

文章编号: 0253-2239(2001)03-0367-4

多模干涉马赫-曾德尔光开关模型*

魏红振¹⁾ 余金中¹⁾ 张小峰¹⁾ 刘忠立¹⁾ 王启明¹⁾ 史伟²⁾ 房昌水²⁾

1), 中国科学院半导体研究所集成光电子实验室, 北京 100083
2), 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100

摘要: 根据 $N \times N$ 多模干涉耦合器的基本原理, 确定了多模干涉耦合器的结构参数。通过分析多模干涉耦合器的输入光场与其映像间的相位关系, 提出了模传输矩阵的分析方法, 并用此方法分析了 $N \times N$ 普通干涉多模干涉耦合器 $N \times N$ 相移器以及 $N \times N$ 普通干涉多模干涉马赫-曾德尔光开关, 得到了它们的模场传输方程, 分析了光开关在光场从任一输入端输入, 从任一输出端输出时开关的驱动条件。用上面的方法分析了 4×4 光开关的结构及驱动条件。

关键词: 多模干涉耦合器; 集成光学; 光开关

中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

光波导开关是全光波分复用通讯和光电集成(OEIC)中的一种关键器件, 它提供了各通道及器件之间的信息交换。传统的集成光开关的基本结构形式有^[1,2]: 定向耦合器光开关, X 交叉全内反射光开关, Y 分支数字光开关以及使用定向耦合器或 X 分支或 Y 分支作为 3dB 分束器的马赫-曾德尔干涉仪光开关。定向耦合器开关要求耦合器波导间距有很高的精度, 而 X 交叉波导或 Y 分支波导由于分支角或交叉角很小使得在实际应用中器件尺寸大, 而且要求加工精度高。利用自映像效应的多模干涉耦合器具有制作容差性好、带宽大、结构紧凑的优点, 在集成光学中有着广泛的应用, 最近越来越受到人们的重视^[3-7]。利用多模波导干涉(MMI)耦合器的马赫-曾德尔干涉仪可以解决常规光开关结构的这些问题, 得到紧凑的 $N \times N$ 光开关。

本文根据多模干涉耦合器的基本原理以及耦合器输入输出光场之间的相位关系, 提出了模场传输矩阵的分析方法, 给出了 $N \times N$ 多模干涉和 $N \times N$ 相移器的模场传输矩阵, 并用模场传输矩阵的方法分析了 $N \times N$ 多模干涉马赫-曾德尔光开关的场传输方程及光开关在光场从任一输入端输入、从任一输出端输出时开关的驱动条件。最后以 4×4 的光开关为例, 设计了光开关的结构, 采用模场传输的方法分析了光开关, 获得了在任一端输入时不同的输出状态下光开关的驱动条件。

2 $N \times N$ 多模干涉马赫-曾德尔光开关的基本结构

$N \times N$ 多模干涉马赫-曾德尔干涉仪光开关的结构如图 1 所示。光开关由输入输出单模光波导、多模干涉分束器和合束器以及相移器组成。

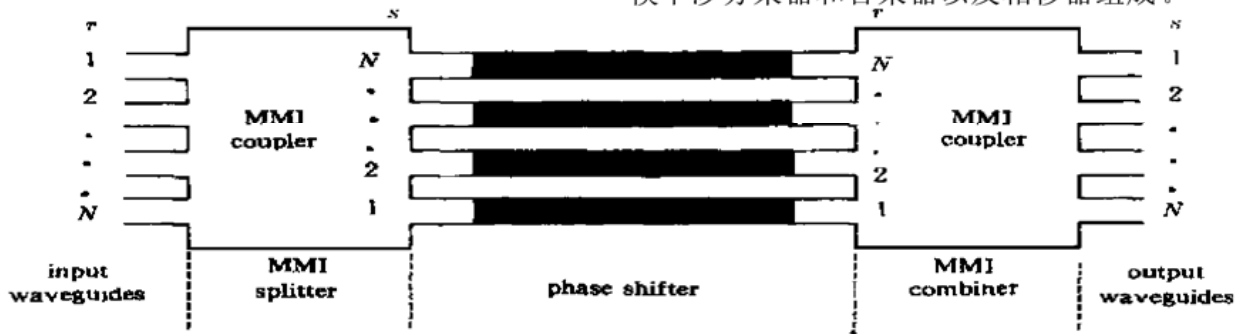


Fig. 1 Schematic of $N \times N$ MMI MZI optical switch

* 自然科学基金(69896260, 69990540)资助项目。

收稿日期: 1999-11-17; 收到修改稿日期: 2000-03-02

基于 SOI(silicon on insulator)材料的单模波导采用脊形结构, 如图2所示, 可以获得与单模光纤匹

配的截面尺寸。单模脊形波导应满足条件^[8]：

$$b \leq 0.3 + \frac{a}{\sqrt{1-a^2}} \quad a > 0.5, \quad (1)$$

其中 $b = w/H$, $a = h/H$, w 、 H 、 h 分别为脊形的宽、内脊的高和外脊的高。

两个 $N \times N$ 多模干涉耦合器分别作为分束器和合束器,它们在结构上完全相同。多模干涉耦合器是这一类开关的最重要的器件,它决定了光开关的特性。相移器可以改变输入到多模干涉合束器的光场的初始相位,从而决定光场从合束器输出的通道。

