

文章编号:1004-4213(2010)04-0610-4

低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关^{*}

王微,孙小强,王希斌,邓玲,高磊,王菲,张大明[†]

(a. 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区; b. 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130012)

摘要:采用传统的半导体工艺制作了聚合物 Mach-Zehnder 型热光开关. 利用扫描电镜观测波导形貌,通过红外摄像机观测波导的近场输出光斑,在通信波段 1 550 nm 波长下测试了器件的输出光谱. 在电极上施加直流信号,测得热光开关的消光比为 -15 dB,驱动功率为 16 mW. 引入直流偏置网络,获得了器件的开关特性曲线,经测量开关上升时间为 1.2 ms,下降时间为 0.8 ms.

关键词:光学器件;热光开关;Mach-Zehnder 干涉仪;有机聚合物

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103904.0610

0 引言

光通信领域的快速发展,对光开关和光调制器的需求大大增加. 较早研究的光开关包括电光开关^[1]、热光开关^[2]、磁光开关^[3]和微机械开关^[4]等. 其中,热光开关是目前研究较多的一种光开关. 它具有驱动功耗低、隔离度高、体积小、易于集成为大规模的开关阵列等优点. 它是利用热光效应实现对光场的调制从而实现开关功能的.

有机聚合物材料成本低廉,制作工艺简单,是极佳的功能材料. 多年来的开发和研究,使得人们对有机聚合物材料的许多特性有了深入的了解,可以根据需要,提出相应的材料特性要求(如吸收谱特性、电光特性、热光特性等),再进行合成. 聚合物材料具有较高的热光系数(10^{-4} K^{-1}),比 SiO_2 材料大一个数量级^[5],适合制作热光器件. 并且其导热系数较小^[6],虽然响应时间较长,一般为毫秒量级,但利用其热光效应研制的光开关具有低驱动功率的特点,因此聚合物热光开关的研究备受关注. 国内 2002 年,浙江大学成功研制了 1×2 聚合物波导热光开关,驱动功率 110~130 mW,串扰 -20 dB;2003 年则设计并制备了 2×2 多模干涉型热光开关,串扰 -20 dB,驱动功率约 22 mW,开关时间毫秒量级. 国外对聚合物热光开关的研究开展的比较早,1998 年,韩国研制出 MZI 型 2×2 热光开关,开关功率仅为 10 mW,插入损耗 4.5 dB;2006 年,美国德州大学研制出串扰小于 -40 dB 的 2×2 热光开关,但驱动功率达 66 mW;2008 年,日本早稻田大学研制出

驱动功率 9 mW,串扰 -23 dB 的 2×2 热光开关^[7-11].

本文利用成本低,工艺简单,且热光系数较大的聚甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸环丙酯共聚物 (PMMA-GMA) 材料,制作了马赫-曾德尔 (M-Z) 型 1×1 热光开关单元,这种热光开关驱动功率仅为 16 mW,且开关的上升和下降时间分别为 1.2 和 0.8 ms. 与国内外其它类型的热光开关相比,功耗较低,开关速度较快.

1 原理

M-Z 型热光开关的结构如图 1,它由波导和电极两部分组成,波导部分是由两个 Y 分支连接而成,电极加在波导的一臂上. 输入光波经过一段光路后在第一个 Y 分支处被分成相等的两束,分别在两个波导中传输. 光波导是由热光材料制成的,其折射率随温度变化而变化. 当电极上有电流流过时,产生热量,使两个分支波导的有效折射率不同,从而使两束光信号到达第二个 Y 分支处产生相位差. 若两束光的光程差是波长的整数倍,二者相干加强;若两束光的光程差是波长的半整数倍,二者相干抵消,输出光强很小. 因此通过控制流过电极的电流大小就能控制输出光强的大小. 利用这种结构,可以将其作为 $1 \times N$ 器件阵列的单元器件,或者与聚合物光波导共同构成超长光波导延迟线^[12-13].

