

锥形多模干涉耦合器一般成像特性分析

乐孜纯 黄孙港 胡劲华 付明磊 张 明

(浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023)

摘要 锥形多模干涉耦合器克服了传统多模干涉(MMI)耦合器结构尺寸大的缺点,满足当前集成光器件高集成度的要求,其成像特性对设计基于它的集成光器件至关重要。根据多模干涉耦合器的自映像原理,对锥形多模干涉耦合器成像特性进行分析,发现成像特性与输入场位置、位置数、多模波导初始宽度及渐变率等参量密切相关,得到成像位置的解析表达式并总结出规律。最后采用导模传输分析法进行数值模拟和有限差分束传输法(FDBPM)进行仿真,验证了理论分析的正确性。根据成像位置表达式和规律,得到锥形多模干涉耦合器的一般成像特性,为用锥形多模干涉耦合器设计集成光器件的研究提供了理论依据和设计参考。

关键词 集成光学;锥形多模干涉耦合器;成像位置;导模传输分析法;有限差分光束传输法

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0611003

General Self-Imaging Properties for Line-Tapered Multimode Interference Couplers

Le Zichun Huang Sungang Hu Jinhua Fu Minglei Zhang Ming

(College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract The line-tapered multimode interference couplers which are more compact than traditional multimode interference couplers had been widely used in integrated optical components. The self-imaging properties are the most important characteristics for their applications in integrated optical components. Based on the self-imaging of multimode interference couplers, we analyze the general self-imaging properties in line-tapered multimode interference couplers in detail, and find the positions of images which directly relate to the position of input field, the position number, the initial width of line-tapered multimode interference couplers and transition ratio. The analytical expression of image positions and some characteristics are summarized. Finally, the guide-mode propagation analysis and finite-difference beam propagation method (FDBPM) are used to confirm the analytical results. These conclusions can be used to exactly get the positions of images without complex calculation, which provide a theoretical basis and design reference of integrated optical components with line-tapered multimode interference couplers.

Key words integrated optics; line-tapered multimode interference (MMI) couplers; images positions; guide-mode propagation analysis; finite-difference beam propagation method (FDBPM)

OCIS codes 110.2960; 130.0130; 130.3120; 130.2790; 350.5500

1 引 言

基于自映像效应的多模干涉(MMI)耦合器,因其具有宽带宽、低插入损耗、偏振不敏感、大工艺容差及易于规模化生产等优点已在光通信网络中获得了广泛应用^[1]。然而,随着对器件集成度的要求越来越高,传统的矩形 MMI 耦合器在器件结构尺寸上的制约凸显出来。根据传统 MMI 耦合器的工作

原理,其多模干涉区的宽度决定了区内的模式数目,模式数目的多少以及模式的激励系数又决定着 MMI 成像的清晰程度。另一方面,传统 MMI 耦合器的长度与其多模干涉区宽度的平方成正比^[1]。以业界广泛应用的、基于 MMI 耦合器的功率分配器为例,分配的通道数越多,要求 MMI 耦合器所成的像越清晰,即要求其多模干涉区的宽度越宽,于是每

收稿日期: 2010-12-22; 收到修改稿日期: 2011-01-24

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1080172)和浙江省重大科技计划项目(2009C11051)资助课题。

作者简介: 乐孜纯(1965—),女,博士,教授,主要从事光纤通信组网技术、微结构光电子器件等方面的研究。

E-mail: lzc@zjut.edu.cn

增加一个通道数,器件在长度方向上就会成平方增加。因此,缩小 MMI 耦合器结构尺寸已成为了研究者日益关注的问题。

目前已有一种有效减小传统 MMI 器件尺寸的方法被提出,即在多模干涉区引入 taper 结构(包括锥形、指数形或其他二次曲线形)。对 taper 结构 MMI 器件的设计以及对其性能的数值模拟分析^[2~8]结果显示,引入 taper 结构的 MMI 器件不仅大幅减小了器件尺寸,而且器件性能并无多大影响,这为 taper 结构 MMI 在高集成度器件中的应用奠定了基础。然而目前对 taper 结构 MMI 的研究只停留于对特定器件(比如功率分配器)的结构设计以及对其性能的模拟分析和优化,没有对 taper 结构 MMI 自映像一般成像机理、成像规律做系统深入的理论分析,尤其是没有对位置数 $S \neq 1$ 的情况进行分析,因此无法对基于 taper 结构 MMI 的集成光器件的设计提供理论依据和设计参考。

