

低功耗聚合物 MZI 结构热光开关研究

孙静雯 孙 健 王艳双 曲禄成 王希斌* 王 菲 张大明

吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区,
吉林省光通信用聚合物波导器件工程实验室, 吉林 长春 130012

摘要 设计并制作了一种基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的低功耗聚合物热光开关。聚合物材料具有低热导率和高热光系数的优点,可以有效降低热光器件的功耗。在SiO₂衬底上,采用热光系数较大的Norland紫外固化胶(NO A73)作为波导芯层,聚甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸环氧丙酯的共聚物[P(MMA-GMA)]作为波导的上包层,设计了热光开关器件,并对光场和热场进行了模拟,采用传统的半导体工艺完成了热光开关器件的制备。器件的测试结果表明,在1550 nm工作波长下,热光开关器件的消光比为20.2 dB,驱动功率仅为9.14 mW,开关的上升时间为174 μs,下降时间为292 μs。

关键词 光学器件; 热光开关; 集成光学材料; 聚合物波导; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0706001

Polymeric MZI Thermo-Optic Switch with Low Power Consumption

Sun Jingwen Sun Jian Wang Yanshuang Qu Lucheng Wang Xibin
Wang Fei Zhang Daming

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin Provincial Engineering Laboratory on Polymer Planar Lightwave Circuits, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract A polymeric Mach-Zehnder interferometer (MZI) thermo-optic (TO) switch with low power consumption is designed and fabricated. The polymer materials have the advantages of low thermal conductivity and high thermo-optic coefficient. Therefore it can reduce the power consumption of the thermo-optic device effectively. The TO switch is designed on the SiO₂ substrate with selecting the Norland optical adhesive (NOA73) as the core layer and using Poly (methyl methacrylate-glycidyl methacrylate) [P(MMA-GMA)] as the upper cladding. The light field and thermal field distribution of the TO switch are both simulated. The TO switch is fabricated by using the traditional semiconductor technology. At 1550 nm wavelength, the extinction ratio of the device is 20.2 dB and the power consumption is only about 9.14 mW. The rise time and the fall time of the switch are 174 μs and 292 μs, respectively.

Key words optical devices; thermo-optic switch; integrated optics materials; polymer waveguide; Mach-Zehnder interferometer

OCIS codes 130.3120; 130.4815; 130.3130; 130.5460

1 引 言

随着光通信系统中传输容量的逐年增长,技术进步主要表现在光器件、多种复用方式和新颖的光网络协议上。20世纪80年代发明的光纤放大器(EDFA)是光纤通信的一场革命,从而诞生了采用波分复用(WDM)

收稿日期: 2015-01-29; 收到修改稿日期: 2015-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(61405070,61475061,61177027,61261130586)、吉林省科技发展计划项目(20140519006JH)、吉林省发改委高技术产业专项资金项目(JF2012G048)

作者简介: 孙静雯(1990—),女,硕士研究生,主要从事聚合物平面光波导器件方面的研究。E-mail: 425306857@qq.com

导师简介: 王 菲(1978—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事聚合物光子学材料与器件等方面的研究。

E-mail: wang_fei@jlu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xibinwang@jlu.edu.cn

技术的新一代光纤通信系统。光开关与光开关阵列在 WDM 光网络中起着光域优化、路由、保护以及自愈等功能,是光插分复用器(OADM)和光交叉连接器(OXC)的核心技术^[1]。光网络的发展对光开关提出了更高的要求,低功耗、高性能、结构紧凑、易于集成和低成本已经成为其主要的研究方向。在器件高度集成化的发展趋势下,不断降低功耗已成为高速光网络中的一个重要研究课题^[2-4],它的意义在于减少能耗,节约能源。因此研制低功耗的热光开关具有重要的意义。早在 20 世纪 80 年代,人们已经采用离子交换玻璃^[5]和扩散铌酸锂材料^[6]研制出热光器件。但是由于这两种材料的热光系数相对较小,因此制备出的器件性能较低,需要高达 500 mW 的驱动功率。目前根据材料体系不同,热光开关可以分为两类:聚合物材料体系的热光开关^[7]和硅/二氧化硅(SOI)材料体系的热光开关^[8]。与硅基热光开关相比,有机聚合物的合成及器件加工工艺相对简单,且价格低廉。另外,聚合物材料具有低热导率和高热光系数的优点,因此采用聚合物材料制备的热光开关都具有功耗低、制备工艺简单等优势,使其受到了人们的广泛关注,并在近年来取得了很大的研究进展^[9-13]。2005 年,香港城市大学的 Chen K X 等^[14]采用聚合物材料设计并制备了一种垂直耦合结构的热光开关,开关时间为 2 ms,功耗为 50 mW。从开关结构上,马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型平面光波导热光开关具有体积小,工艺简单,利于高度集成等优点。2010 年,吉林大学的王微等^[15]采用甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸环丙丙酯的共聚物[P(MMA-GMA)]作为波导材料,制备出 MZI 热光开关,开关时间为 2 ms,功耗降低至 16 mW。2012 年,吉林大学的梁磊等^[16]报道的 MZI 型热光开关,通过波导和电极结构的优化,将开关功率进一步降低到 13 mW。

