

文章编号:1004-4213(2011)09-1303-4

# 有机/无机复合功能材料倒脊型波导热光开关

王辉,张峰,刘天际,王菲,孙小强,陈长鸣,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,长春 130012)

**摘 要:**利用溶胶-凝胶技术自主合成了一种具有优良光学特性和高热稳定性的有机/无机复合芯层材料.这种功能材料的分子中含有有机柔性侧链,可形成环氧交联.与无机  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  体系相比,具有较高的热光系数(量级为  $10^{-4}/\text{K}$ ),以及更好的成膜性和可加工性.通过与实验室自行配制的 P(MMA-GMA)包层材料相匹配,设计制备了基于这种有机/无机复合功能材料的倒脊型波导马赫-曾德尔型热光开关.器件的波导与热电极性能良好.插入损耗为 10 dB,驱动功率 15 mW,开关时间小于 1 ms,消光比 15 dB.

**关键词:**有机/无机复合功能材料;聚合物;倒脊型波导;热光开关

**中图分类号:** TN814

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114009.1303

## 0 引言

光开关是光通信网络节点的核心器件,是决定网络性能的关键环节.随着光通信技术的迅速发展,对光开关的性能要求也在不断提高.热光开关是目前研究比较多,具有实用价值的一种光开关<sup>[1]</sup>.热光开关的原理是基于材料折射率对温度的依赖,即热光效应.电极加热引起材料的折射率变化,实现对光场的调制,进而实现开关功能<sup>[2]</sup>.热光开关具有驱动功率低、串扰小、易于大规模集成等优点,有着广泛的应用.

有机聚合物材料是制作光电子器件的一种很好的功能材料<sup>[3-7]</sup>.它的成本较低,具有优良的衬底兼容性,制备工艺简单.通过控制材料的组分比可以调节其折射率,通过分子设计可优化材料特性<sup>[8]</sup>.聚合物材料具有良好的热光特性,热光系数比无机材料大一个数量级,为  $10^{-4}/\text{K}$ ,并且导热系数较小.有机聚合物材料的这些优点使它在制作热光开关方面得到了广泛的应用<sup>[9-12]</sup>.目前,已经研制出的性能较好的热光开关,可在低驱动功率下工作,开关时间在微秒量级.

本文利用溶胶-凝胶技术,自主合成了具有优良光学特性和高热稳定性的有机/无机复合功能材料.这种材料有很好的热光特性,成膜性和可加工性.以这种复合材料为芯层,P(MMA-GMA)材料为包层,

设计了一种倒脊型结构的波导.这种结构能够实现对光场很好的限制,可实现器件单模传输.采用蒸发、光刻、刻蚀等半导体工艺,制备了基于这种有机/无机复合功能材料的倒脊型波导马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)型热光开关.器件的波导和热电极性能良好.测试得到,插入损耗为 10 dB,驱动功率 15 mW,开关时间小于 1 ms,消光比 15 dB.

## 1 材料的制备

利用溶胶-凝胶技术自主合成了有机/无机复合芯层材料.原料为硅烷偶联剂(KH560),钛酸正四丁酯等.通过调节反应物中钛酸正四丁酯的含量,可以调节材料的折射率.这种功能材料有优良的光学特性和高热稳定性.它的分子中含有 Si-O-Ti 键,可以形成刚性无机网络,Ti 可调整材料的折射率;同时分子中还含有有机柔性侧链,可形成环氧交联结构.与单纯的无机  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  体系相比,具有较高的热光系数(量级为  $10^{-4}/\text{K}$ ),以及更好的成膜性和可加工性.

包层材料 P(MMA-GMA)材料也是我们实验室自主合成的一种环氧交联型聚合物材料.这种材料的分子之间可形成网状交联结构,具有很好的光学特性和热稳定性.

图 1 给出了硅烷偶联剂(KH560)的分子式及生成 P(MMA-GMA)的反应式.