本文借鉴 M. Bachmann 等^[9,10]分析传统 MMI 耦合器的方法,针对 taper 结构中最常用的锥形 MMI 耦合器的一般成像特性进行分析,其后推导出在宽度方向上成单个像的位置表达式以及成 N 个像的成像解析表达式,并总结出一般成像规律,最后通过对理论结果进行 Matlab 编程模拟以及有限差分束传输法(FDBPM)仿真验证了理论分析的正确性。

2 锥形 MMI 耦合器在宽度方向上成单个像的机理

2.1 锥形 MMI 耦合器的自映像机理

锥形 MMI 耦合器结构如图 1 所示,其中传播方向为 z ,宽度方向为 y ,厚度方向为 x , O 为坐标原点, θ 为锥形 MMI 耦合器的锥角,多模干涉区及其包层二维等效折射率分别为 n_r 和 n_c ,则多模干涉区宽度方程表示为

$$W(z) = W_i - 2kz, \quad (1)$$

式中 $k = \tan \theta$,为锥形 MMI 耦合器多模干涉区的渐变率, W_i 为初始宽度。这里没有采用以往文献^[2,6]中的宽度方程,原因是本文侧重得出锥形 MMI 成像位置表达式及研究其一般成像规律。首先要通过确定 θ (θ 的范围一般小于 0.1° ,否则锥形 MMI 耦合器变为模式转换器)来确定 MMI 的形状。而文献^[2,6]中的锥形 MMI 耦合器只确定了初始及终端的宽度, θ 会随着锥形 MMI 的长度变化,因此无

法探讨锥形 MMI 耦合器的一般成像规律。

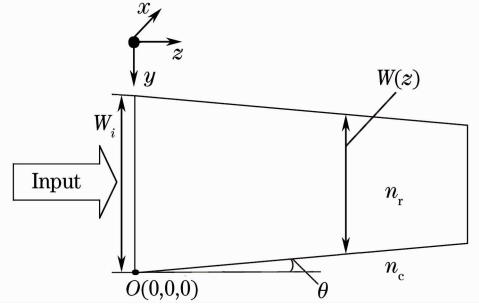


图 1 锥形 MMI 耦合器结构

Fig. 1 Structure of line-tapered MMI coupler

假设锥形 MMI 耦合器多模干涉区为阶跃型波导,当工作波长为 λ 时,可支持 m 个模式的传输,它们的模阶数分别为 $\nu = 0, 1, 2, \dots, m-1$ 。色散方程^[1]为

$$k_{y\nu}^2 + \beta_\nu^2 = k_0^2 n_r^2, \quad (2)$$

式中 β_ν 为传输常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, $k_{y\nu} = (\nu+1)\pi/W_c(z)$ 为 y 向波数而 $W_c(z) = W_g + W(z)$ 代表多模干涉区有效宽度, $W_g = (\lambda/\pi)(n_c/n_r)^{2\sigma}(n_r^2 - n_c^2)^{-1/2}$ 为 Goos-Hänchen 位移, $\sigma = 0$ 为 TE 模, $\sigma = 1$ 为 TM 模。根据(2)式可得 $\beta_\nu = k_0 n_r - \frac{(\nu+1)^2 \pi \lambda}{4n_r W_c^2(z)}$,因此 ν 阶模和

0 阶模的传输常数差为 $\Delta\beta_{\nu,0} = \frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda}{4n_r W_c^2(z)}$,进而, ν 阶模和 0 阶模在 z 处的相位差 $\Delta\phi(z)$ 为

$$\Delta\phi(z) = \int_0^z \frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda}{4n_r W_c^2(z)} dz = \frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda}{4n_r} \frac{z}{(W_i + W_g)(W_i + W_g - 2kz)}, \quad (3)$$

所以 ν 阶模和 0 阶模在 z 处的平均传输常数差为

$$(\beta_0 - \beta_\nu)_p(z) = \frac{\Delta\phi(z)}{z} = \frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda}{4n_r (W_i + W_g)(W_i + W_g - 2kz)}, \quad (4)$$

为方便讨论,定义两最低阶的拍长 $L_p^p(z)$ 为

$$L_p^p(z) = \frac{\pi}{(\beta_0 - \beta_1)_p(z)} = \frac{4n_r (W_i + W_g)(W_i + W_g - 2kz)}{3\lambda}. \quad (5)$$

