

文章编号: 0253-2239(2006)08-1187-5

基于多模干涉耦合器的集成热光开关实验研究

万助军^{1,2} 吴亚明¹ 李四华¹

(¹ 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 报道了一种基于多模干涉(MMI)耦合器的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型 2×2 集成热光开关的实验研究结果, 插损为 3.40 dB, 偏振相关损耗为 0.47 dB, 直通和交叉状态消光比分别为 32.01 dB 和 16.42 dB, 响应时间小于 3 ms, 开关功耗为 658 mW。针对直通和交叉状态消光比不对称的现象, 从理论上做出了解释, 因为半导体平面光波电路(PLC)工艺一致性较好, 两个多模干涉耦合器的分光比虽然因工艺误差偏离 50:50, 但误差量相近, 这个特点对光开关直通和交叉状态的消光比产生了不同影响。分析了在波导上制作加热电极对波导有效折射率的影响, 估算其增量在 2×10^{-4} 量级。

关键词: 集成光学; 热光开关; 多模干涉耦合器; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Experimental Research on Integrated Thermo-optic Switch Based on Multimode Interference Couplers

Wan Zhujun^{1,2} Wu Yaming¹ Li Sihua¹

(¹ Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The experimental results of a 2×2 integrated thermo-optic Mach-Zehnder interferometer (MZI) switch based on multimode interference (MMI) couplers are reported. The insertion loss is 3.40 dB, polarization-dependent loss is 0.47 dB, extinction ratios at bar state and cross state are 32.01 dB and 16.42 dB respectively, response time is less than 3 ms, and power consumption is 658 mW. Regarding to asymmetry of extinction ratios at bar state and cross state, theoretical analysis is presented. Coupling ratio of the two multimode interference couplers deviates from 50:50, but the deviation is nearly the same, which is decided by good uniformity of semiconductor planar lightwave circuit (PLC) process. This property affects extinction ratios at bar state and cross state in different mechanisms. Adding metal heating electrode on waveguide affects its effective index and analysis based on experimental results is given. The increment of waveguide effective index is in the order of 2×10^{-4} .

Key words: integrated optics; thermo-optic switch; multimode interference coupler; Mach-Zehnder interferometer

1 引言

光开关是智能化光网络中的关键器件之一, 其实现方式多种多样, 按照光信号传输通道可分为波导光开关和自由空间光开关。机械式光开关是一种典型的自由空间光开关, 它包括传统机械式光开关和微机电系统(MEMS)光开关, 传统机械式光开关因其技术成熟和良好的可靠性, 已经广泛商用于线路保护和监控、网络重构、测试仪器中, 二维微机电

系统光开关技术也已成熟, 并因其大容量的优势而应用于线路交换^[1,2]。波导光开关则因其体积小和易于集成而颇受研究者青睐, 特别是与阵列波导光栅(AWG)和可调光衰减器(VOA)的集成最受关注。波导光开关也有许多实现形式, 如基于铌酸锂波导的电光开关、基于 Y 分支结构的数字型热光开关、基于定向耦合器的 BOA (Bifurcation optic active) 热光开关、基于定向耦合器的干涉型热光开

作者简介: 万助军(1978~), 男, 江西进贤县人, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士研究生, 主要从事集成光通信器件的研究。E-mail: wanzhujun@mail.sim.ac.cn

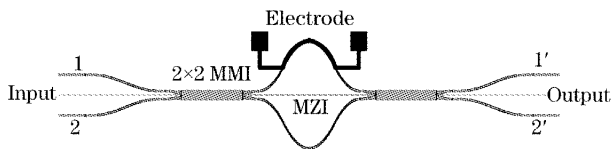
收稿日期: 2005-11-14; 收到修改稿日期: 2006-02-16

关、基于多模干涉耦合器的干涉型热光开关等^[3~9]。

相对于定向耦合器,多模干涉耦合器具有更好的分光均匀性和带宽平坦性,非常适于制作干涉型光开关。文献[9]报道了国外一种在 Si/SiO₂ 材料上制作的基于多模干涉耦合器的 2×2 热光开关,损耗为 1 dB,消光比为 21 dB,响应时间为 180 μs,功耗为 110 mW。文献[3]报道了国内一种在 SOI 材料上制作的基于多模干涉耦合器的 2×2 热光开关,消光比为 17.1 dB,功耗为 235 mW。本文报道一种在 Si/SiO₂ 材料上制作的基于多模干涉耦合器的 2×2 热光开关的实验研究结果,观察到直通和交叉状态消光比不对称的现象并给出了理论分析,这些实验结果将为进一步优化设计提供实验依据。