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61077041, No. 60807029)、吉林省青年科研基金(No. 20100174)、吉林大学基本科研业务费专项资金(No. 200810028, No. 200905005, No. 201103071)和集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(No. IOSKL-KFKT-11)联合资助

**第一作者:**王辉(1986-),女,硕士研究生,主要研究方向为基于聚合物的光调制器/开关. Email: jlbsfswb@163.com

**通讯作者:**陈长鸣(1981-),男,讲师,博士,主要研究方向为聚合物平面光波导器件. Email: chenbcm@jlu.edu.cn

**收稿日期:** 2011-05-30; **修回日期:** 2011-06-14

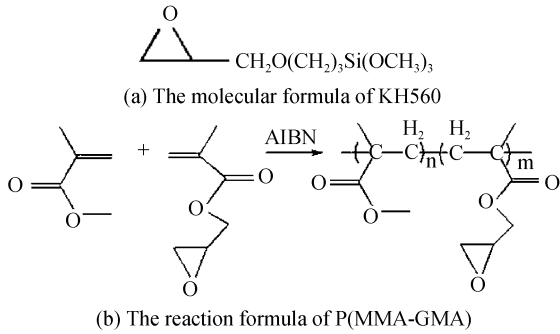


图 1 硅烷偶联剂(KH560)分子式及生成 P(MMA-GMA)的反应式  
Fig.1 Molecular formula of KH560 and the reaction formula of P(MMA-GMA)

### 2 波导结构的设计

由于这种有机/无机复合功能材料中含有金属Ti的成分,在成膜后薄膜的刚性较大,难于刻蚀,因此我们设计了一种倒脊型的波导结构.波导芯层脊宽为4 μm,脊高为3 μm,平板厚度为2 μm.利用椭圆偏振仪测量材料的折射率<sup>[13]</sup>,芯层折射率1.493@1 550 nm,包层折射率1.483@1 550 nm.计算有效折射率, $N_{TE}=1.487\ 136$ , $N_{TM}=1.487\ 121$ ,模式双折射为 $1.5 \times 10^{-5}$ ,可实现器件单模传输.利用BPM软件对波导端面光场分布进行模拟.图2(a)为倒脊型波导结构图,图2(b)为光场分布图.这种结构可以实现对光场的很好的限制.

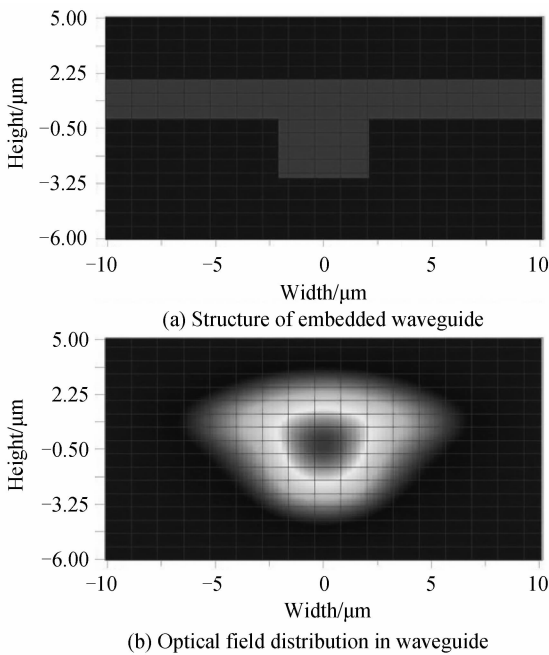


图 2 波导端面光场模拟  
Fig.2 Optical field distribution simulation of the cross section of waveguide

### 3 器件的制作

制作器件的工艺流程为:清洁硅片表面;旋涂 P

(MMA-GMA)下包层,120 °C 固化 2 h;蒸铝,旋涂 BP212 光刻胶,80 °C 固化 20 min;光刻,显影,湿法腐蚀,在铝膜上得到 M-Z 波导图形;ICP 刻蚀,在 P(MMA-GMA)薄膜上得到凹槽;去光刻胶和掩膜;旋涂有机/无机复合芯层材料填充凹槽,90 °C 固化 1 h;旋涂 P(MMA-GMA)上包层,120 °C 固化 2h;蒸铝,旋涂 BP218 光刻胶,85 °C 固化 20 min;光刻,显影,湿法腐蚀,得到热电极<sup>[14-16]</sup>.图 3 为器件的端面结构示意图.