MMI 耦合器之所以能够自映像,是因为它总存着一个位置,满足

$$\exp[j\pi(\beta_0 - \beta_1)_p z] = \pm \exp[j\pi(\beta_\nu - \beta_1)_p z] = \pm 1, \quad (6)$$

传统 MMI 耦合器由于其传输常数差是一个与位置无关的量,表示为 $\frac{\nu(\nu+2)\pi\lambda}{4n_r W_c^2}$,其中 W_c 为一固定值,

所以总存在一个位置(比如 $4n_r W_e^2/\lambda$),使得(6)式成立。

而对于锥形 MMI 耦合器,由(4)式可知,其传输常数之差是一个与位置 z 有关的量,通过数学表示可以得到 $\frac{(\beta_0 - \beta_\nu)_p(z)}{(\beta_0 - \beta_1)_p(z)} = \frac{\nu(\nu+2)}{3}$,可见也总存在一个位置,比如 $z = 3L_p^p(z)$,使得(6)式成立,因此锥形 MMI 耦合器也会产生自映像,这与参考文献[2]的证明结论相同。

2.2 锥形 MMI 耦合器成单个像的位置

考虑到 Goos-Hänchen 位移,为方便数学表达,重新建立坐标系如图 2 所示。假设在 MMI 耦合器多模干涉区起始端,即 $z=0$ 处光场横向分布为 $f_{in}(y,0)$,输入位置 y 满足 $W_1 \leq y \leq W_2$,其中 $W_2 - W_1$ 为输入场宽度。参考文献[11]的处理方法,把光场拓展到 $-W_2 \leq y \leq -W_1$,并把输入场扩展为奇函数形式 $F'_{in}(y) = f_{in}(y,0) - f_{in}(-y,0)$,更进一步,把输入场拓展成全实数范围的周期函数 $F_{in}(y) = F'_{in}[y + 2IW_e(0)]$, I 为整数。

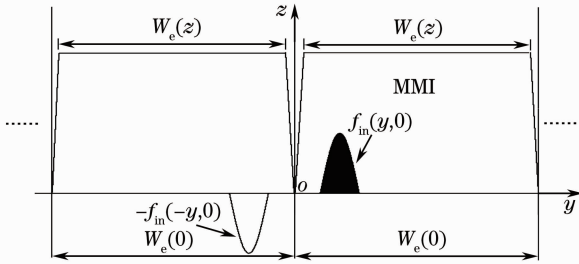


图 2 新坐标系下锥形 MMI 耦合器的拓展结构

Fig. 2 Structure of line-tapered MMI coupler with new coordinate system

如图 2 所示,多模干涉区中,所有导模都限制在有效宽度内^[11],假定这些模式的方程为

$$f_\nu(y, z) = \sin\left[\frac{(\nu+1)(y-kz)\pi}{W_e(z)}\right], \quad (7)$$

当输入场 $F_{in}(y)$ 入射到多模波导时,可以进行傅里叶分解,展开成所有导模的线性叠加

$$F_{in}(y, 0) = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_\nu f_\nu(y, 0), \quad (8)$$

式中 c_ν 是激励系数,由模式正交性确定^[1]。随着 z 的增大,多模干涉区的宽度越来越小,其中的导模数量也不断减少,这些减少的导模都成了辐射模,泄漏到多模干涉区以外。于是在 z 处的横向场分布由多模干涉区内剩余的、并仍保持着相同激励系数的 M 个导模叠加而成^[1],其表示为

$$F(y, z) = \sum_{\nu=0}^{M-1} c_\nu f_\nu(y, z) \exp[j(\beta_0 - \beta_\nu)z]. \quad (9)$$

将(4),(5)式代入(9)式得

$$F(y, z) = \sum_{\nu=0}^{M-1} c_\nu f_\nu(y, z) \exp\left[j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_p^p(z)} z\right]. \quad (10)$$

从(10)式可以发现,当 $\exp\left[j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_p^p(z)} z\right] = \pm 1$ 时,在 z 处会得到一个输入场的像,像的周期与输入场 $F_{in}(y,0)$ 周期的比值为 $W_e(z)/W_e(0)$,而若使 $\exp\left[j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_p^p(z)} z\right] = \pm 1$, z 向位置需满足 $z = S[3L_p^p(z)]$ 。又由于(10)式的指数项与输入场位置无关,所以无论输入场位置如何,都会在 $z = S[3L_p^p(z)]$ 处得到唯一的像。