为了进一步降低热光开关器件的功耗,同时提高器件的响应速度,本文设计并制作了一种基于 MZI 结构的聚合物热光开关。器件采用 Norland 紫外固化胶(NOA73)材料波导芯层,P(MMA-GMA)作为波导上包层材料,无机 SiO₂作为波导下包层材料。由于芯层 NOA73 材料具有较大的热光系数($-3.0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$),可有效降低器件的功耗,另外,选用热导率相对较大的 SiO₂作为波导下包层,有利于提高器件的响应速度。测试结果表明该器件具有较低的功耗,同时在提高响应速度方面也表现出明显的优势。

2 器件结构设计及模拟

设计的 MZI 型热光开关的结构如图 1 所示。器件选用 SiO₂作为下包层,NOA73($n=1.553@1550 \text{ nm}$)作为波导芯层,P(MMA-GMA)($n=1.483@1550 \text{ nm}$)作为波导的上包层,铝电极作为加热电极。MZI 型波导结构包括输入输出光波导,两个 Y 分支波导和两条对称的相位调节臂。其中调节臂的长度为 12 mm,两臂之间的距离为 50 μm 。铝电极位于调节臂上方,其长度与调节臂的长度相同。通过在铝电极两端施加电压来形成电流,进而产生焦耳热,并向芯层波导传递,由于聚合物材料具有较大的热光系数,热场将使波导芯层的折射率发生改变,从而在两条干涉臂之间形成相位差。若两束光的光程差是波长的整数倍,两束光相干加强;若两束光的光程差是波长的半整数倍,二者相干抵消。通过控制电压的大小就可以控制输出光强的大小。设计了一种脊型波导结构,波导脊高为 2 μm 、脊宽为 8 μm 、平板层厚度为 2 μm ,上包层厚度为 3 μm 。采用有限元法对脊型波导的光场分布进行了模拟,模拟结果如图 2 所示,从图中可以看出,所设计的波导结构可以将光场严格地限制在 NOA73 芯层之中,从而实现对光信号的良好限制。

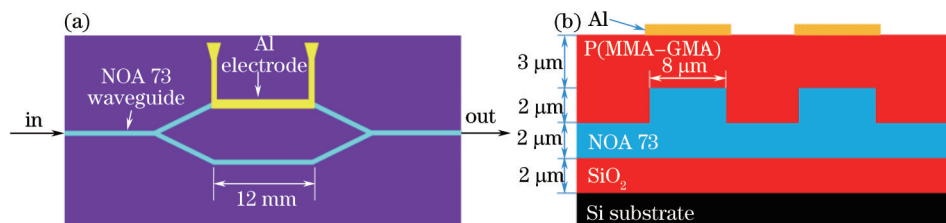


图 1 (a) 热光开关的结构示意图; (b) 热光开关工作区截面示意图

Fig.1 (a) Structural schematic of thermo-optic switch; (b) cross-section schematic of the switch in the heating region

