

文章编号: 0258-7025(2003)02-0137-04

2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关

杨建义, 江晓清, 杨方辉, 王明华

Ray T. Chen

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

(University of Texas at Austin, Austin, Texas 78758)

摘要 利用有机聚合物材料的负性热光效应,设计并研制成功了2×2全内反射型光开关。所研制的无阻塞2×2光开关,具有>27 dB的消光比,全内反射状态下,器件驱动功率约为132 mW(驱动电压约3 V×驱动电流约44 mA),这一驱动功率值可以降至50~60 mW,同时给出器件插入损耗的测试结果。

关键词 光电子学;光开关;热光效应;有机聚合物;全内反射

中图分类号 TN 252 **文献标识码** A

2×2 Total-internal-reflection Optical Switch Using Thermo-optic Effect of Polymer

YANG Jian-yi¹, JIANG Xiao-qing¹, YANG Fang-hui¹, WANG Ming-hua¹, Ray T. Chen²

(¹Department of Information Science & Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China; ²University of Texas at Austin, Austin, Texas, 78758)

Abstract In this paper, a 2×2 total-internal-reflection optical switch is designed and successfully fabricated by employing the thermo-optic effect of polymeric materials. The extinction ratios of the non-block 2×2 optical switch are larger than 27 dB at both the crossing and reflecting states. The driving power at the totally reflecting states is about 132 mW with a driving voltage of about 3 V and a related electric current of 44 mA. This driving voltage can be decreased to 50~60 mW by adopting electroplating. The insertion loss is also measured.

Key words optoelectronics; optical switch; thermo-optic effect; polymer; total-internal-reflection

1 引言

有机聚合物是研制光波导器件的重要材料之一,具有工艺简单,价格低廉,极化依存小等特点。经过多年的研究,有机聚合物材料在材料热稳定性以及老化、低损耗等方面均取得了巨大进展^[1]。人们已经应用有机聚合物材料进行了各种光波导器件的研究和开发工作,包括高速光波导调制器^[2]、光波导开关^[3]、波导阵列光栅器件^[4]和光可调衰减器^[5]等。利用热光效应的有机聚合物数字型光开关(DOS)和光可调衰减器已经成熟并开始商品化(如JDSU的BeamBoxTM系列光开关产品^[3]和ZenPhotonics的光可调衰减器^[5]等)。

有机聚合物的热光效应具有热光系数大和负折射率效应两个特点,利用负折射率效应,即随着温度的升高,材料的折射率下降的特点,可以设计全内反射型(TIR)的光波导开关。本文对TIR有机聚合物光开关进行了研究,设计并研制成功了无阻塞牛角结构2×2全内反射型热光光开关,这一研究为制作大规模光开关阵列提供更大的灵活性。

2 器件的设计与模拟

图1(a)所示为全内反射型光波导开关的基本X结构示意图,包括相互交叉的两个单模波导(图中深色区域)和一个加热电极(图中浅色部分)。

收稿日期:2001-11-19;收到修改稿日期:2002-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69907004,60177012)与国家重点基础研究发展规划项目(G1999033104)。

作者简介:杨建义(1969—),男,浙江大学信息与电子工程学系副教授,博士,从事集成光学器件研究。E-mail: yangjy@

当无加热电流流过电极时,从端口 1 输入的光将从其相应的交叉态输出端口 4 输出;当加上电流后,加热电极产生热,引起电极处波导材料折射率下降,若加热所致的折射率下降达到一定的值,光将发生全反射,从端口 1 输入的光将从输出端口 3 输出,实现 1×2 光开关。但利用该基本结构研制 2×2 全内反射型光开关,需解决两个问题:1) 高效率的反射结构,同时该结构也必须具有低损耗的交叉态;2) 端口 2 的利用。