2 器件工作原理与参量设计

本文设计的波导热光开关结构如图 1 所示,由两个 3 dB 2×2 多模干涉耦合器和一对马赫-曾德尔干涉臂串连而成,在干涉臂的一支上制作加热电极,通过热光效应改变两臂的相位关系,控制光路在直通状态 (Bar: 端口 1→1', 2→2') 与交叉状态 (Cross: 端口 1→2', 2→1') 之间切换。



MMI:multimode interference
MZI:Mach-Zehnder interferometer

图 1 基于多模干涉耦合器的 2×2 光开关结构

Fig. 1 Structure of the multimode interference based 2×2 optical switch

多模干涉耦合器是根据光束在多模波导内的自映像特性,在特定长度的多个映像位置设置输出波导,达到分光目的^[10,11]。根据文献[11]中的方法设计参量,并用 Optiwave 公司的 BPM 软件进行模拟修正,得到该 3 dB 2×2 多模干涉的分光比为 49.74%:50.26%,附加损耗为 0.20 dB。为了减少马赫-曾德尔干涉仪干涉臂两支之间的光耦合与热耦合,采用半径 5 mm 的弧形波导将两臂拉开。电极采用耐高温特性好且易于与 SiO₂ 表面沾附的 Ta₂N 材料,引线采用铜材料,电极阻值约为 600 Ω。

光开关的传输矩阵为

$$T_{sw} = \begin{vmatrix} \sin(\phi/2) & -\cos(\phi/2) \\ -\cos(\phi/2) & -\sin(\phi/2) \end{vmatrix}. \quad (1)$$

当 $\phi = 2m\pi$ 时,光开关为交叉状态;当 $\phi = 2m\pi +$

π 时,光开关为直通状态。要切换光开关状态,需通过加热使干涉臂相位差改变 π 即光程差改变 $\lambda_0/2$, SiO₂ 的热光系数为 $dn/dT = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,电极长度为 $L_e = 3 \text{ mm}$,中心波长为 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$,根据 (2) 式,波导芯层温度改变 $\Delta T = 26 \text{ K}$ 即可实现开关状态的切换:

$$L_e \cdot \Delta T \cdot dn/dT = \lambda_0/2. \quad (2)$$

3 器件制作与特性测试

3.1 器件制作流程

该光开关方案采用掩埋型 Si/SiO₂ 波导,波导截面如图 2(b) 所示,芯层为掺锗 SiO₂,截面尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$,上下包层为 $15 \mu\text{m}$ 厚的 SiO₂,芯层、包层折射率分别为 1.455, 1.444, 折射率差为 0.75%。

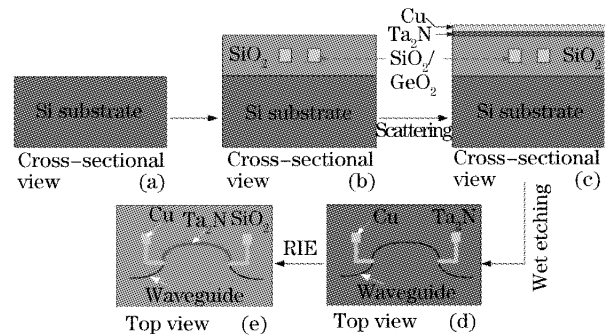


图 2 光开关芯片制作流程

Fig. 2 Fabrication process of the switch chip

器件的芯片制作流程如图 2 所示,第一步以化学气相沉积(CVD)和反应离子刻蚀(RIE)工艺在硅衬底上制作 Si/SiO₂ 波导;第二步在芯片上溅射 200.0 nm 厚的 Ta₂N 和 1 μm 厚的 Cu,截面图形如图 2(c)所示;第三步以湿法刻蚀工艺刻出铜导线和焊盘图形,图 2(d)为顶视示意图;第四步以反应离子刻蚀工艺刻出电极图形,图 2(e)为完成之后的电极、导线和焊盘示意图;最后对芯片端面进行抛光,并采用锡焊将芯片连至印刷电路板(PCB)上。芯片制作第一步由美国 ANDevices 公司代工,其他步骤在我所工艺线上完成,器件尺寸约为 23.5 mm×0.4 mm,包括两端的输入输出耦合波导。