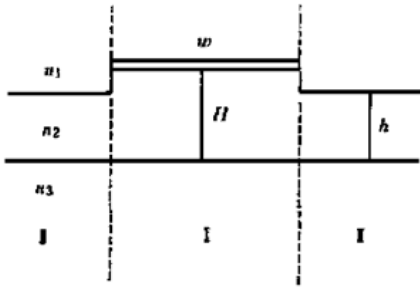


Fig. 2 Schematic of rib optical waveguide

3 多模干涉耦合器

在多模波导中,沿着波的传播方向,在周期性的间隔处出现输入场的一个或多个复制的映像,这就是多模波导的自映像。多模干涉耦合器的基本工作原理就是基于这一自映像现象^[9]。

1) 普通干涉 $N \times N$ 多模干涉耦合器结构参数和相位关系

普通干涉 $N \times N$ 多模干涉耦合器结构如图3所示, N 个输入波导和输出波导均匀等间距分布在多模波导的输入和输出端,多模波导的长度为^[3]：

$$\left. \begin{aligned} L_N^M &= \frac{M}{N} 3L_\pi, \\ L_\pi &= \frac{4n_r w + 2c}{3\lambda_0}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

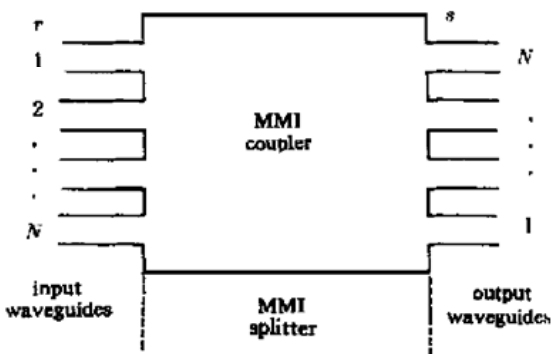


Fig. 3 Schematic of $N \times N$ MMI coupler

式中 M 和 N 为两个没有公约数的正整数, N 表示映像的个数, M 为沿波导方向出现 N 个映像的次数,当 $M = 1$ 时器件的尺寸最短。 n_r 为波导芯层的折射率, λ_0 为器件的工作波长, L_π 为多模波导零阶模和一阶模的相干长度, w_e 为多模波导的等效宽度,

$$w_e = w + \left[\frac{n_c}{n_r} \right]^{2\sigma} \frac{\lambda_0}{\pi A}, \quad A = \left[1 - \frac{n_c^2}{n_r^2} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

对于 TE 模, $\sigma = 0$; 对于 TM 模, $\sigma = 1$ 。对于强限制波导, $w_e \approx w$ 。

在图3所示的 $N \times N$ 多模干涉耦合器中,各输入波导与其在输出波导中的映像之间的相位关系为^[10,11]：

当 $r + s$ 为偶数时,

$$\Delta \varphi_{rs} = \varphi_0 + \pi + \frac{\pi}{4N} (s - r)(2N - s + r), \quad (4)$$

当 $r + s$ 为奇数时,

$$\Delta \varphi_{rs} = \varphi_0 + \frac{\pi}{4N} (s + r - 1)(2N - s - r + 1), \quad (5)$$

式中 φ_0 为常相位,

$$\varphi_0 = -\beta_0 L_N^M - \pi/N - (\pi/4)(N - 1),$$

r ($r = 1, 2, \dots, N$) 为输入波导数(从上至下), s ($s = 1, 2, \dots, N$) 为输出波导数(从下至上),如图3所示。

2) 多模干涉耦合器的场传输矩阵与传输方程

N 个输入场在一定的相对位置下各自形成 N 个映像,每个映像的场幅为 \sqrt{N} ,在每个映像位置处的 N 个映像相互重叠,它们相干叠加,形成实际波导中的一个映像,对应于一个输出波导。为了分析输入输出场的关系,定义 $N \times N$ 的多模干涉耦合器的场传输矩阵:

$$A = \frac{e^{i\varphi_0}}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} e^{i\Delta\varphi_{11}} & e^{i\Delta\varphi_{21}} & \dots & e^{i\Delta\varphi_{N1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{i\Delta\varphi_{1N}} & e^{i\Delta\varphi_{2N}} & \dots & e^{i\Delta\varphi_{NN}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 φ_0 、 $\Delta\varphi_{rs}$ 由(4)式、(5)式确定。