2.3 锥形 MMI 耦合器成单个像位置的仿真实验

以有机聚合物掩埋型波导^[12~15]为例,采用的工作波长 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$,折射率 $n_c = 1.46$ 和 $n_r = 1.51$, $W_i = 60 \mu\text{m}$,输入波导宽度 $W_0 = 5 \mu\text{m}$, $k = 1/2000$,令 $z = 3L_p^p(z)$,利用上述理论方法解得 $z = 13422.42 \mu\text{m}$,即输入场位置任意,在 $z = 13422.42 \mu\text{m}$ 处都会得到唯一像。

为验证理论分析的正确性,采用 FDBPM 对输入波导长为 $1000 \mu\text{m}$,输入场 y 向位置位于 $W_{in1} = 3 \mu\text{m}$ 和 $W_{in2} = 30.5 \mu\text{m}$ 两种情况进行仿真,得到波导场分布如图 3 所示。由图 3 可知,在 $z = 14388 \mu\text{m}$ 即多模干涉区长度为 $z = 13388 \mu\text{m}$ 处,两种输入场位置情况都成唯一像,采用本文理论方法得到的分析结果与 FDBPM 仿真结果的误差仅为 0.25% ;并且进一步的仿真还发现,无论输入场位置如何,都可以在 $z = 14388 \mu\text{m}$ 附近得到唯一像。

从仿真及(10)式可知,当锥形 MMI 耦合器多

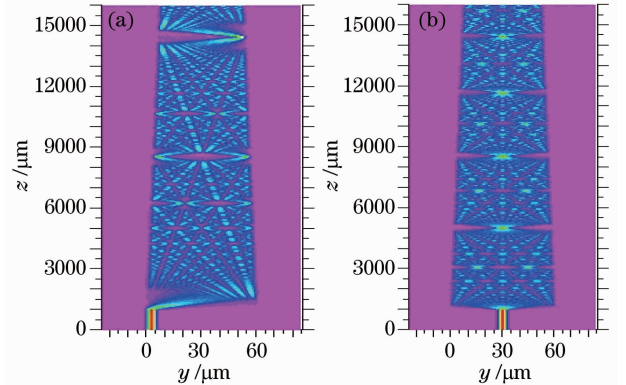


图 3 锥形 MMI 耦合器的光场分布情况。(a)输入场在 W_{in1} 处,(b)输入场在 W_{in2} 处

Fig. 3 Optical-field distributions on line-tapered multimode interference coupler. (a) input field at W_{in1} , (b) input field at W_{in2}

模干涉区长度 $z = S[3L_p^s(z)]$ 时, 无论输入场位置怎样, 都会得到唯一像。然而(10)式无法给出锥形 MMI 在宽度方向上成多个像时, 像的 z 向、 y 向位置以及成像的一般规律。

3 锥形 MMI 耦合器成 N 个像的一般成像规律

3.1 锥形 MMI 耦合器一般成像规律的理论结果

令锥形 MMI 多模干涉区的长度为

$$z = L_N^S = S[3L_p^s(z)]/N, \quad (11)$$

式中 N 为正整数且与 S 互素。将(11)式带入(10)式得

$$F(y, z) = \sum_{\nu=0}^{M-1} c_\nu f_\nu(y, z) \exp[j\nu(\nu+2)\pi S/N]. \quad (12)$$

从参考文献[11]的证明方法得到

$$F(y, z) = \frac{1}{C} \sum_{\nu=0}^{M-1} c_\nu f_\nu(y, z) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\phi_{\nu,n}), \quad (13)$$

式中 C 为只与 S 和 N 有关而与 ν 和 n 无关的系数, n 为 0 到 $N-1$ 的整数, 其中

$$\begin{cases} \phi_{\nu,n} = -(\nu+1)y_n/W_e(z) + \varphi_n \\ y_n + kz = (2n-N)SW_e(z)/N + kz. \\ \varphi_n = n(N-n)S\pi/N \end{cases} \quad (14)$$

利用欧拉公式, 并令 $F'(y, z) = \sum_{\nu=0}^{M-1} c_\nu f_\nu(y, z)$, 结合(7), (13)和(14)式得到

$$F(y, z) = \frac{1}{C} \sum_{n=0}^{N-1} F'(y - y_n, z) \exp(j\varphi_n). \quad (15)$$