3.2 光开关输出与驱动功率关系测试

采用 EXFO IQS12004B 密集波分复用(DWDM)光无源器件测试系统中的可调激光器模块(设置输出波长为 1.55 μm)和 Advantest Q8221 型多通道光功率计,芯片输入输出端口用光纤阵列耦合,用 Suruga 六维自动对准系统进行调整,测得

光开关各端口损耗与驱动功率(测得电极阻值为 515 Ω,将驱动电压换算成功率)关系如图 3 所示,其中图 3(a)为光信号从端口 1 输入情况,图 3(b)为光信号从端口 2 输入情况。对应图中曲线的谷底位置

即为保持光开关为直通状态或者交叉状态所需的功耗,相应的插损、串扰和消光比列入表 1 中,包括与光纤阵列的耦合损耗。

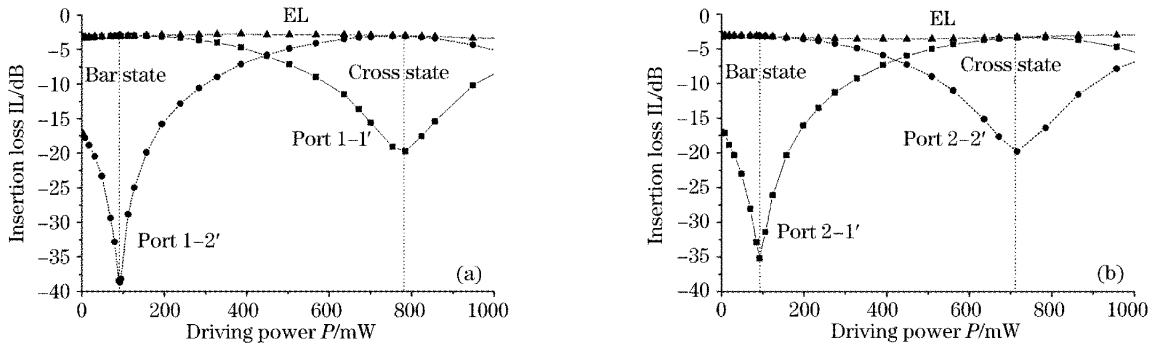


图 3 插损与驱动功率关系。(a) 从端口 1 输入,(b) 从端口 2 输入,EL: 附加损耗

Fig. 3 Relation between insertion loss and driving power. (a) Input from port 1, (b) input from port 2, EL: excess loss

表 1 2×2 光开关特性

Table 1 Specifications of the 2×2 optical switch

Input from Port 1		Bar	Cross	Input from Port 2		Bar	Cross	
Power /mW		92	784	Power /mW		92	716	
1→1'	IL /dB	3.06	—	2→1'	IL /dB	—	3.40	
	PDL /dB	0.37	—		2→2'	PDL /dB	—	0.47
	Crosstalk /dB	—	-19.73			ER /dB	Crosstalk /dB	-35.18
1→2'	IL /dB	—	3.10	2→1'			IL /dB	3.17
	PDL /dB	—	0.23		2→2'		PDL /dB	0.33
	Crosstalk /dB	-38.65	—			ER /dB	Crosstalk /dB	—
ER /dB	35.59	16.63	ER /dB	ER /dB			32.01	16.42

IL: Insertion loss; PDL: polarization dependent loss; ER: extinction ratio, difference between insertion loss and crosstalk