由此可得多模干涉耦合器的场传输方程为:

$$E_{out} = A E_{in}, \quad (7)$$

式中 $E_{out} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_N]^T_{out}$ 为输出波导中的场矢量, $E_{in} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_N]^T_{in}$ 为输入波导的场矢量。由此方程可见, A 一定时,改变输入波导的初始相位关系就可以改变光的输出通道。

4 多模干涉马赫-曾德尔光开关的光场传输方程

在多模干涉马赫-曾德尔光开关结构中, 相移器的作用是改变多模干涉合束器输入波导中光场的初始相位关系, 从而改变光场的输出通道。若相移器对光场不产生衰减, 则相移器的场传输矩阵为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} e^{i\Delta\varphi_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{i\Delta\varphi_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{i\Delta\varphi_N} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\varphi_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为第 i 个相移臂产生的相移量。

由上面的分析, 可以得到图 1 所示的多模干涉马赫-曾德尔光开关结构的光场传输方程为:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{A}_2 \mathbf{B} \mathbf{A}_1 \mathbf{E}_{\text{in}}. \quad (9)$$

其中 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 分别为多模干涉分束器与合束器的传输矩阵, 若两个多模波导完全相同且输入输出波导处于关于中心对称等间距的位置, 则 $\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2$, \mathbf{B} 为相移器的传输矩阵。 \mathbf{E}_{out} 、 \mathbf{E}_{in} 分别为输入输出光场矢量。

5 讨 论

当光场从光开关的任一输入波导输入时, 若光场从光开关的一个输出端输出, (9) 式确定了 $N - 1$ 个线性齐次方程, 由此可以得到相移器 N 个相移臂的相移的关系, 从而可以得到相应的驱动条件。因此 $N \times N$ 多模干涉马赫-曾德尔结构可以实现光场从任一输入端到任一输出端的变换。

当光场从开关的多路输入(例如 $k > 1$) 时, 通过求解 $N - k - 1$ 个线性方程可得到光场从任意 k 个输出端输出时各相移臂相应的相移量。然而 k 个输出端输出的光场强度不仅与各相移臂的相移量有关, 而且与 k 个输入端中各输入光场的强度有关。以 $N = 2$ 的 2×2 结构为例, 若输入端光场的电场矢量为 $\mathbf{E}_{\text{in}} = [E_1 \ E_2]^T$, 要得到的输出电场矢量为 $\mathbf{E}_{\text{out}} = [E_2 \ E_1]^T$, 则两相移臂相应的相移应满足:

$$e^{i\Delta\varphi_1} = \frac{E_1 + iE_2}{E_1 - iE_2}, \quad e^{i\Delta\varphi_2} = \frac{E_1 - iE_2}{E_1 + iE_2}. \quad (10)$$

由此可见, 相移量的大小与各入射端光场强度有关。因此图 1 所示结构难以实现多路输入时通道间光场

的任意交换, 这是这种结构的局限性。

6 设计举例

作为例子, 设计了一个基于 SOI 的 4×4 的多模干涉马赫-曾德尔光开关, 工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。波导结构是图 2 所示的脊形波导, 内脊高 $H = 10 \mu\text{m}$, 外脊高 $h = 6 \mu\text{m}$, 内外脊的有效折射率分别为 $n_r = 3.47916$ 和 $n_c = 3.47772$ 。对于输入输出单模波导, 要求满足(1) 式的单模条件, 取 $w = 4 \mu\text{m}$, 输入输出波导的间隔为 $6 \mu\text{m}$ 。由此可确定多模波导的宽度为 $40 \mu\text{m}$, 输入输出波导处于关于中心对称等间距的位置。考虑 TE 模, 由(2) 式、(3) 式可确定 4×4 多模干涉耦合器的长度为 $4545 \mu\text{m}$ 。由(4) 式、(5) 式可确定多模干涉耦合器的输入波导与输出映像间的相位关系如表 1 所示。

Table 1 Phase relations at the outputs and inputs of the passive 4×4 MMI coupler

	$s = 1$	$s = 2$	$s = 3$	$s = 4$
φ_{1s}	π	$3\pi/4$	$-\pi/4$	π
φ_{2s}	$3\pi/4$	π	π	$-\pi/4$
φ_{3s}	$-\pi/4$	π	π	$3\pi/4$
φ_{4s}	π	$-\pi/4$	$3\pi/4$	π