所以在 $z = L_N^S = S[3L_p^s(z)]/N$ 处的场分布是由输入场 $F_{in}(y, 0)$ 的 N 个像组成, 各个像的 y 向位置在 $y_n + kz$ 处, 其相位为 φ_n , 像的宽度与输入场 $F_{in}(y, 0)$ 宽度的比值为 $W_e(z)/W_e(0)$ 。

在 $z = L_N^S = S[3L_p^s(z)]/N$ 处会有 N 个像, 这些像都可以经过平移落到一个周期内, 即在 $[-W_e(z) - kz, -kz] \cup [kz, kz + W_e(z)]$ 或 $[kz, kz + W_e(z)] \cup [W_e(0) + kz, W_e(0) + kz + W_e(z)]$ 内, 所以这些像的位置方程可表述为

表 1 任意的 i 和 S 下像的 y 向位置公式表达式

Table 1 Expression of y -axis' positions of images with any i and S

Positions of images	For odd i	For even i	Position number
y_n^\pm	$\beta \mp \left[-AY_{00} + \frac{W_e(z)}{N} \right] - \frac{2W_e(z)}{N} \left(n \mp \frac{i-1}{2} \right)$	$\beta \pm AY_{00} - \frac{2W_e(z)}{N} \left(n \mp \frac{i}{2} \right)$	For odd S
y_n^\pm	$\alpha \mp \left[-AY_{00} + \frac{W_e(z)}{N} \right] + \frac{2W_e(z)}{N} \left(n \pm \frac{i-1}{2} \right)$	$\alpha \pm AY_{00} + \frac{2W_e(z)}{N} \left(n \pm \frac{i}{2} \right)$	For even S

$$y_n + kz = (2n - N)SW_e(z)/N + 2IW_e(0) + kz, \quad (16)$$

经过处理可得

$$\begin{cases} y_n + kz = [2W_e(z)n_1/N + kz] \cup \\ [W_e(0) + kz + 2W_e(z)n_2/N] \quad S \text{ 为偶数} \\ y_n + kz = [W_e(z) + kz - 2W_e(z)n_1/N] \cup \\ [-kz - 2W_e(z)n_2/N] \quad S \text{ 为奇数} \end{cases}, \quad (17)$$

式中 n_1 为 0 到 $[N/2]$ 的整数, n_2 为 $[N/2]$ 到 N 的整数。所以当 S 为奇数时, 各个像位置 $y_n + kz$ 按 n 的升序从 $W_e(z) + kz$ 沿 y 轴负方向排列, 当 S 为偶数时, 各个像位置 $y_n + kz$ 按 n 的升序从 kz 沿 y 轴正方向排列。如图 4 为 $S=1$ 时 n 个像沿 y 轴负方向的排列情况。

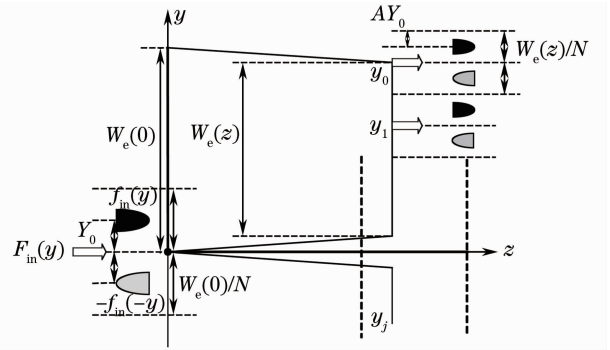


图 4 在 $S=1$ 处, 各个像的分布情况

Fig. 4 Distribution of the various images at $S=1$

设输入场位置为 Y_0 , 其满足

$$0 < Y_0 = Y_{00} + iW_e(0)/N < W_e(0), \quad (18)$$

式中 $0 < Y_{00} < W_e(0)/N, i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 为输入端序号。如图 4 所示, 在 $z = L_N^S = S[3L_p^s(z)]/N$ 处, 把与 $f_{in}(y, 0)$ 及 $-f_{in}(-y, 0)$ 对应的像分别称为正像和反像, 记正像为 y_n^+ , 反像为 y_n^- 。由于 MMI 耦合器多模区实际范围为 $kz \leq y \leq W_e(z) + kz$, 所以正、反像位置为

$$kz \leq y_n^\pm = y_n \pm AY_0 \leq W_e(z) + kz, \quad (19)$$

式中 $A = W_e(z)/W_e(0)$, 由像的宽度变化确定。

结合(17)~(19)式, 经数学推导所得结果如表 1 所示。

表 1 中 $\alpha = [W_e(0) - W_e(z)]/2, \beta = [W_e(0) + W_e(z)]/2$ 。根据表 1, 可以总结出 3 个规律。