根据光开关工作原理,初始状态下干涉臂的相位差为 0,应为交叉状态,而我们看到需要一个偏置电压(对应曲线的第一个谷底)才能到达直通状态,这是因为在波导上制作加热电极改变了波导的等效折射率,具体将在第 4 部分分析。注意到当光信号从端口 1 或端口 2 输入时,所需切换电压(对应曲线的第二个谷底)稍有不同,这是工艺误差造成的。切换电压与偏置电压对应功耗的差值平均为 658 mW,优化设计使偏置电压降为零之后,此即所需开关功耗。光开关的附加损耗(两输出端功率之和相对输入功率的损耗)随驱动功率变化不大,保持在 3 dB 左右。光开关插损为 3.40 dB,直通状态和交叉状态串扰分别为 -35.18 dB 和 -19.73 dB,消光比分别为 32.01 dB 和 16.42 dB。两种状态下的消光比不对称,原因是受多模干涉的分光比误差影响,具体将在第 4 部分分析。

3.3 带宽特性测试

采用 EXFO IQS12004B DWDM 光无源器件测

试系统对光开关在 1530~1570 nm 范围内的带宽特性进行了测试,测试时分别设置驱动功率为图 3 中曲线谷底位置的电功率值,测试结果如图 4 所示,此处仅列出光信号从端口 1 输入情况,其中图 4(a)对应低驱动功率,为直通状态特性,图 4(b)对应高驱动功率,为交叉状态特性。同时测得带宽内的最大偏振相关损耗,列入表 1 中。

可以看出,光开关的插损和串扰随波长变化不大,具有良好的带宽特性,偏振相关损耗(PDL)随波长起伏较大,带宽内最大值为 0.47 dB。图 4 中光开关在直通状态下的串扰大约为 -30 dB,比图 3 中对 1.55 μm 单波长测试情况稍差,这是因为串扰本身也有一定的偏振相关性。从图 4 中同样可以看出光开关在直通状态下的串扰明显优于交叉状态下的串扰。

对单个 2×2 多模干涉耦合器分光比的带宽特性测试结果如图 5 所示,由图 5 可见,长波段较短波段的分光比更接近 50:50,而从两个端口输入测得

的分光比是互补的,在 1.55 μm 波长的分光比分别为 53.14% 和 47.32%,分别偏离目标值 3.14% 和 -2.68%。另外在 1.55 μm 波长测得从两个端口输

入的附加损耗分别为 1.81 dB 和 1.67 dB,包括与光纤阵列的耦合损耗。

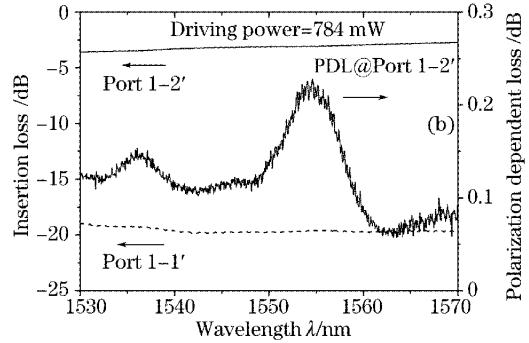
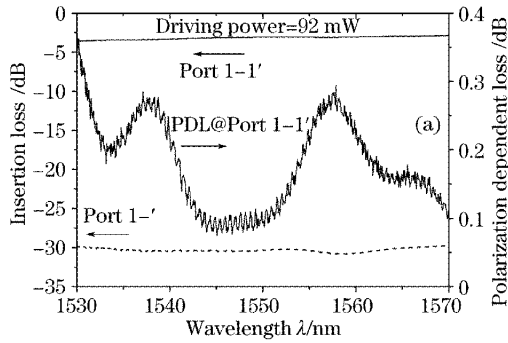


图 4 1530~1570 nm 波长范围内的插损、偏振相关损耗、串扰特性。(a)低驱动功率,直通状态,(b)高驱动功率,交叉状态
Fig. 4 Insertion loss, polarization dependent loss and crosstalk properties in 1530~1570 nm wavelength span. (a) low driving power, bar state; (b) high driving power, cross state