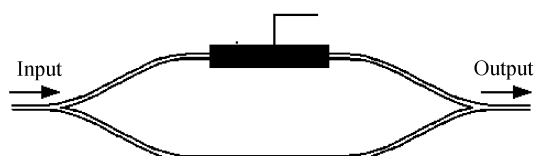


图 1 M-Z 型热光开关结构

Fig. 1 Structure of M-Z thermo-optical switch

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (2006CB302803) 资助

[†] Tel: 0431-85168097

Email: zhangdm@jlu.edu.cn

收稿日期: 2009-06-26

修回日期: 2009-11-05

有机聚合物材料的热光系数 dn/dT 一般为 10^{-4} K^{-1} , 因此利用其热光效应可以很容易实现材料的折射率调制. 假设相移臂的长度为 L , 调制区的温度变化为 ΔT , 传输光波长为 λ , 则相移臂上的相位变化为

$$\Delta\Phi = \frac{dn}{dT} \Delta T L \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

相位移动为 π 时温度变化为

$$\Delta T_{\pi} = \frac{\lambda}{2L} \left(\frac{dn}{dT} \right)^{-1} \quad (2)$$

若材料的导热系数为 K , 热量在波导两侧扩散的有效宽度为 W , 热场扩散的厚度为 D , 那么由式 (2) 可以推导出器件实现 π 相移时的热功耗为^[14]

$$P_{\pi} = \frac{\lambda}{2D} \left(\frac{dn}{dT} \right)^{-1} K W \quad (3)$$

聚合物材料的导热系数很低, 因而聚合物热光开关具有低功耗的优点. 以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 为例, 其导热系数为 $0.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 而金属的导热系数一般达到几十到几百 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[6], 半导体材料硅的导热系数为 $149 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[7], 可见聚合物的导热系数是很低的.

2 器件的制作

硅材料成本低、工艺成熟、容易解理, 适合作为聚合物光电器件的衬底, 并且硅是集成电路中应用最广泛的材料, 采用硅衬底有利于实现光电集成.

波导介质层采用有机聚合物材料, 包层为 PMMA-GMA 材料, 芯层为掺有环氧树脂的 PMMA-GMA, 在 1550 nm 波长下折射率分别为 1.483 和 1.495 . 光波导采用矩形波导, 其结构如图 2.

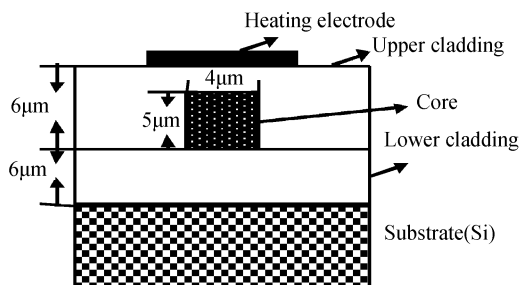


图 2 矩形波导结构

Fig. 2 The structure of rectangular waveguide

实验中首先清洗硅衬底, 然后在清洁干燥的衬底上旋涂包层, 在 $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固化 2 h , 得到厚度为 $6 \mu\text{m}$ 的薄膜. 再旋涂芯层, 固化条件与包层相同, 薄膜厚度为 $5 \mu\text{m}$. 用真空蒸镀的方法在芯层表面形成一层厚度为 $60 \sim 80 \text{ nm}$ 的铝膜, 然后旋涂 BP212 光刻胶, 进行光刻, 并利用湿法腐蚀在铝膜上得到波导图形, 再进行 O_2 气氛中的反应离子刻蚀 (RIE), 形

成芯层矩形波导, 去掉铝膜后, 旋涂并固化上包层. 这样就制作完成了热光开关波导部分.

图 3 为 O_2 反应离子刻蚀后形成的矩形波导的扫描电镜 (SEM) 照片, 图中所示为输入输出区, 该部分波导宽度为 $9 \mu\text{m}$, 这样设计可以使波导端面能够更好地与光纤耦合, 减小器件的损耗. 两分支臂波导宽度为 $4 \mu\text{m}$, 脊高 $5 \mu\text{m}$. 波导制作完成后, 在表面蒸镀一层厚约为 200 nm 的铝金属层, 进行电极图形与波导位置精确对准的套刻, 并利用湿法刻蚀腐蚀掉多余的铝, 制成可用于测试的加热电极.

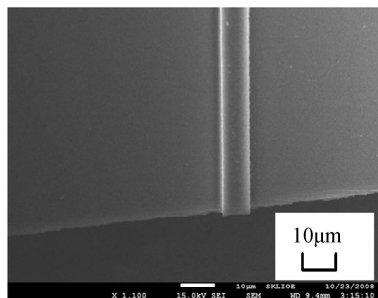


图 3 波导表面的 SEM 照片

Fig. 3 SEM of surface of the waveguide

3 测试结果

本文采用光纤与波导直接耦合的方法对器件进行了测试. 波导的输入输出端为自然解理面. 波长为 1550 nm 的红外激光束经由单模光纤直接耦合输入波导, 输出端经 160 倍透镜聚焦成像于红外摄像机的接收端, 并显示在监视器上, 得到了图 4 所示的近场输出光斑, 红外激光器的输出功率为 0.1 mW .



