

文章编号:1004-4213(2011)12-1789-4

# 基于二维多模干涉效应的 $N \times N$ 光开关模型

叶新威, 马卫东, 黄晓东, 赵建宜

(光纤通信技术和网络国家重点实验室; 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

**摘 要:**报道了由两个  $N \times N$  三维多模干涉耦合器和一段阵列相移波导组成的三维光开关. 首先利用导模传输法分析了三维多模干涉耦合器的一般成像原理, 并推导出了其成像位置以及相位矩阵. 在此基础上, 通过场传输矩阵法建立了光开关的传输方程. 利用该传输方程计算得到了光开关工作时, 阵列相移波导的相位条件, 并通过三维有限差分光束传输法进行仿真验证, 给出了光开关工作时的插损、串扰指标, 以及光开关输出功率随相移波导相位变化的关系.

**关键词:**三维多模干涉耦合器; 光开关; 三维有限差分光束传输法

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114012.1789

## 0 引言

在以密集波分复用系统为核心的光网络中, 不同波长的光信号在光网络中实现路由必然要采用光开关. 在光网络中, 光开关有着广泛的用途, 如自动倒换保护、光网络监控、光纤通信器件测试、光交叉连接 (Optical Cross-Connect, OXC)、光分插复用 (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) 等. 由于多模干涉耦合器 (Multi-Mode Interference coupler, MMI coupler) 具有插入损耗小、均匀性好、结构紧凑、工艺容差大、对偏正和波长敏感性低等<sup>[1-4]</sup> 优点, 多模干涉型光开关成为研究热点. 传统的基于一维多模干涉型光开关<sup>[5-8]</sup> 只能实现横截面上一个方向上的光通断, 一般是平行于衬底方向, 相邻波导的最小间距限制了芯片上的信道数. 基于二维多模干涉型光开关可以实现横截面两个方向的光通断, 在保持芯片尺寸不变的前提下, 将平面集成向空间集成拓展, 可以成倍增加芯片上的信道数.

本文报道的  $N \times N$  光开关, 由两个三维多模干涉耦合器 (基于二维多模干涉效应) 和一段阵列相移波导组成. 通过一维多模干涉成像的位置和相位矩阵, 推出二维多模干涉成像的位置和相位矩阵. 在二维多模干涉成像的位置和相位矩阵的基础上, 通过场传输矩阵方程得到光开关相位阵列的驱动条件. 最后设计了一个基于绝缘衬底上硅 (Silicon-On-Insulator, SOI) 的二维多模干涉型  $4 \times 4$  光开关, 给出了光场从特定端口输入, 特定端口输出时阵列相移波导满足的相位关系, 并通过三维有限差分光束传输法进行仿真验证.

## 1 二维多模干涉一般成像原理

三维多模干涉耦合器如图 1,  $\lambda_0$  为输入多模干涉耦合器的单色光波长,  $n_g, n_c$  分别表示多模干涉耦合器芯层、包层的折射率,  $W_x, W_y$  分别表示多模干涉区的宽、高,  $L$  表示多模干涉区长度.

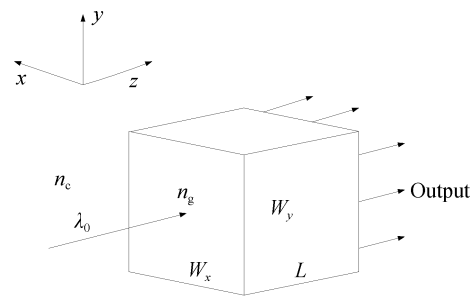


图 1 三维多模干涉耦合器  
Fig. 1 Sketch map of three dimensional MMI coupler

在一维导模传输分析法的基础上, 对二维限制的多模干涉区中导模传输常量和多模干涉区场分布进行近似计算<sup>[9-10]</sup>, 再将所有导模叠加, 通过一系列数学变化, 得出多模干涉区末端的场分布表达式为

$$\psi(x, y, L) = \sum_{\mu=0}^{m-1} \sum_{\nu=0}^{n-1} C_{\mu\nu} \varphi_{\mu\nu}(x, y) \cdot \exp \left[ j \frac{\mu(\mu+2)\pi}{3L_{\pi x}} L + j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_{\pi y}} L \right] \quad (1)$$