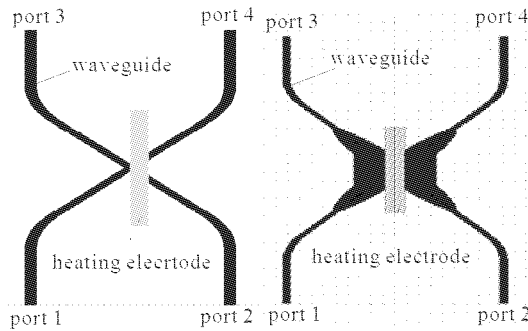


图 1 全内反射型光开关结构示意图

(a) 基本结构; (b) 改进结构

Fig. 1 Schematic diagram of the total-internal-reflection optical switch

(a) the basic structure; (b) the modified structure

由于如图 1(a)所示简单的两个单模波导交叉的 X 结构,加热器产生的温度升高不可能为在交叉点处的突变,而具有一定分布的梯度场,因此,加热所致的材料折射率变化也为渐变分布。这就是说,此时全反射时光路为一弧形,将无法有效地传播全反射光波。为此,我们在交叉点附近引入一个扩大的光反射区,扩大的反射区材料结构将与波导区一致,有助于被反射光波的弧形传播。这一引入,无论是反射态还是交叉态,光在这一反射区内的传播将如同横向近似的自由传播。由 Gaussian 光束传输可以知道^[6],展宽波导宽度可以增大腰斑尺寸,有效地减小从波导出射的光波衍射角的半宽值,减小光波在自由传播区的发散。因此,在波导交叉区域,进一步引入了展宽的波导,用以减小光波在反射区的衍射,减小衍射所带来的光损耗。在展宽的波导与单模波导间用“牛角(horn)”^[7]结构进行连接,以减小器件结构损耗。图 1(b)给出了改进的全内反射型光开关的波导结构。

图 1(a)所示结构中的输入端口 2 是无用端口,该结构仅可实现 1×2 全内反射型光开关。在对改

进的器件结构进行分析时发现,由于引入了展宽的波导,全反射光波的传输光路将为一弧形回路,从端口 1 输入的光波反射光路的横向顶点不再在两波导交叉中点位置,而是移向了左边。这为如图 1(b)所示的加热电极横向中心对称设置提供了可能,从而可以解决上述二问题。

应用 RSoft 公司的光束传输法(BPM)波导分析软件 BeamPROPTM对图 1(b)所示的 2×2 全内反射型光开关进行了模拟与分析。在分析中,选取 Amoco 公司的 Ultradel9000 系列聚酰亚胺有机聚合物参数,其中以 Ultradel9120 为波导芯区材料,对于 $1.55 \mu\text{m}$ 的波长,折射率约为 1.534,限制层为 Ultradel9020,其折射率约为 1.526,波导参数选取与 SMF28 单模光纤模式匹配的波导尺寸 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,输入端/输出端的两个端口间距为 $250 \mu\text{m}$;结合材料的热光系数为 $-1.4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,两交叉波导间的交叉角为 6° 。交叉区域展宽的波导宽度越大越有利于减小衍射所带来的光损耗,也有利于电极的设置,但其将加长“牛角”结构长度和“牛角”的结构损耗,为此,通过模拟分析,我们选取的参数值为 $30 \mu\text{m}$,中心对称电极宽度为 $12 \mu\text{m}$ 。

图 2 给出了 2×2 全内反射型有机聚合物光开关的开关特性模拟。模拟中所取的电极宽度为 $12 \mu\text{m}$ 。图中,(a)为无外加电流时,分别由输入端口 1 和 2 输入光波时,器件的交叉态传输的模拟图;(b)为外加一定电流发生全内反射时的模拟图。模拟结果表明,这种设计可以实现无阻塞的 2×2 光开关,开关的消光比大于 30 dB,器件结构所引入的光波损耗小于 0.5 dB。

3 器件的研制与测试

器件以硅为衬底,利用硅材料较大的热导率,以期获得较快的开关速率^[8]。在衬底上,首先蒸发一层铬金属层,用以增强聚合物材料与硅衬底间的粘附性,然后,旋涂一层 Ultradel9020 作为下限制层。由于 Ultradel9000 系列材料为负性光敏材料,所以器件的 Ultradel9120 波导层是通过光刻的方法(湿法刻蚀)获得的,最后,再旋涂一层 Ultradel9020 作为上限制层。器件的电极采用的是金属金,由于金与 Ultradel9020 间的粘附性差,首先溅射了一层钛,以增强电极粘附性。

在器件测试中,使用了波长为 1550 nm 的普通光源,通过 SMF28 单模光纤直接将光从光源耦合

入器件,在器件的输出端用一个 40 倍透镜将输出端成像在红外摄像机上。图 3 为在红外摄像机上观察到的器件开关特性,其中(a~c)和(d~f)分别为光由输入端口 1 和 2 输入时不同输出的变化情况。图中(a)和(d)为无电流流过加热器电极时的两输出端成像;当加热器的电极上加上 2 V 电压,约有 29.2

mA 电流流过时,光的输出如图中(b)和(e)所示;当在加热器电极上加上 3 V 电压,产生约 43.8 mA 电流时,图中(c)和(f)给出了光的反射输出情况。