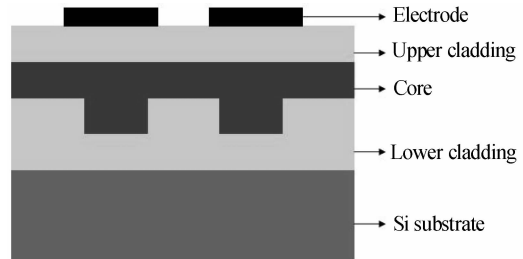


图 3 器件的端面结构  
Fig.3 Cross sectional profile of the device

图 4 为用芯层材料填充凹槽后,波导端面的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片.可以看到,波导芯层与包层之间界面清晰,不存在互溶的现象,波导形貌良好.

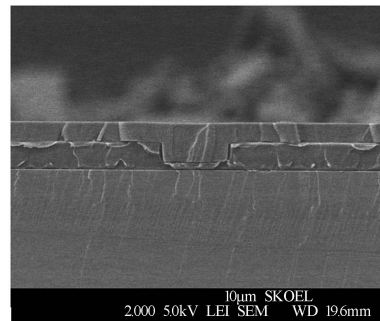


图 4 波导端面 SEM 照片  
Fig.4 SEM micrograph of the cross section of waveguide

图 5 为制备完成的器件实物照片.



图 5 器件实物图  
Fig.5 Photograph of the fabricated device

### 4 测试结果

对器件的两端进行解理,波导的输入/输出端面

为自然解理面,进行光信号传输测试:波长为 1 550 nm 的激光经过单模光纤耦合进波导输入端,输出端经透镜聚焦放大成像于红外探测器,在监视器上显示输出光斑.图 6 为输入光功率为 0.1 mW 时,得到的近场光输出图像.

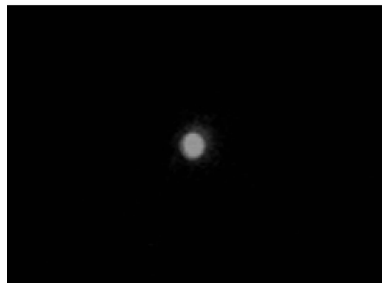


图 6 波导近场输出光斑

Fig. 6 Near-field light output of waveguide

在热电极上加载交流电信号,测试器件的热光开关特性.图 7 为输入 100 Hz 方波信号时,器件的热光开关响应曲线,驱动功率 15 mW,开关时间小于 1 ms,消光比 15 dB.

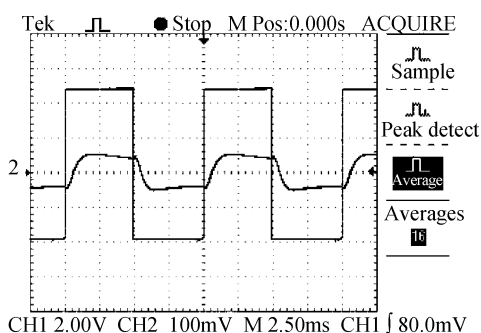


图 7 器件热光开关响应曲线

Fig. 7 Thermal-optic response curve of the device

## 5 结论

本文利用溶胶-凝胶技术自主合成了一种性能优良的有机/无机复合功能材料,并制备了基于这种材料的倒脊型波导 M-Z 型热光开关.器件的插入损耗为 10 dB,驱动功率 15 mW,开关时间小于 1 ms,消光比 15 dB.这种有机/无机复合功能材料具有很好的热光特性,高的热稳定性和实用性,具有广阔的应用发展前景.