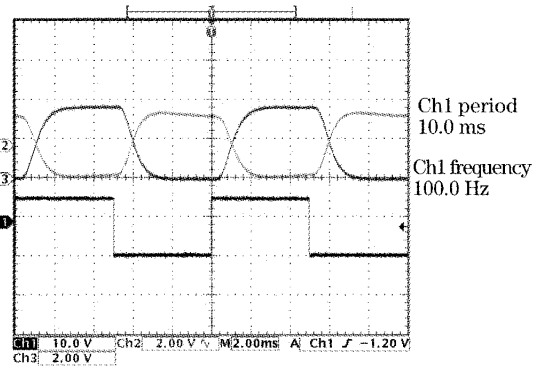
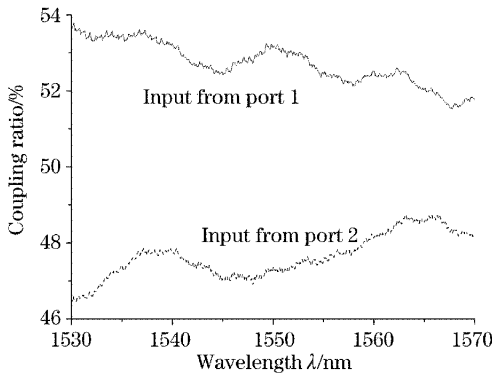


图 5 2×2 多模干涉耦合器分光比的带宽特性
Fig. 5 Bandwidth properties of 2×2 multimode interference coupler

图 6 光开关的响应特性

Fig. 6 Response property of the optical switch
90%上升沿或者下降沿过渡时间。

3.4 响应时间测试

采用 Agilent 33120A 型信号发生器、Tektronix TDS3014B 型示波器、EXFO IQS12004B 密集波分复用光无源器件测试系统中的可调激光器模块和 Advantest Q8221 型多通道光功率计测试光开关的响应特性,测试结果如图 6 所示,响应时间小于 3 ms,定义为光开关从一个平稳状态切换至另一个平稳状态的时间,而非数字信号中定义的 10%~

4 测试结果分析

4.1 多模干涉分光比误差造成直通和交叉状态消光比不对称

考虑因工艺误差造成的分光比误差 δ , 2×2 多模干涉耦合器的分光比为 $(0.5 + \delta) : (0.5 - \delta)$, 则其传输矩阵如(3)式,相应整个开关的传输矩阵修正如(4)式:

$$T_{MMI} = \begin{vmatrix} \sqrt{0.5 + \delta} & j\sqrt{0.5 - \delta} \\ j\sqrt{0.5 - \delta} & \sqrt{0.5 + \delta} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

$$T_{SW} = \begin{vmatrix} 2\delta\cos(\phi/2) - j\sin(\phi/2) & j\sqrt{1 - 4\delta^2}\cos(\phi/2) \\ j\sqrt{1 - 4\delta^2}\cos(\phi/2) & 2\delta\cos(\phi/2) + j\sin(\phi/2) \end{vmatrix}. \quad (4)$$

根据半导体工艺一致性较好的特点,可以认为在一个硅片上制作的两个多模干涉耦合器具有较好

的一致性,以上传输矩阵中对两个多模干涉耦合器取相同分光比,即分光比误差量相同。根据传输矩

阵(4)式,当光开关处于直通状态和交叉状态时的串扰光功率分别如下:

$$\begin{cases} \text{Crosstalk}_{\text{bar}} = \cos^2[\phi(\lambda)/2], \\ \text{Crosstalk}_{\text{cross}} = \sin^2[\phi(\lambda)/2] + 4\delta^2, \end{cases} \quad (5)$$

在因干涉臂相位差的波长相关性引起的串扰光之外,交叉状态较之直通状态,串扰光中多出一项 $4\delta^2$,是由多模干涉耦合器的分光比误差引起的。消光比为串扰与插损的差值,同样产生不对称。当 $\delta < 1.5\%$ 时,可保证串扰小于 -30 dB。