式(1)中  $\varphi_{\mu\nu}(x, y)$  是  $x$  方向为  $\mu$  次模,  $y$  方向为  $\nu$  次模的场分布,  $C_{\mu\nu}$  是其场激励系数.

$$C_{\mu\nu} = \frac{\iint \psi(x, y, L) \varphi_{\mu\nu}^*(x, y) dx dy}{\iint \varphi_{\mu\nu}^2(x, y) dx dy} \quad (2)$$

$L_{\pi x}, L_{\pi y}$  分别为二维多模干涉区  $x, y$  方向的拍长,  $L_{\pi x}, L_{\pi y}$  分别定义为

$$L_{\pi x} = \frac{\pi}{\beta_{11}} - \frac{\pi}{\beta_{21}} \approx \frac{4n_g W_x^2}{3\lambda_0} \quad (3)$$

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB327603) 资助

第一作者: 叶新威 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光无源器件及其光集成. Email: xinwei.ye@accelink.com

导师 (通讯作者): 马卫东 (1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为硅基阵列波导光栅. Email: weidong.ma@accelink.com

收稿日期: 2011-05-11; 修回日期: 2011-07-29

$$L_{\pi y} = \frac{\pi}{\beta_{11}} - \frac{\pi}{\beta_{21}} \approx \frac{4n_g W_{y\text{eff}}^2}{3\lambda_0} \quad (4)$$

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

$$W_{x\text{eff}} = W_x + \frac{1}{\pi} \frac{\lambda_0}{2} [2(n_g^2 - n_c^2)^{-1/2}] \quad (5)$$

$$W_{y\text{eff}} = W_y + \frac{1}{\pi} \frac{\lambda_0}{2} [2 \frac{n_c}{n_g} (n_g^2 - n_c^2)^{-1/2}] \quad (6)$$

多模干涉区长度满足式(7)

$$L = \frac{s_x}{N} 3L_{\pi x} = \frac{s_y}{N} 3L_{\pi y} \quad (7)$$

当输入波导的位置为  $x \neq iW/N, i=1, 2 \dots N-1$  或  $y = jW/N, j=1, 2 \dots M-1$ , 多模波导的终端将得到  $N \times M$  重强度相同的像, 即  $x$  方向和  $y$  方向分别成  $N$  和  $M$  重像. 这里  $s_x, N, s_y$  和  $M$  均为自然数, 且  $s_x$  与  $N$  互质,  $s_y$  与  $M$  互质.  $s_x, s_y$  分别为  $x, y$  方向的位置数.

图 2 为二维多模干涉区映射到  $x, y$  方向的一维多模干涉示意图.