图 4 波导近场输出光斑

Fig. 4 Output near-field spot of waveguide

测试了器件的开关特性曲线, 在波导输出端利用单模光纤将光耦合至光电探测器, 将光信号转变为电信号, 通过示波器观测探测器的输出波形. 本文在加热电极上施加带有直流偏置的方波信号 (频率为 100 Hz), 得到了如图 5 所示的开关特性曲线. 从该曲线上可以看出, 上升时间为 1.2 ms , 下降时间为 0.8 ms , 开关时间为 2 ms .

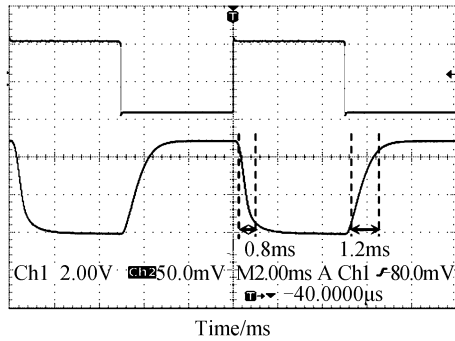


图5 开关特性曲线
Fig. 5 Switching characteristic

利用光谱仪测试了器件在通信波段 1 550 nm 处的光谱,如图 6(a)为不加电流时输出光谱,此时输出光强最大.在加热电极上施加直流信号,当电压为 3.9 V 时,热光开关实现 π 相移,输出光强最小,如图 6(b),此时测得流过电极的电流为 4.2 mA,功耗为 16 mW. 器件的消光比为 -15 dB.

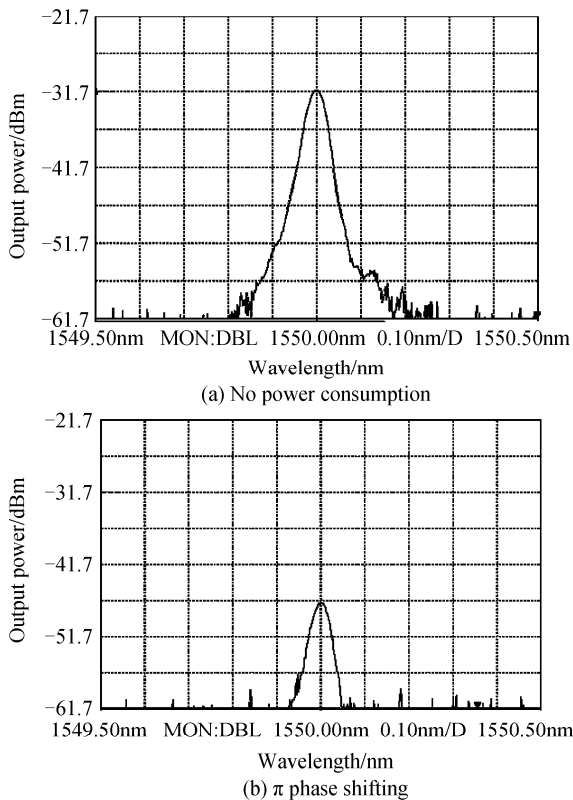


图6 M-Z型热光开关的输出光谱
Fig. 6 Output spectrum of the switch

实验中在样品的输出端通过光纤耦合连接到光功率计上,对电极直接施加直流信号,测得样品的输出光功率随电流变化的曲线如图 7. 可以看到,输出光功率随电流呈现周期性变化.

器件的驱动功耗较低,这主要由于波导材料的导热系数很低,与前面的讨论一致.但低的导热系数也会造成器件的响应时间较长,一般聚合物热光开关的开关时间为毫秒量级^[15],所以在器件的设计过程中要综合考虑驱动功率和开关速度的影响.

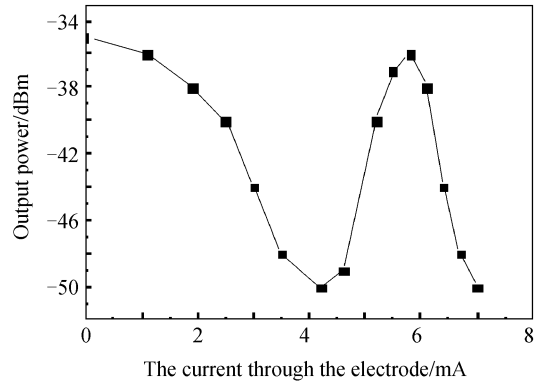


图7 输出光功率随电流变化曲线
Fig. 7 The output power as the current through the electrode

4 结论

采用传统的半导体工艺制作了硅基聚合物 Mach-Zehnder 热光开关.在 1 550 nm 通信波段测试了器件的输出光谱,结果表明热光开关的消光比为 -15 dB,驱动功率为 16 mW.在加热电极上施加方波信号,测得了开关特性曲线,器件的开关上升时间为 1.2 ms,下降时间为 0.8 ms.