1) 当输入场位置 Y_0 和 N 给定, 所有奇数 S 对应相同的成像位置表达式, 其具体关系为 $y_n^{\pm}(z_1) - W_e(0)/2 = \frac{W_e(z_1)}{W_e(z_2)}$; 同理, 所有偶数 S 对应相同的成像位置表达式, 其具体关系也为 $y_n^{\pm}(z_1) - W_e(0)/2 = \frac{W_e(z_1)}{W_e(z_2)}$ 。

2) 当 S, N, Y_{00} 给定, 所有偶数 i 对应相同的成像位置(即 $i = 0$ 的位置); 所有奇数 i 对应相同的成像位置(即 $i = 1$ 的位置)。

3) 相同位置数 S 的正、反像互相间隔, 且间隔为 $2AY_0$, 相邻的同种性质的像之间的间隔为 $2W_e(z)/N$ 。相同 S 的像的宽度相同, 不同 S 的像宽度的比值为 $W_e(z_1)/W_e(z_2)$ 。

3.2 锥形 MMI 一般成像规律的仿真验证

对锥形 MMI 耦合器进行 FDBPM 仿真^[16,17], 仍取 $Y_0 = 3 \mu\text{m}$, 图 5 给出 TE 模的二维(2D)光场扫描图。

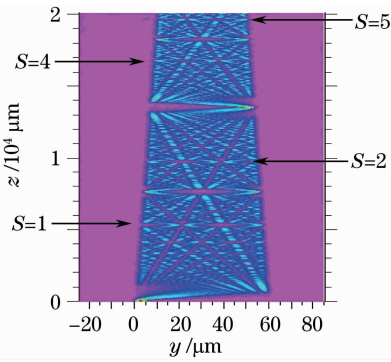


图 5 锥形 MMI 耦合器的光场分布
Fig. 5 Optical-field distributions in line-tapered multimode interference coupler

取 $N = 3, S$ 分别取 1, 2, 4, 5。利用(15)式的结论, 令 $z = L_N^S = S[3L_x^p(z)]/N$, 结合(5)式即可解得像沿传输方向(z 方向)的位置。

表 2 为采用本文理论方法计算得到的成像位置 2 与 FDBPM 仿真得到成像位置的对比, 两种方法得到的结果基本吻合, 差值介于 0.077% 和 0.132% 之间。其中 $N=3$ 。

将 $N = 3, S = 1, 2, 4, 5, Y_0 = 3 \mu\text{m}$ (即 $i = 0$) 代入表 1 中的公式, 计算得到在 y 方向上的成像结果, 如表 3 所示。

表 2 像在 z 方向上的理论计算值及 FDBPM 仿真值
Table 2 z -axis' positions of images obtained by theoretical calculation and FDBPM simulation

S	1	2	4	5
Theoretical value / μm	5242.083	9655.526	16675.137	19512.223
FDBPM simulation / μm	5249	9668	16688	19535
Relative error / %	0.132	0.129	0.077	0.117

表 3 $N = 3, S = 1, 2, 4, 5$, 像在 y 方向上的位置
Table 3 The y -axis' positions of images with $N=3, S=1, 2, 4, 5$

S	1	2	4	5
Calculated positions of images / μm	55.68 ⁻	7.39 ⁺	10.55 ⁺	49.25 ⁻
FDBPM simulation / μm	24.01 ⁺	36.55 ⁻	35.73 ⁻	25.68 ⁺
FDBPM simulation / μm	18.45 ⁻	41.67 ⁺	40.15 ⁺	21.55 ⁻

注: 表中数字上标+、-号分别表示正像、反像。

为验证表 3 的正确性, 一方面根据导模传输分析法(MPA)对(12)式进行 Matlab 编程模拟, 另一方面采用 FDBPM 对这种结构的 MMI 耦合器进行仿真验证, 得到仿真结果如图 6 所示。