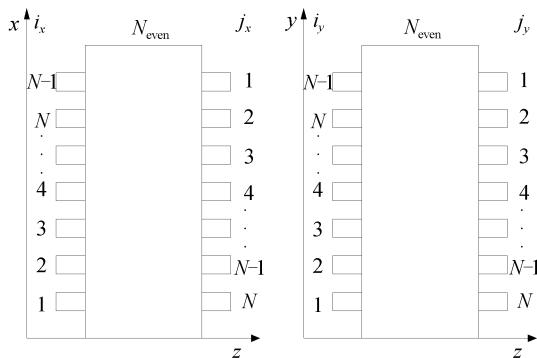


图 2 一维多模干涉示意图

Fig. 2 Sketch map of one dimensional MMI

由文献[11]可推出一维 MMI 输入输出端对应的相位关系为

$$\{\varphi_{om}\} = \begin{Bmatrix} \varphi_0^- & \varphi_1^+ & \varphi_1^- & \dots & \varphi_{\frac{N}{2}-1}^- & \varphi_{\frac{N}{2}}^+ \\ \varphi_1^+ & \varphi_0^- & \varphi_2^+ & \dots & \varphi_{\frac{N}{2}}^+ & \varphi_{\frac{N}{2}-1}^- \\ \varphi_1^- & \varphi_2^+ & \varphi_0^- & \dots & \varphi_{\frac{N}{2}-2}^- & \varphi_{\frac{N}{2}-1}^+ \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{\frac{N}{2}-1}^- & \varphi_{\frac{N}{2}}^+ & \varphi_{\frac{N}{2}-2}^- & \dots & \varphi_0^- & \varphi_1^+ \\ \varphi_{\frac{N}{2}}^+ & \varphi_{\frac{N}{2}-1}^- & \varphi_{\frac{N}{2}-1}^+ & \dots & \varphi_1^+ & \varphi_0^- \end{Bmatrix} \quad (8)$$

矩阵中  $N$  为偶数, 如图 2, 矩阵中行数  $m$  代表一维多模干涉区输入波导的序号, 列数  $n$  代表输出波导的序号. 矩阵中

$$\begin{cases} \varphi_j^+ = j(N-j) \frac{\pi}{N} \\ \varphi_j^- = j(N-j) \frac{\pi}{N} + \pi \end{cases} \quad s=1 \quad (9)$$

$$\begin{cases} \varphi(m, n) = \varphi(n, m) \\ \varphi(m, n) = \varphi(N+1-m, N+1-n) \end{cases} \quad (10)$$

$$j=0, 2 \dots N/2, m, n=1, 2 \dots N.$$

且矩阵中第一行元素中, 序号为奇数的元素所在的正对角线上的元素都相等, 序号为偶数的元素所在的负对角线上的元素都相等. 矩阵最后一行元素中, 序号为奇数的元素所在的负对角线上的元素相等, 序号为偶数的元素所在的正对角线上的元素相等.

由文献[12]可知二维 MMI 成像位置可将  $x$  和  $y$  两个方向的一维 MMI 成像位置加以组合. 若  $x$  方向第  $i$  个像的坐标是  $x_i (i=1, 2 \dots N)$ ,  $y$  方向第  $j$  个像的坐标是  $y_j (j=1, 2 \dots M)$ , 则二维 MMI 第  $(i \times j)$  个像的坐标为  $(x_i, y_j)$ . 二维多模干涉成像的相位等于  $x, y$  方向一维多模干涉相位之和. 则二维多模干涉区输入输出的相位关系矩阵可以通过  $x, y$  方向一维相位矩阵推得, 二维相位矩阵如下

$$\{\psi_{ij}\} = \{\varphi_{xmn} + \{\varphi_{ymn}\}\} = \begin{Bmatrix} \varphi_{x0}^- + \varphi_{y0}^- & \varphi_{x0}^- + \varphi_{y1}^+ & \dots & \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}}^+ \\ \varphi_{x0}^- + \varphi_{y1}^+ & \varphi_{x0}^- + \varphi_{y0}^- & \dots & \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}-1}^- \\ \varphi_{x0}^- + \varphi_{y1}^+ & \varphi_{x0}^- + \varphi_{y2}^+ & \dots & \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}-1}^- \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}-1}^- & \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}}^+ & \dots & \varphi_{x0}^- + \varphi_{y1}^+ \\ \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}}^+ & \varphi_{x\frac{N}{2}}^+ + \varphi_{y\frac{N}{2}-1}^- & \dots & \varphi_{x0}^- + \varphi_{y0}^- \end{Bmatrix} \quad (11)$$

## 2 基于二维多模效应的光开关

本文所建立的基于二维多模干涉效应光开关的模型如图 3, 此光开关由两个三维多模干涉耦合器和一段阵列相移波导组成. 这款光开关模型基于 SOI 波导.