4.2 光开关的初始状态分析

从图3看到,当未加驱动功率时光开关的初始状态并不是预期的交叉状态,从端口1和端口2输入测得的分光比分别为 $95.9\%:4.1\%$ 和 $4\%:96\%$,这是因为制作加热电极改变了干涉臂波导的有效折射率,初始相位差不再为零。干涉臂相位差可表示如下:

$$\phi = \phi_e + \phi_t, \quad (6)$$

其中 $\phi_e = 2\pi\Delta n_e L_e/\lambda$ 为制作电极引起的相位差, Δn_e 为在波导上制作电极引起的波导有效折射率改变量, L_e 为电极长度; $\phi_t = 2\pi\Delta n_t L_e/\lambda$ 为电极加热引起的相位差, Δn_t 为电极加热引起的波导有效折射率改变量。

图3中测得的初始状态是在中心波长处,以下取 $\lambda = \lambda_0$ 进行分析,且初始状态下 $\phi_t = 0$,因此 $\phi = \phi_e$ 。根据(4)式,从端口1和端口2输入,初始分光比为 $\sin^2(\phi_e/2) : \cos^2(\phi_e/2)$ 或者反之。对照测得的初始分光比(取均值为 $95.95\%:4.05\%$):

$$\sin^2(\phi_e/2) : \cos^2(\phi_e/2) = 95.95\% : 4.05\%, \quad (7)$$

由(7)式得到因在波导上制作电极引起的相位差 $\phi_e = 0.871\pi$,并由此得到 $\Delta n_e \approx 2 \times 10^{-4}$,此即制作电极对波导有效折射率的影响。这个具体值不具有普遍意义,随电极材料、厚度不同都会有差异,消除影响的办法是在干涉臂的两支上制作对称的电极。

5 结 论

进一步优化器件参量和提高工艺水平,减小波导上包层厚度并在干涉臂波导两侧制作隔离槽,有望达到插损小于 2.20 dB,偏振相关损耗小于 0.20 dB,消光比大于 30 dB,功耗低于 200 mW,响

应时间小于 1 ms。针对直通和交叉状态消光比不对称的现象,从理论上做出了解释;分析了在波导上制作加热电极对波导有效折射率的影响。后续工作中将继续优化 2×2 多模干涉耦合的参量以提高分光比均匀性,并对其带宽特性进行分析和模拟;对光开关进行热场分析以优化功耗和响应时间;对其他工艺细节进行考虑以降低插损和偏振相关损耗。

参 考 文 献

- 1 Yu Peidong, Wang Guozhong, Chen Minghua *et al.*. Recent progress in optical switching[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(3): 149~154 (in Chinese)
禹培栋,王国忠,陈明华等. 光开关技术进展[J]. 半导体光电, 2001, **22**(3): 149~154
- 2 Luo Yuan, Fu Hongqiao, Huang Shanglian. Study on a MEMS silicon-based non-silicon mirror for an optical switch[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10): 616~618
- 3 Yu Jinzhong, Chen Shaowu, Xia Jinsong *et al.*. Progress in SOI based optical waveguide devices and integrated optical switch matrix[J]. *Science in China Ser. E*, 2004, **34**(10): 1081~1093 (in Chinese)
余金中,陈少武,夏金松等. SOI光波导器件和集成光开关矩阵的研究进展[J]. 中国科学E辑, 2004, **34**(10): 1081~1093
- 4 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
- 5 Wei Yuan, Seongku Kim, Willim H. Steier *et al.*. Electrooptic polymeric digital optical switches (DOSs) with adiabatic couplers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2568~2570
- 6 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. 2×2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 137~140 (in Chinese)
杨建义,江晓清,杨方辉等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关[J]. 中国激光, 2003, **30**(2): 137~140
- 7 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. Polymer optical switch with Y-branch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 735~738 (in Chinese)
杨建义,江晓清,杨方辉等. Y分支有机聚合物热光开关的研制[J]. 光学学报, 2002, **22**(6): 735~738
- 8 Huang Xutao, Jiang Xiaoqing, Yin Rui *et al.*. Characteristics of GaAs heterostructure BOA type optical switches [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 157~161 (in Chinese)
黄旭涛,江晓清,尹锐等. GaAs异质结材料BOA光开关特性分析[J]. 光子学报, 2001, **30**(2): 157~161
- 9 Q. Lai, W. Hunziker, H. Melchior. Low power compact 2×2 thermooptic silica-on-silicon waveguide switch with fast response [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(5): 681~683
- 10 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
- 11 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