同时,对开关器件的热场分布情况也进行了计算模拟,图 3 为开关器件的热场分布模拟结果,从图中可以看出加热电极产生的热量很好地作用在施加电压一侧的调制臂上。

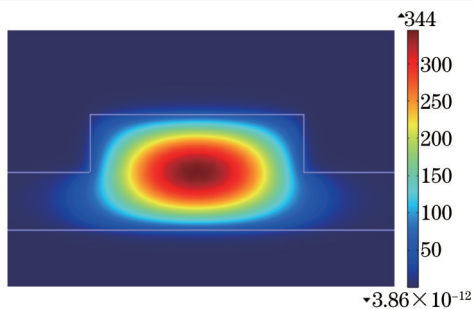


图2 波导中的光场分布模拟

Fig.2 Optical field distribution of the waveguide

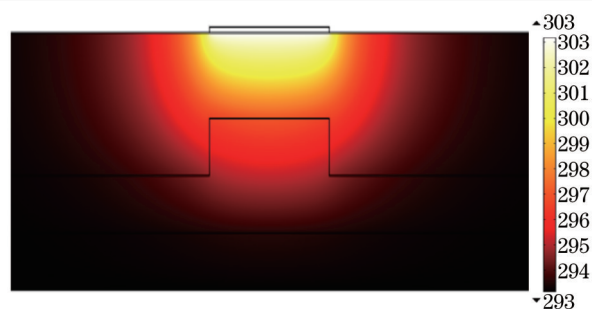


图3 热场分布模拟结果

Fig.3 Simulation result of thermal field distribution

3 器件制备及测试

采用传统的半导体工艺制备热光开关器件,具体的工艺流程如下:1)在Si衬底上生长一层2 μm厚的SiO₂下包层;2)在SiO₂下包层上旋涂NOA73芯层材料,经过紫外曝光、热固化等工艺过程,得到4 μm厚的波导芯层;3)采用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺制作出NOA脊型波导;4)在制备好的脊形波导上旋涂一层P(MMA-GMA)材料,在120℃下固化2 h,得到3 μm厚的上包层,完成了波导的制备;5)在制备好的波导上蒸镀一层铝膜,并旋涂BP-212正性光刻胶,采用光刻和湿法刻蚀的方法制作出铝电极。图4为扫描电子显微镜(SEM)下观察到的脊型波导端面形貌照片,图中显示波导的脊高为2 μm,脊宽为8 μm,平板厚度为2 μm,与设计值完全相符。

制备完成后,对热光开关器件进行了相关的性能测试,测试中采用的信号光中心工作波长为1550 nm。信号光由单模光纤直接耦合进入波导,输出光信号可通过红外 CCD 进行观察,图5为输入信号光功率为0.1 mW时经过热光开关器件的输出光斑。为了测试器件的开关特性,将输出信号光通过单模光纤耦合到光电探测器中,并在加热电极上施加频率为500 Hz的方波信号,使用示波器观察器件的输出响应波形,如图6所示,其中通道1为施加的方波信号波形,通道2为器件的开关响应波形,从示波器上可以读出开关的上升

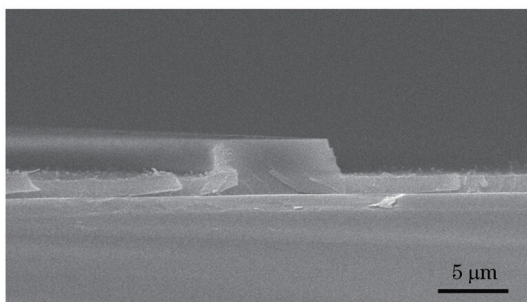


图4 脊型波导端面的SEM照片

Fig.4 SEM image of the ridge waveguide



图5 热光开关器件的输出光斑

Fig.5 Output pattern of the thermo-optic switch

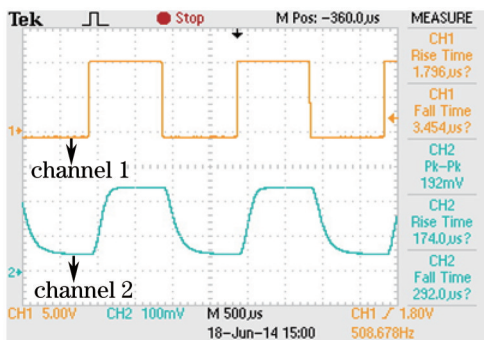


图6 热光开关器件的开关响应曲线

Fig.6 Switching response curves of the thermo-optic switch

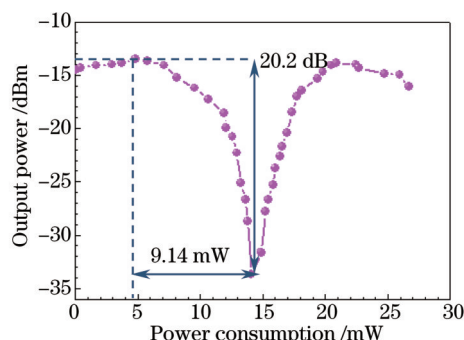


图7 输出光功率随驱动功率的变化曲线

Fig.7 Curves of the output optical power versus the driving power

时间和下降时间分别为 174 μs 和 292 μs 。为了测试器件的驱动功率和消光比,首先将输出的光信号通过单模光纤耦合进入光功率计,测得器件的插入损耗为 14.5 dB,然后通过探针将直流电压施加在器件的加热电极上,通过调整直流电源的电压来改变器件的加热功率,测得热光开关的输出光功率与驱动功率的关系曲线如图 7 所示,可以看出器件的消光比为 20.2 dB,器件的驱动功率为 9.14 mW。