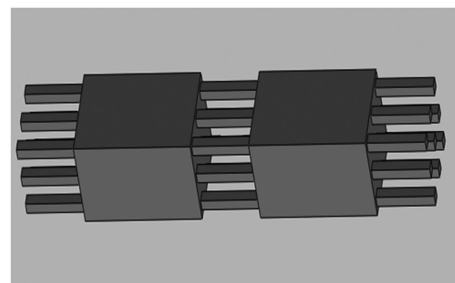


图 3 三维多模干涉光开关

Fig. 3 Three dimensional MMI switch

根据二维多模干涉一般成像原理, 当单色光从输入波导阵列的任何一个波导输入, 多模干涉区长度满足式(4)的关系时, 多模干涉区末端成  $N \times M$  个强度相同的像, 其相位关系满足矩阵  $\{\psi_{ij}\}$ . 通过等离子体色散效应调节相移阵列的相位关系. 当第一个多模干涉区末端的场强耦合进相移阵列波导后, 各相移阵列波导中场强相等, 相位改变, 再入射进入第二个三维多模干涉耦合器, 通过多模干涉实现光路通断.

为了求得三维光开关的驱动条件,在此建立光开关的驱动方程.

考虑到相移器仅起到调相作用,对光场场强不产生衰减,设相移器的场传输矩阵为

$$T_p = \begin{Bmatrix} e^{j\varphi_{11}} & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_{12}} & \vdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \vdots & e^{j\varphi_{NN}} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

式中  $\varphi_{ij}$  ( $i, j=1, 2, \dots, N$ ) 为第  $i * j$  个相移波导产生的相移量.

由第 2 节所述可知,光开关中采用的是多模干涉耦合器的一般成像效应,且两个多模干涉耦合器结构相同,只是一个作为分束器,一个作为合功器.由第 2 节场传输矩阵可得

$$T_s = T_c = \frac{1}{N^2} \{ e^{j\varphi_{ij}} \} = \frac{1}{N^2} \begin{Bmatrix} e^{j\varphi_{11}} & 1 & \vdots & 1 \\ 1 & e^{j\varphi_{12}} & \vdots & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 1 & \vdots & e^{j\varphi_{NN}} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

由此可得光开关的场传输矩阵为

$$T = T_s T_p T_c \quad (14)$$

由此可得  $N_1 \times N_1$  三维多模干涉光开关的场传输方程

$$E_{out} = E_{in} T_s T_p T_c \quad (15)$$

其中  $N_1 = N * N$ , 式中  $E_{in}$ 、 $E_{out}$  分别为输入和输出波导的场矢量,  $E_{in} = [E_1 \ E_2 \ \cdots \ E_{N_1}]$ .

### 3 三维光开关的设计举例

本文设计一个基于 SOI 的  $4 \times 4$  光开关,它由两个相同的  $4 \times 4$  三维多模干涉耦合器和一段相移阵列波导组成.设单模波导宽  $2 \mu\text{m}$ ,高  $2 \mu\text{m}$ ,多模干涉区宽  $12 \mu\text{m}$ ,高  $12 \mu\text{m}$ ,中心波长  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ ,根据式(2)~(4),可得  $L_{\pi x} = L_{\pi y} = 429.63 \mu\text{m}$ ,则两个多模干涉耦合器的长  $L = 644.45 \mu\text{m}$ .通道 1~4,对应的坐标分别为  $(-3 \mu\text{m}, -3 \mu\text{m})$ ,  $(-3 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m})$ ,  $(3 \mu\text{m}, -3 \mu\text{m})$ ,  $(3 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m})$ .通过式(12)求出当从通道 1 输入时,输出通道 1~4 分别为通路时相移阵列的相位条件.

设  $E_{in} = [1, 0, 0, 0]$ ;  $E_{out} = [1, 0, 0, 0]$ ; 则

$$E_{out} = E_{in} T_s T_p T_c = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -i & -i & 1 \\ -i & -1 & 1 & -i \\ -i & 1 & -1 & -i \\ 1 & -i & -i & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\varphi_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\varphi_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\varphi_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{j\varphi_{14}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -i & -i & 1 \\ -i & -1 & 1 & -i \\ -i & 1 & -1 & -i \\ 1 & -i & -i & -1 \end{bmatrix}$$

解得  $\varphi_{11} = 0, \varphi_{12} = \pi, \varphi_{21} = \pi, \varphi_{22} = 0$ .

输入光从通道 1 进入光开关后,当到达第一个多模干涉区末端后其光场分布如图 4.当阵列相移波导的相位变化为  $(0 \ \pi \ \pi \ 0)$  时,图 4 中光场进入相移波导通过相位调制后,通过第二个多模干涉区后,如图 5(a),通道 1 为通路,其它三路为断路.

