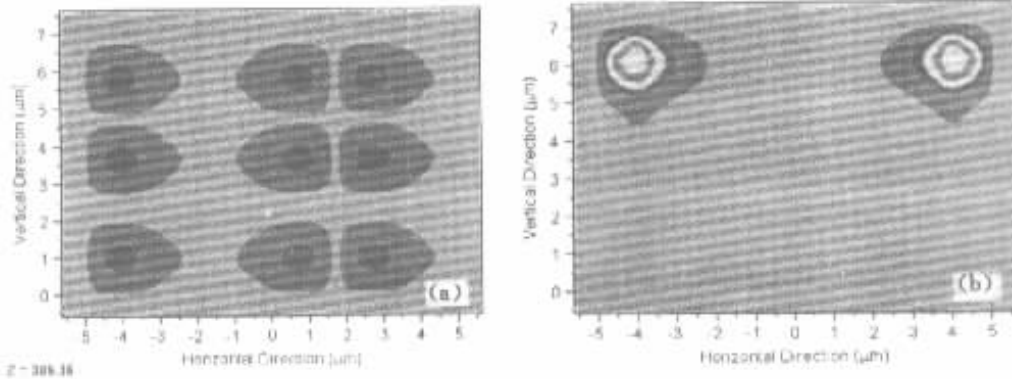


图 2 当 $p/q = 2, L = L_\pi$ (a), $3L_\pi/2$ (b) 非对称输入时 ($x = 4 \mu\text{m}, y = 1 \mu\text{m}$) 的输出光场分布

Fig.2 Distribution of field at $L = L_\pi$ (a), $3L_\pi/2$ (b) under the input condition $x = 4 \mu\text{m}, y = 1 \mu\text{m}$ when $p/q = 2$

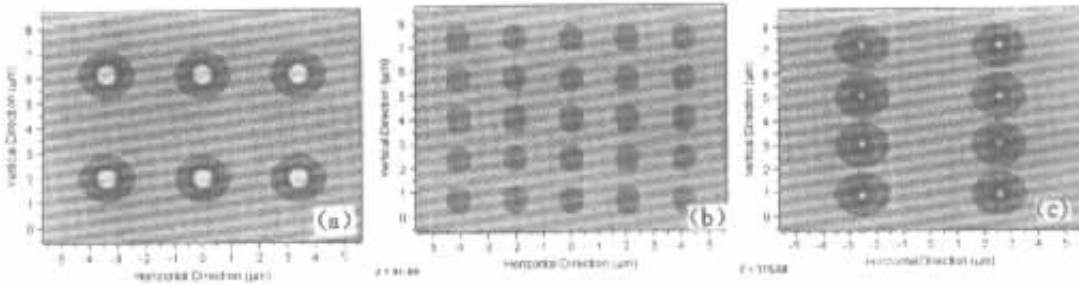


图 3 当 $p/q = 3/2, L = L_\pi/4$ (a), $3L_\pi/10$ (b), $3L_\pi/8$ (c) 对称中心输入时的输出光场分布

Fig.3 Distribution of field at $L = L_\pi/4$ (a), $3L_\pi/10$ (b), $3L_\pi/8$ (c) under center-input condition when $p/q = 3/2$

2) 当 p, q 为两个互不可约的整数时,由公式(10)可知,对不同的 L ,也可成 $N \times M$ 重像,但有 $M < N, M = N$ 或 $M > N$ 三种情况。如当 $p/q = 3/2, L = L_\pi, 6L_\pi/5, 3L_\pi/2$ 时,分别得到 $2 \times 3, 5 \times 5, 2 \times 4$ 重像(图 3 模拟时采用了对称输入, L 长度减少了四分之一,见下面第 3 的说明)。

3) 对于限制性干涉成像,也有相似的结果,如对称输入时只激励偶次模,成像周期减少四分之一(见图 3),成对干涉时成像周期减少三分之一,但此时情况较复杂,这里不展开讨论。

图 2, 3 表明,由于一般二维波导的非对称性, x, y 二个方向的耦合叠加结果,只有对于二个方向同时都成完善像才能再现二维分布完善的像,并随

着传输距离不同,其表现出来的成像特性不同于一维限制的自映像规律,具有较明显的非对称成像,其规律依赖于波导二个方向的尺寸比和传输距离。

4 结 论

以上分析表明,一维限制多模干涉器的自映像效应可以拓展到二维的 MMI 上,二维 MMI 的自映像可看成两个相互垂直、独立的一维自映像效果的叠加耦合,但只有当二维波导尺寸平方比 ($W_x^2/W_y^2 = q/p$) 的 q, p 为质数时,才能成完善的像,并具有非对称映像的特点。这种二维的 MMI 器件可在 Si 基或有机聚合物等材料上实现,利用二维的 MMI 制作

功分器可在光空间互连等方面具有的优势,可大大提高器件的集成度,将平面集成的光子器件推广到三维空间。

参 考 文 献

- 1 Sean M. Garner, Sang-Shin Lee, Vadim Chuyanov *et al.*. Three-dimensional integrated optics using polymers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35** (8):1146 ~ 1155
- 2 C. Wächter, Th. Hennig, Th. Bauer *et al.*. Integrated optics towards third dimension [C]. *SPIE*, 1998, **3278**:102 ~ 111
- 3 M. Bachmann, P. A. Besse, H. Melchior. General self-imaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phase relations [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33** (18): 3905 ~ 3911
- 4 Lucas B. Soldano, Erik C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13** (4):615 ~ 627
- 5 M. Yanagisawa, T. Hashimoto, F. Elisawa *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 [C]. ECOC '98, 20 ~ 24 September 1998, Madrid Spain, 77 ~ 78
- 6 Torsten Augustsson. Bragg grating-assisted MMI-coupler for add-drop multiplexing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16** (8):1517 ~ 1522
- 7 Koji Kudo, Kenichiro Yashiki, Tatsuya Sasaki *et al.*. 1.55- μm wavelength-selectable microarray DFB-LD 's with monolithically integrated MMI combiner, SOA, and EA-modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12** (3) 242 ~ 244
- 8 M. Rajarajan, B. M. Azizur Rahman, T. Wongcharoen *et al.*. Accurate analysis of MMI devices with two-dimensional confinement [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14** (9) 2078 ~ 2084
- 9 E. E. Kriezis, Antonis G. Papagiannakis. A three-dimensional full vectorial beam propagation method for z-dependent structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33** (5) 883 ~ 890
- 10 M. J. Adams. An Introduction to Optical Waveguides [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1981, Chapter 6. 179 ~ 182
- 11 J. Z. Huang, M. H. Hu, J. Fujita *et al.*. High-performance metal-clad multimode interference devices for low-index-contrast material systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10** (4) 561 ~ 563