### 参考文献

- [1] YANG Fang-hui, JIANG Xiao-qing, YANG Jian-yi, *et al.* Research and progress in polymeric thermo-optic switch[J]. *Semiconductor Technology*, 2001, **26**(9): 38-41.  
杨方辉,江晓清,杨建义,等.有机聚合物热光开关的研究进展[J].*半导体技术*, 2001, **26**(9): 38-41.
- [2] YU Hui, JIANG Xiao-qing, YANG Jian-yi, *et al.* Analytical model of thermal field in polymer thermo-optic devices[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, **25**(8): 995-999.  
余辉,江晓清,杨建义,等.有机聚合物热光器件热场的解析模型[J].*半导体学报*, 2004, **25**(8): 995-999.
- [3] ELDADA L, SHACKLETTE L W. Advances in polymer integrated optics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(1): 54-68.
- [4] WANG X, HOWLEY B, CHEN M Y, *et al.* Crosstalk-minimized polymeric  $2 \times 2$  thermo-optic switch[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(1): 16-18.
- [5] MA H, JENA K Y, DALTON L R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices[J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(19): 1339-1365.
- [6] ENAMI Y, MATHINE D, DEROSE C T, *et al.* Hybrid cross-linkable polymer/sol-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1 550 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(9): 093505-3.
- [7] 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.
- [8] SCHOTTNER G. Hybrid sol-gel-derived polymers; applications of multifunctional materials[J]. *Chemistry of Materials*, 2001, **13**(10): 3396-3403.
- [9] WANG Wei, SUN Xiao-qiang, WANG Xi-bin, *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.
- [10] 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.
- [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] YANG Di, YU Jin-zhong, CHEN Shao-wu. An improvement on  $2 \times 2$  silicon-on-insulator Mach-Zehnder thermo-optical switch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 931-934.
- [13] ZHOU Jian-hua, YOU Bai-qiang, CHEN Zhen-xing. The refractive index measurement of polymer films with ellipsometry[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2005, **18**(5): 26-29.  
周建华,游佰强,陈振兴.椭圆法测试聚合物薄膜折射率的研究[J].*光电子技术与信息*, 2005, **18**(5): 26-29.
- [14] SUN Xiao-qiang, GAO Wei-nan, SUN Jie, *et al.* Polymer  $2 \times 2$  directional coupler electro-optic switches [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3084-3087.  
孙小强,高伟男,孙杰,等.聚合物  $2 \times 2$  定向耦合型电光开关[J].*光子学报*, 2009, **38**(12): 3084-3087.
- [15] CHEN Chang-ming, YI Yun-ji, WANG Fei, *et al.* Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices[J]. *IEEE Quantum Electronics*, 2010, **46**(5): 754-761.
- [16] ZHANG Feng, LI Xiao-dong, TAN Zhen-Yu, *et al.* Strip-loaded waveguide electro-optic modulator based on bonded organic-inorganic hybrid material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 569-572.  
张峰,李晓东,谭震宇,等.键合型有机/无机杂化材料加载条形波导电光调制器[J].*光子学报*, 2011, **40**(4): 569-572.

## Embedded Waveguide Thermo-optic Switch Based on Novel Organic-inorganic Hybrid Material

WANG Hui, ZHANG Feng, LIU Tian-ji, WANG Fei, SUN Xiao-qiang,  
CHEN Chang-ming, ZHANG Da-ming

*(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics; College of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130012, China)*

**Abstract:** A kind of novel organic-inorganic hybrid core layer material with good optical properties and high thermal stabilities was synthesized via sol-gel process. Epoxy-crosslinking can be realized in the hybrid material owing to the existence of organic flexible lateral chains in the molecules. Compared with the inorganic SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> system, this kind of material exhibited high thermal-optic coefficient (10<sup>-4</sup>/K) and excellent film characteristics. A kind of thermal curable resist P(MMA-GMA) was synthesized as the cladding material. The embedded waveguide thermo-optic switch of Mach-Zehnder type was designed and fabricated well. The insertion loss of the device is 10 dB, the driving power is 15 mW, the switching time is less than 1 ms and the extinction ratio is 15 dB.

**Key words:** Organic-inorganic hybrid material; Polymer; Embedded waveguide; Thermo-optic switch