4 结 论

利用热光系数较大的 NOA73 材料,设计并研制了一种基于 MZI 结构的聚合物热光开关器件。为了保证器件单模传输、减小传输损耗、缩短开关时间并降低器件功耗,分别对波导结构以及光场和热场的分布进行了模拟和优化。采用传统半导体工艺制备了热光开关器件,测试结果表明,在 1550 nm 工作波长下,器件的插入损耗为 14.5 dB,消光比为 20.2 dB,驱动功率仅为 9.14 mW,开关的上升时间和下降时间分别为 174 μs 和 292 μs 。所提出的采用 NOA73 这种高热光系数的聚合物材料来设计和制备热光开关器件,有效地降低了热光开关器件的功耗,这种低功耗的聚合物热光开关器件在光通信网络中将具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Gao Lei. Research of Optical Switches Based on Negative Photoresist SU-8[D]. Jilin: Jilin University, 2010: 1-11.
高磊. 基于负型光刻胶 SU-8 的光开关的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2010: 1-11.
- 2 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.
- 3 Song Hongyan, Han Xiyou, Zou Pin, *et al.*. Optimal design of low power tunable coupler based on polymer waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0723002.
宋红妍, 韩秀友, 邹品, 等. 低功耗聚合物波导可调耦合器的优化设计[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0723002.
- 4 Qū Lucheng, Liang Lei, Sun Jian, *et al.*. Design and fabrication of polymer/SiO₂ hybrid variable optical attenuator with fast response and low power consumption[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (12): 1216001.
曲禄成, 梁磊, 孙健, 等. 基于 Polymer/SiO₂ 的快速低功耗可变光衰减器的研制[J]. 中国激光, 2014, 41 (12): 1216001.
- 5 M Haruna, J Koyama. Thermo-optic deflection and switching in glass[J]. Appl Opt, 1982, 21(19): 3461-3465.
- 6 M Haruna, J Koyama. Thermo-optic effect in Linb₃ for light deflection and switching[J]. Electronics Letters, 1981, 17(22): 842-844.
- 7 Guohua Hu, Binfeng Yun, Yang Ji, *et al.*. Crosstalk reduced and low power consumption polymeric thermo-optic switch[J]. Optics Communications, 2010, 283(10): 2133-2135.
- 8 M P Earnshaw, M A Cappuzzo, E Chen, *et al.*. Ultra-low power thermo-optic silica-onsilicon waveguide membrane switch[J]. Electronics Letters, 2007, 43(7): 393-394.
- 9 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui, *et al.*. Organic 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.
- 10 Zijian Cao, Yunfei Yan, Jie Meng, *et al.*. Low power consumption thermo-optic switch based on DR1/PMMA[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(9): 2163-2165.
- 11 Diemeer M B J, Brons J J, Trommel E S. Polymeric optical waveguide switch using the thermo-optic effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7 (3): 449-453.
- 12 Zhang Haixin, Wang Lei, Niu Xiaoyan, *et al.*. 650 nm visible band thermo-optic switch based on bonded organic-inorganic hybrid materials[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0906002.
张海鑫, 王雷, 牛小艳, 等. 650 nm 可见光波段全复合材料热光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0906002.
- 13 Niu Xiaoyan, Han Chao, Wang Lei, *et al.*. 650 nm wavelength all-polymer thermo-optical waveguide switch based on organic-inorganic grafting polymethyl methacrylate materials[J]. Chinese J Lasers, 2013, 33(10): 1016001.
牛小艳, 韩超, 王雷, 等. 650 nm 波长有机-无机接枝改性. 聚甲基丙烯酸甲酯全聚合物热光波导开关[J]. 中国激光, 2013, 33(10): 1016001.
- 14 Chen K X, Chu P L, Chan H P. A vertically coupled polymer optical waveguide switch[J]. Optics Communications, 2005, 244(1): 153-158.
- 15 Wang Wei, Sun Xiaoqiang, Wang Xibin, *et al.*. Low power consumption polymer thermo-optic switch with Mach-Zehnder

interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(4): 610-613.

王 微, 孙小强, 王希斌, 等. 低功耗聚合物 Mach-Zehnder 热光开关[J]. 光子学报, 2010, 39(4): 610-613.

16 Liang Lei, Yan Yunfei, Sun Xiaoqiang, *et al.*. Design and fabrication of an organic/inorganic hybrid thermo-optic switch with low power consumption[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(7): 1246-1251.

梁 磊, 闫云飞, 孙小强, 等. 低功耗有机/无机混合结构热光开关的研制[J]. 光电子·激光, 2012, 23(7): 1246-1251.

栏目编辑: 韩 峰