参考文献

- [1] LEE M H, MIN Y H, JU J J, *et al.* Polymeric electrooptical 2 \times 2 switch consisting of bifurcation optical active waveguides and a Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2001, **7**(5): 812-818.
- [2] SIEBEL U, HAUFFE R, PETERMANN K. Crosstalk-enhanced polymer digital optical switch based on a W-shape [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(1): 40-41.
- [3] WONG Zi-hua, CHEN Zhi-min, ZHU Yun, *et al.* A micro high-speed 1 \times 2 magneto-optic switch [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 357-361.
翁梓华, 陈智敏, 朱贇, 等. 高速微型 1 \times 2 磁光开关 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 357-361.
- [4] BAO Jun-feng, ZOU Yong-zhuo, WU Xing-kun. A micromachining-based miniature 1 \times 2 MEMS optical switch [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 949-951.
鲍俊峰, 邹勇卓, 吴兴坤. 一种超小型 1 \times 2 微机械光开关 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 949-951.
- [5] DIEMEER M, DOBBELAERE D P, FLIPSE R. Integrated optical circuits and components design and applications [M]. Murphy E ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999: 239-247.
- [6] MA Chuan-guo, RONG Min-zhi, ZHANG Ming-qiu. Advances in study of thermal conducting polymers composites and their application [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002(7): 40-45.
马传国, 容敏智, 章明秋. 导热高分子复合材料的研究与应用 [J]. *材料工程*, 2002(7): 40-45.
- [7] YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing, YANG Fang-hui, *et al.* Polymer thermo-optic switches with Y-branch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 735-738.
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] YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing, YANG Fang-hui, *et al.* 2 \times 2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(2): 137-

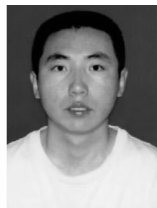
140.
杨建义,江晓清,杨方辉,等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关[J]. 中国激光,2003,30(2):137-140.
- [9] OH M C, LEE H J, LEE M H, *et al.* Asymmetric X-Junction thermo-optic switches based on fluorinated polymer waveguide [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(6): 813-815.
- [10] WANG X, HOWLEY B, CHEN M Y, *et al.* Crosstalk-minimized polymeric 2×2 thermo-optic switch [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 16-18.
- [11] XIE N, HASHIMOTO T, UTAKA K. Compact and low power operation thermo-optic MMI-based polymer photonic switch [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, Sydney, Australia, 2008.
- [12] WANG X, HOWLEY B, CHEN M Y, *et al.* Polymer based thermo-optic switch for optical true time delay [C]. *SPIE*, 2005, 5728: 60-67.
- [13] HAUFFE R, PETERMANN K. Thermo-optic switching [M]. US: Springer 2006: 129-133.
- [14] WANG Zhang-tao, FAN Zhong-chao, XIA Jin-song, *et al.* SOI thermo-optic modulator [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(10): 1315-1318.
王章涛,樊中朝,夏金松,等. SOI 热光调制器[J]. 半导体学报, 2004, 25(10): 1315-1318.
- [15] LIANG Kun, CHEN Wang, WU Bo-yu, *et al.* Polymer thermo-optic digital optical switches [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(4): 747-750.
梁琨,陈旺,吴伯瑜,等. 聚合物绝热分叉型数字热光开关[J]. 半导体学报, 2006, 27(4): 747-750.

Low Power Consumption Polymer Thermo-optic Switch with Mach-Zehnder Interferometer

WANG Wei, SUN Xiao-qi, WANG Xi-bin, DENG Ling, GAO Lei, WANG Fei, ZHANG Da-ming
(*a. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics; b. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

Abstract: Polymer Mach-Zehnder thermo-optic switch is fabricated using traditional semiconductor technology. The surface of waveguide is observed by a scanning electron microscopy, and the output near-field spot is displayed on the infrared camera. At a 1 550 nm optical communication wavelength, the output spectrum is shown. The extinction ratio of the switch is -15 dB and the driving power is 16 mW. The switching property of the device is tested with DC bias. The rise time and the fall time of the switch are 1.2 ms and 0.8 ms.

Key words: Optical devices; Thermo-optic switch; Mach-Zehnder interferometer; Organic polymers



WANG Wei was born in 1985. He received his M. S. degree from College of Electronic Science and Engineering, Jilin University in 2009, and his research interests focus on polymer optoelectronics.