在输出端使用 SMF28 单模光纤代替透镜,将光直接从输出端耦合至光功率检测器,进行输出功率检测,图4为获得的开关特性曲线。图中实线为

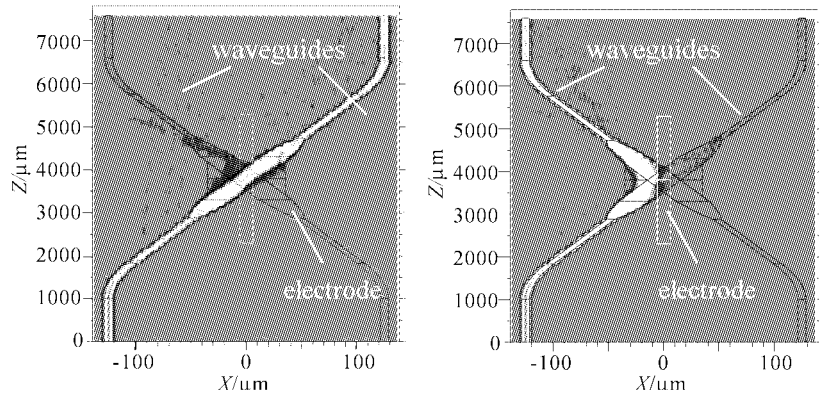


图 2 2×2 全内反射型有机聚合物光开关的模拟

(a) 无外加电流时(交叉态);(b) 外加一定电流发生全内反射时(反射态)

Fig. 2 Simulation of the 2×2 total-internal-reflection polymeric optical switch

no electric current applied in (a) while certain electric current is applied (cross); the total reflection takes place in (b) (reflection)

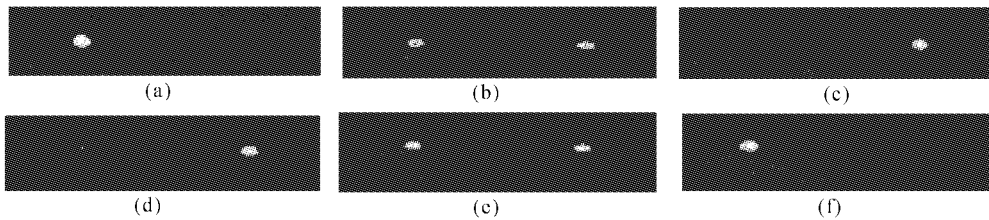


图 3 不同驱动下的光输出

(a)~(c) 输入端口 1 输入;(d)~(f) 输入端口 2 输入

Fig. 3 Output with different driving power

(a)~(c) input from port 1; (d)~(f) input from port 2

(a) 0 V; (b) 2 V, 29.2 mA; (c) 3 V, 43.8 mA; (d) 0 V; (e) 2 V, 29.3 mA; (f) 3 V, 43.7 mA

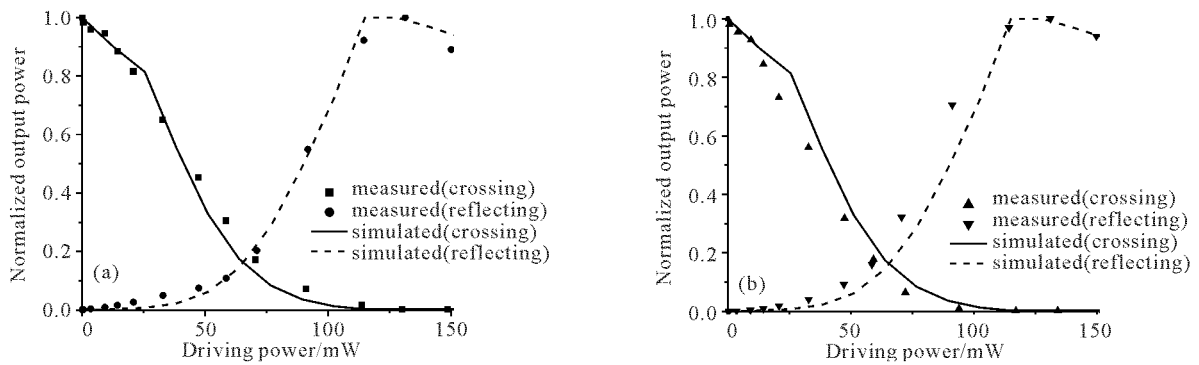


图 4 2×2 全内反射型有机聚合物热光开关的开关特性曲线

(a) 输入端口 1 输入;(b) 输入端口 2 输入

Fig. 4 Switching Property of the 2×2 TO TIR polymeric optical switch

(a) port 1 input; (b) port 2 input

模拟获得的对应交叉态输出端口的输出随驱动功率的变化曲线,(a)中的方形和(b)中的上三角形分离点为相应的实验测试结果,虚线则为对应反射态输出端口的输出变化曲线,(a)中的菱形和(b)中的下三角形为相应的实验结果。为了进行模拟结果与测试结果的比较,图中曲线的归一化是开关的两个状态各自以其最大值为基准进行的。在对所制作的多个器件样品测试比较中发现,无电流下交叉态的最大输出值较加电流下反射态最大输出值小 1~1.5 dB(即交叉态光损耗要大 1~1.5 dB)。可能的原因是湿法刻蚀(光刻)展宽了所设计的波导宽度,设计值为 7 μm ,而实验所获得的波导宽度却达 9~10 μm ,表现出多模特性。