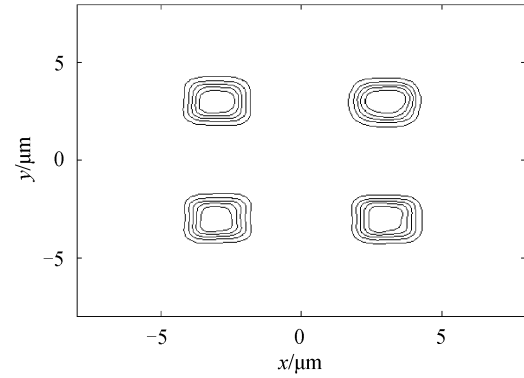


图 4 多模干涉区末端光场分布

Fig. 4 The end of MMI section of the optical field distribution

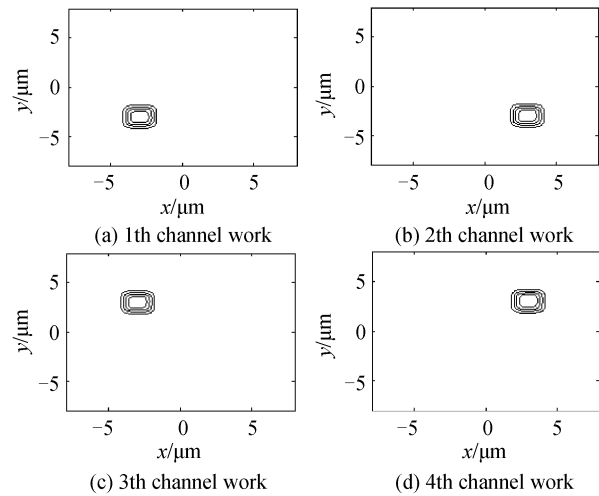


图 5 光开关通断状态

Fig. 5 The state of optical switch on-off

当改变  $E_{out}$  为  $[0, 1, 0, 0]$ 、 $[0, 0, 1, 0]$ 、 $[0, 0, 0, 1]$ , 可按通路 1 的方法求出相移阵列的相位条件分别为  $(\pi/2 \ \pi/2 \ -\pi/2 \ -\pi/2)$ 、 $(\pi/2 \ -\pi/2 \ \pi/2 \ -\pi/2)$ 、 $(\pi \ \pi \ \pi \ \pi)$ .按照这三种相位变化,由 3D-BPM 进行验证,其场分布分别如图 5(b)~(d).不难看出,这三种相位条件实现了其特定通道的通断.

表 1、表 2 列出了当光开关 1、2、3、4 通道分别通路时光开关的插入损耗和串扰.通过改变阵列相

表 1  $4 \times 4$  光开关的插入损耗

Table 1 The insertion loss of  $4 \times 4$  optical switch

	1 IL/dB	2 IL/dB	3 IL/dB	4 IL/dB
1	4.56	58.008	58.561	58.836
2	59.118	4.54	59.921	59.263
3	59.230	58.125	4.55	59.773
4	58.671	58.148	59.919	4.53

表 2  $4 \times 4$  光开关的串扰Table 2 The crosstalk of  $4 \times 4$  optical switch

	1crosstal	2crosstal	3crosstal	4crosstal
	k/dB	k/dB	k/dB	k/dB
1	—	-53.448	-54.001	-54.276
2	-54.578	—	-55.381	-54.723
3	-54.68	-53.575	—	-55.223
4	-54.141	-53.618	-55.389	—