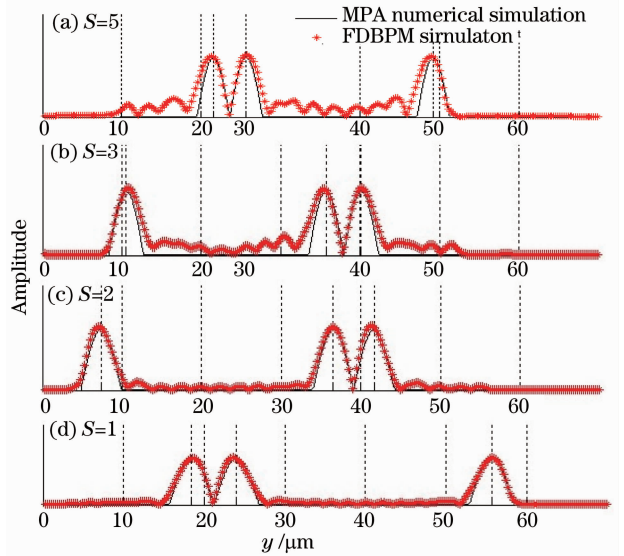


图 6 在 $N=3, S=1, 2, 4, 5$ 下, MPA 模拟及 FDBPM 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of MPA and FDBPM with $N=3, S=1, 2, 4, 5$

由图 6 可见, MPA 数值模拟和 FDBPM 仿真, 在成像位置上都与理论计算结果(表 3)一致。采用

FDBPM 仿真时,由于考虑了模式的辐射及截止,所以在成像质量上没有 MPA 数值模拟完美。而 S 为奇数和偶数时的成像位置规律符合 3.1 节得出的成像规律 1) 的表述,因此证明了锥形 MMI 耦合器成像表达式及规律 1) 的正确性。

为验证成像规律 2) 的正确性,取 $S=1, N=4$, 让输入位置参量 i 分别取 0, 1, 2, 3, 同样采用对 (13) 式进行编程模拟及 FDBPM 仿真,结果如图 7 所示。

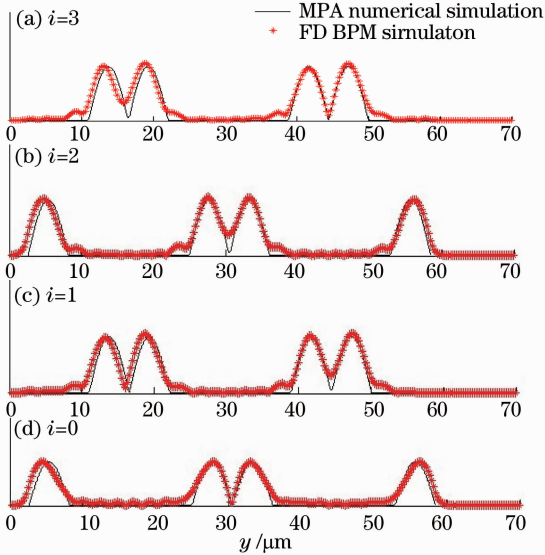


图 7 在 $i=0, 1, 2, 3$ 下,MPA 数值模拟及 FDBPM 仿真结果

Fig. 7 Simulation results of MPA and FDBPM with $i=0, 1, 2, 3$

从图 7 可以看出,MPA 数值模拟得到的结果符合成像规律 2) 的表述;而 FDBPM 仿真结果虽然在细节上略有不同,但它们的波形几乎一致,是因为 FDBPM 考虑了模式的辐射及截止,导致成像不完全一致。因此得出锥形 MMI 耦合器的成像规律 2) 也是正确的。

观察表 3,不难发现,相同 S 的相邻的正、反像之间间隔为 $2AY_0$,相邻的同种性质的像之间的间隔为 $2W_e(z)/N$,这与规律 3) 表述完全符合。

不同 S 值所成像的宽度的比值为 $W_e(z_1)/W_e(z_2)$,采用 MPA 数值模拟及仿真结果(图 6)来验证。由于波形的几何宽度不好确定,采用波形的 3 dB 宽度进行比较,如图 8 所示。

由图 8 可以发现: $\frac{W_{S=2}}{W_{S=1}} = \frac{3.31}{3.6} \approx 91.94\%$, $W_{S=2}, W_{S=1}$ 分别表示 $S=2$ 和 $S=1$ 的波形 3 dB 宽度,而 $\frac{W_e(S=2)}{W_e(S=1)} \approx \frac{51.43}{55.84} \approx 92.09\%$,由此证明成像宽度变化符合规律 3) 的表述。