由(6) 式可得 4×4 多模干涉耦合器的场传输矩阵为:

$$\mathbf{A} = \frac{e^{i\varphi_0}}{2} \begin{bmatrix} -1 & -e^{-i\pi/4} & e^{-i\pi/4} & -1 \\ -e^{-i\pi/4} & -1 & -1 & e^{-i\pi/4} \\ e^{-i\pi/4} & -1 & -1 & -e^{-i\pi/4} \\ -1 & e^{-i\pi/4} & -e^{-i\pi/4} & -1 \end{bmatrix},$$

4×4 多模干涉开关的场传输方程为:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} e^{i\Delta\varphi_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta\varphi_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\Delta\varphi_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\Delta\varphi_4} \end{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{E}_{\text{in}}. \quad (11)$$

对于 $\mathbf{E}_{\text{in}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 若 $\mathbf{E}_{\text{out}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 则由(11) 式可得到三个线性齐次方程, 解这三个线性齐次方程得:

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_3, \quad \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_4, \quad \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 - \pi/2.$$

因此当相移器的四个相移臂满足这样的相移关系时, 就可以使光场从第一个输出波导输出。

同样,若 $\mathbf{E}_{\text{out}} = [0\ 1\ 0\ 0]^T$ 时,可得:

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2, \quad \Delta\varphi_3 = \Delta\varphi_4, \quad \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_3 - \pi/4.$$

若 $\mathbf{E}_{\text{out}} = [0\ 0\ 1\ 0]^T$ 时,可得:

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_3, \quad \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_4, \quad \Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 - \pi.$$

若 $\mathbf{E}_{\text{out}} = [0\ 0\ 0\ 1]^T$ 时,可得:

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_4, \quad \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_3, \quad \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi_1 - 3\pi/4.$$

由此可得到不同状态下开关的驱动条件。

结论 根据多模波导的自映像原理以及输入波导与映像之间的相位关系,提出了 $N \times N$ 多模干涉耦合器的场传输矩阵,类似地提出了 $N \times N$ 相移器的场传输矩阵。用场传输矩阵的方法分析了 $N \times N$ 多模干涉马赫-曾德尔光开关,得到了 $N \times N$ 光开关的场传输方程。由场传输方程确定了 $N-1$ 个线性齐次方程,由此可得到光场从任一输入端输入,从任一输出端输出时开关的驱动条件。根据上面的分析方法,设计了 4×4 多模干涉马赫-曾德尔光开关的结构并分析了开关的工作条件。

参 考 文 献

- [1] Soref R A. Silicon based optoelectronics. *Proc. IEEE*, 1993, **81**(12): 1687~ 1706
 [2] 赵策洲. 半导体导波光器件理论及技术. 北京: 国防

工业出版社, 1998. 178

- [3] Soldano L B, Pennings E C M. Optical multi-mode interference based on self imaging: Principle and applications. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~ 627
 [4] Fardad M A, Fallahi M. Sol-gel multimode interference power splitters. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 697~ 699
 [5] Paiann M R, MacDonald R I. Design of phased array wavelength division multiplexers using multimode interference couplers. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21): 5097~ 5108
 [6] Leuthold J, Eckner J *et al.*. Multimode interference couplers for the conversion and combining of zero and first-order modes. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(7): 1228~ 1239
 [7] Ferreras A, Rodriguez F, Gomez-Salas Z *et al.*. Useful formulas for multimode interference power splitter/combiner design. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **5**(10): 1224~ 1227
 [8] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi/Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(8): 1971~ 1973
 [9] Ulrich R. Image formation by phased coincidences in optical waveguides. *Opt. Commun.*, 1975, **13**(3): 259~ 264
 [10] Bachmann M, Besse P A, Melchior H. General self imaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phased relations. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18): 3905~ 3910
 [11] Besse P A, Bachmann M, Melchior H. Phase relations in multimode interference couplers and their application to generalized integrated mach-zehnder optical switches. *The Sixth European Conference on Integrated Optics*, Neuchatel, Switzerland, 1993. 18~ 22

Modeling of Multimode Interference Mach-Zehnder Interferometer Optical Switches

Wei Hongzhen Yu Jinzhong Zhang Xiaofeng Liu Zhongli Wang Qiming

(State Key Laboratory on Integrated optoelectronics, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Shi Wei Fang Changshui

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 17 November 1999; revised 2 March 2000)

Abstract: $N \times N$ Multimode interference(MMI) couplers are investigated. The mode field transmitting matrix based on the phase relations in MMI couplers is introduced to analyze the MMI couplers. Field transmitting equations of MMI couplers, phase shifter and Mach-Zehnder interferometer (MZI) optical switches are derived. The driving conditions of MZI switches for different switching situations are obtained by solving the field transmitting equations. The design of 4×4 switch is completed for a promising silicon-on-insulator waveguide structure.

Key words: multimode interference coupler; integrated optics; optical switch