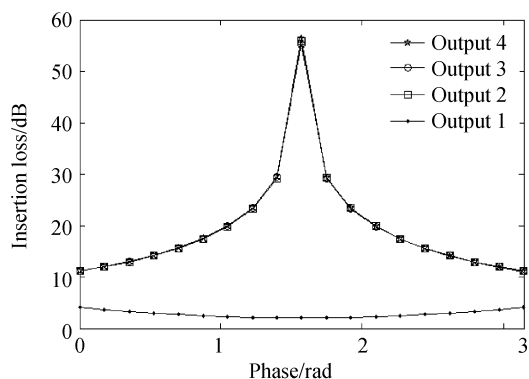


图 6 输出功率与相移量的关系

Fig. 6 The relation of phase shift and output power

移波导中第二根波导相移量,可以得到光开关的输出端得能量随相移量的变化,如图 6. 基于二维多模干涉效应的光开关,其中二维限制多模干涉耦合器的制作工艺全类似一维限制的多模干涉耦合器,因此在制作工艺方面,有其他三维集成光学器件无法比拟的简单、快速和低成本等优点. 而光开关相移波导的相移可以通过 SOI 波导良好的热光效应实现. 目前,该光开关的存在的问题是如何制作输入输出波导,相信随着工艺的进步,这个问题也将解决.

#### 4 结论

基于二维多模干涉效应的  $N \times N$  光开关,可以在大幅提高通道数的情况下,减少光开关的级联数. 具有优良的可靠性和可扩展性. 本文推导出了二维

多模干涉耦合器一般成像的相位矩阵并通过场传输方程推导位移阵列波导的相位条件. 最后举例设计了基于二维多模干涉效应的  $4 \times 4$  三维光开关,推导出决定光开关通断的阵列相移波导的相位条件,并用三维有限差分法加以仿真验证.

#### 参考文献

- [1] LU H C, WANG W S. Wideband criterion for multimode interference splitters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(22): 2332-2334.
- [2] SWILLAM M A, BAKR M H, LI X. Design optimization of compact wideband optical switch exploiting staircase index MMI[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(2): 80-87.
- [3] HONG J K, LEE S S. PLC-based novel triplexer with a simple structure for optical transceiver module applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(1): 21-23.
- [4] LU H C, WANG W S. Wideband criterion for multimode interference splitters [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(22): 2332-2334.
- [5] XIE N, HASHIMOTO T, UTAKA K. Very low power operation of compact MMI polymer thermo-optic switch[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(18): 1335-1337.
- [6] AL-HETAR A M, MOHAMMAD A B, SUPA'AT A S M, et al. MMI-MZI polymer thermo-optic switch with a high refractive index contrast [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(2): 171-178.
- [7] AL-HETAR A M, L YULIANTI, SUPA'AT A S M, et al. Thermo-optical multimode interference switches with air and silicon trenches[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(18): 4653-4657.
- [8] AGASHE S S, SHIU K T, FORREST S R. Compact polarization insensitive InGaAsP-InP  $2 \times 2$  optical switch[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(1): 52-54.
- [9] KHALIL D, YEHIA A. Two-dimensional multimode interference in integrated optical structures[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2004, **11**(6): 137-145.
- [10] SUN Yi-ling, JIANG Xiao-qing, TANG Yi, et al. Two-dimensional overlapping-image multimode interference couplers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(3): 154-155.
- [11] BACHMANN M, BESSE P A, MEICHIOR H. General self-imaging properties in  $N \times N$  multimode interference couplers including phase relations [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(18): 3905-3911.
- [12] 孙一翎. 三维集成多模干涉型光分束器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

### Modeling of $N \times N$ Optical Switch Based on Two-dimensional Multi-mode Interference Effects

YE Xin-wei, MA Wei-dong, HUANG Xiao-dong, ZHAO Jian-yi  
(SKL of OCTN; Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A three-dimensional optical switch is introduced which is composed of two  $N \times N$  three-dimensional multi-mode interference couplers and an array of phase shift waveguide. Firstly, the general imaging principle of three dimensional multimode interference is analyzed by the guided-mode propagation method, and the imaging position and phase matrix are deduced. And the transmission equation of optical switch is set up by the transmission matrix method. The phase condition when the optical switch works is calculated by the transmission equation, and verification and the simulation is completed by three-dimensional finite-difference beam propagation method. The insertion loss and crosstalk when the optical switch works are given, and the relation between the output power and the phase shift of phase array waveguide are obtained.

**Key words:** Three-dimensional multi-mode interference coupler; Optical switch; Three-dimensional finite difference beam propagation method