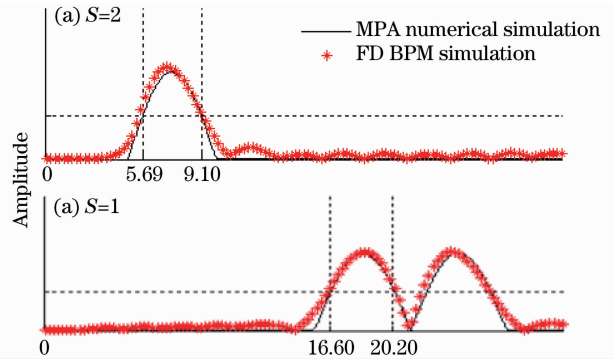


图 8 $S=1$ 和 $S=2$ 的 3 dB 波形宽度

Fig. 8 3 dB-width of wave form with $S=1$ and $S=2$

4 结 论

为得到锥形 MMI 耦合器的成像表达式及规律,从模式传输分析法出发,经过严谨的数学推理,证明了锥形 MMI 能够成像,并得到当输入场位置在 Y_0 时,其在传播方向上的成像位置解析表达式。采用导模传输分析法和有限差分束传输法验证了理论分析的正确性。另外,还总结出 3 条锥形 MMI 耦合器的成像规律,为研究基于锥形 MMI 耦合器的集成光器件提供了理论依据和设计参考。

致谢 感谢中国计量学院孙一翎教授的热心帮助。

参 考 文 献

- Soldano L. B., Pennings E. C. M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627
- Wu Zhigang, Zhang Weigang, Wang Zhi *et al.*. Tapered multimode interference combiners for coherent receivers [J]. *Chin. J. Semicond.*, 2006, **27**(2): 328~335
武志刚, 张伟刚, 王志等. 用于相干接收的锥形干涉合波器 [J]. *半导体学报*, 2006, **27**(2): 328~335
- Amir Hosseini, John Covey, David N. Kwong *et al.*. Tapered multi-mode interference couplers for high order mode power extraction [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(7): 075502
- Kehinde A., Latunde-Dada, Frank P. Payne. Theory and design of adiabatically tapered multimode interference couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 834~839
- P. P. Sahu. Compact multimode interference coupler with tapered waveguide geometry [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(2): 295~301
- Yan Qingfeng, Yu jinzhong, Liu Zhongli. Design and fabrication of ultracompact 3-dB MMI coupler in silicon-on-insulator [J]. *Chin. J. Semicond.*, 2003, **24**(2): 133~136
严清峰, 余金中, 刘忠立. 一种紧凑型 SOI 3-dB 多模干涉耦合器 [J]. *半导体学报*, 2003, **24**(2): 133~136
- Xiao Jinbiao, Liu Xu, Cai Chun *et al.*. Semi-vectorial analysis of a compact wavelength demultiplexer based on the tapered multimode interference coupler [J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(7): 2015~2022
- Song Jun, He Sailing. A flat-topped etched diffraction grating

- demultiplexer with low polarization-dependent loss using a tapped MMI structure[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8): 438~440
- 9 M. Bachmann, P. A. Besse, H. Melchior. General selfimaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phase relations[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 3905~3910
- 10 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua. Analysis of general self-imaging positions in multimode interference couplers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 759~762
孙一翎, 江晓清, 王明华. 多模干涉耦合器一般成像位置分析 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 759~762
- 11 T. Rasmussen, J. K. Rasmussen, J. H. Povlsen. Design and performance evaluation of 1-by-64 multimode interference power splitter for optical communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(10): 2069~2074
- 12 Shuhao Fan, Daniel Guidotti, Hungchang Chien *et al.*. Compact polymeric four-wavelength multiplexers based on cascaded step-size MMI for 1G/10G hybrid TDM-PON applications[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12664~12669
- 13 M. H. Ibrahim, N. M. Kassim, A. B. Mohammad *et al.*. A novel 1x2 multimode interference optical wavelength filter based on photodefinable benzocyclobutene (BCB 4024-40) polymer[J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(5): 1024~1028
- 14 Fan Wang, Jianyi Yang, Limei Chen *et al.*. Optical switch based on multimode interference coupler[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 421~423
- 15 Jong Moo Lee, Joon Tae Ahn, Doo Hee Cho *et al.*. Vertical coupling of polymeric double-layered waveguides using a stepped MMI coupler[J]. *ETRI Journal.*, 2003, **25**(2): 81~88
- 16 R. Ulrich, G. Ankele. Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(6): 337~339
- 17 Lin Bin, Lian Hua, Jin Mengbi. Optical waveguide calculation and discussion with finite-difference beam propagation method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(S): 503~506
林 斌, 连 华, 金梦笔. 光波导的有限差分光束传播法的设计及分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(S): 503~506