表 1 为不同输入端口输入光波时,相应交叉态与反射态下的消光比值,以及对应反射态下的驱动功率值。由于在实验中所设计的加热电极相当长,

有相当一部分的加热功率并未有效利用,所以,经过进一步设计,并采用电镀方法,驱动功率可以大幅度降低至 50~60 mW,甚至更小。

利用单模光纤与计算机控制光学平台测试了从单模光纤经器件直接到单模光纤的器件插入损耗。测试结果表明,反射态下,2 cm 长的器件纤到纤插入损耗约为 10 dB,它包括了 Ultradel9000 系列聚合物在 1550 nm 波长附近的材料吸收损耗约 1.5 dB/cm,工艺误差引入的两个端面模式失配损耗约 4 dB,制作引入的波导损耗,以及端面抛光不完善和未加匹配液引起的损耗。通过与同一芯片上直波导的比较,反射态下器件的波导结构引入的损耗小于 1 dB。交叉态下的损耗值,如上面已经提及,较反射态下的值要高 1~1.5 dB,为波导结构所致。这些波导所致的损耗有待通过进一步优化器件参数、采用更高精度工艺过程得以改善。

表 1 2×2 全内反射型有机聚合物热光开关的消光比特性

Table 1 Extinction ratio of the 2×2 TO TIR polymeric optical switch

Input port	Cross		Reflection		
	Output port	Extinction ratio	Output port	Extinction ratio	Drive power (V×I)
1	4	27 dB	3	27.6 dB	131.4 mW (3 V×43.8 mA)
2	3	31.8 dB	4	28.6 dB	131.1 mW (3 V×43.7 mA)

对器件的开关速率进行测试的结果发现,开关速度远低于理论分析结果的毫秒量级^[8],可能的原因是理论分析中没能很好地反映实际情况中的热学边界条件,而实际中对器件散热的考虑和设计是非常重要的。在其他类似的热光器件实验中找到了解决方法:可采用电镀的方法加厚加热电极的两端连接部分,从而当加热器工作时,保证驱动功率有效地加载在波导交叉反射区。采用这一方法,热光效应的响应时间达到了毫秒量级,与理论分析结果一致,同时也降低了驱动功率。

4 结 论

本文利用有机聚合物材料的负性热光效应,给出了 2×2 全内反射型光开关的设计方案,对器件进行了模拟和优化设计,并采用 Ultradel9000 系列聚酰亚胺材料研制了器件,所研制的无阻塞 2×2 光开关,具有 >27 dB 的消光比。反射态下的器件驱动功率约为 132 mW(驱动电压约 3 V×驱动电流约 44 mA)。通过采用电镀等方法提高驱动效率,器件的驱动功率可以降至 50~60 mW,甚至更低。由于材料吸收、器件制作工艺精度等因素,器件的插入损

耗目前还过大。文中对如何获得预期的开关速度也给出了解决方法。

参 考 文 献

- 1 L. Eldada, L. W. Shacklette. Advances in polymer integrated optics [J]. *IEEE J. Sel. Top. on Quantum Electron.*, 2000, **6**(1):54~68
- 2 Yongqiang Shi, Cheng Zhang, Hua Zhang *et al.*. Low (sub-1-volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophore shape [J]. *Science*, 2000, **288**(5463):119~122
- 3 M. Diemeer, P. De Dobbelaere, R. Flipse. Polymeric Thermo-Optic Digital Optical Switches [M]. in *Integrated Optical Circuits and Components Design and Applications*, E. Murphy, ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999
- 4 T. Watanabe, Y. Inoue, A. Kaneko *et al.*. Polymeric arrayed-waveguide grating multiplexer with wide tuning range [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(18):1547~1548
- 5 Y. O. Noh, M.-S. Yang, Y. H. Won *et al.*. PLC-type variable optical attenuator operated at low electrical power [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(24):2032~2033
- 6 S. Sheem. Total internal reflection integrated-optics switch: a theoretical evaluation [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(22):3679~3687
- 7 W. K. Burns, A. F. Milton, A. B. Lee. Optical waveguide parabolic coupling horns [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(1):28~30
- 8 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. Thermal model of thermo-optical polymer devices [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2000, **11**(4):349~355 (in Chinese)