

# 基于悬浮波导的低功耗聚合物热光开关

孙健<sup>1,2</sup>, 吴远大<sup>1</sup>, 安俊明<sup>1</sup>, 吴卫锋<sup>1</sup>, 单崇新<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>河南仕佳光子科技股份有限公司, 河南 鹤壁 458030;

<sup>2</sup>郑州大学物理学院, 河南 郑州 450001

**摘要** 设计制备了一种低功耗的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型聚合物热光开关器件,为降低开关的功耗,将器件加热区的调制臂波导设计成悬浮波导,从而抑制波导芯区处热量向硅衬底的扩散。模拟结果显示,相比于传统波导结构的热光开关,悬浮波导结构可以明显减少热扩散。利用半导体工艺成功制备了具有悬浮波导结构的热光开关器件,在 1550 nm 工作波长下,热光开关的功耗为 9.3 mW,消光比为 21 dB,开关的上升和下降时间分别为 392  $\mu$ s 和 697  $\mu$ s。

**关键词** 集成光学; 集成光学器件; 热光开关; 聚合物波导; 功耗; 消光比

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301008

## Polymer Thermo-Optic Switch with Low-Power Consumption Based on Suspended Waveguide

Sun Jian<sup>1,2</sup>, Wu Yuanda<sup>1</sup>, An Junming<sup>1</sup>, Wu Weifeng<sup>1</sup>, Shan Chongxin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Henan Shijia Photons Technology Co., Ltd., Hebi, Henan 458030, China;

<sup>2</sup>School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

**Abstract** A polymer Mach-Zehnder interferometer (MZI) thermo-optical (TO) switch with low-power consumption is designed and fabricated. To reduce the power consumption, a modulating arm waveguide in the heating region is designed as a suspended waveguide to reduce the heat diffusion. According to the simulation results, compared with a TO switch paired with a conventional waveguide, the suspended waveguide can significantly reduce heat diffusion. The TO switch based on suspended waveguide is fabricated by semiconductor technology. At a 1550-nm wavelength, the power consumption is about 9.3 mW and extinction ratio of the device is 21 dB. The rise and the fall times of the switch are 392  $\mu$ s and 697  $\mu$ s, respectively.

**Key words** integrated optics; integrated optics device; thermo-optic switch; polymer waveguide; power consumption; extinction ratio

**OCIS codes** 130.3120; 130.4815; 130.3130; 130.5460

## 1 引 言

作为光通信网络中的重要器件之一,光开关具有路由、光网络保护、光域优化等功能,是光交叉连接器(OXC)<sup>[1-3]</sup>和插分复用器(OADM)<sup>[4]</sup>的核心器件。光开关的种类较多,其中热光开关因尺寸小、功耗低、稳定性高等优点,受到了广泛的关注。

在热光开关的研究中,如何有效地降低功耗是研究者们重点关注的问题。制备热光开关的材料主要有硅/二氧化硅(SOI)、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)以及聚合

物等。其中聚合物材料具有较高的热光系数和较低的热传导系数<sup>[5]</sup>,利用其制备的热光开关具有较低的功耗,这使其成为近年来研究热光开关的热点材料。在聚合物热光开关的研究中,研究者们采用不同的聚合物材料以及波导结构制备了不同的热光开关。Chen 等<sup>[6]</sup>报道了一种垂直耦合结构的聚合物热光开关,功耗为 50 mW;王微等<sup>[7]</sup>使用甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸环氧丙酯类共聚物(PMMA-GMA)材料,制备了一种功耗为 16 mW 的热光开关;孙静雯等<sup>[8]</sup>采用具有高热光系数的 Norland 紫

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-10-10; 录用日期: 2019-10-28

\* E-mail: cxshan@sohu.com

外固化材料(NOA73),制备了一种功耗为 9.14 mW 的热光开关;Liu 等<sup>[9]</sup>报道了一种空气隔离槽方案,通过在调制臂波导处刻蚀空气隔离槽,有效地减少了波导横向的热量扩散,器件功耗降低到 3.4 mW。

本文提出了一种降低聚合物热光开关功耗的新方法,将器件调制臂波导设计成悬浮波导,不仅能抑制波导横向上热量的扩散,还能抑制波导内热量向硅衬底的扩散,使热量能有效集中在波导芯区处。利用半导体工艺成功制备了具有悬浮波导结构的热光开关,测试结果表明,所提方法可以有效降低器件功耗。

## 2 热光开关的设计和制备

本文设计的热光开关的结构如图 1 所示。器件的下包层为 SiO<sub>2</sub> 材料,在 1500 nm 波长下材料的折射率为 1.444;波导芯区和上包层分别选择聚合物材料 SU-8 和 PMMA,在 1500 nm 波长下材料的折射

率分别为 1.527 和 1.483;将金属铝电极作为开关的加热电极,开关的波导类型为 1×1 马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型。根据材料的折射率,设定波导芯区的宽度等于高度,获得了矩形波导 E<sub>00</sub><sup>y</sup>、E<sub>01</sub><sup>y</sup>、E<sub>10</sub><sup>y</sup> 以及 E<sub>11</sub><sup>y</sup> 模的模式有效折射率随波导尺寸的变化曲线,如图 2 所示。其中,E<sub>00</sub><sup>y</sup> 模为基模,其他模式为高阶模。为实现单模传输,将波导芯区尺寸定为 3 μm×3 μm;SiO<sub>2</sub> 和 PMMA 的厚度分别为 3 μm 和 5 μm;电极宽度为 7 μm,加热区调制臂长度为 1 cm。信号光从输入波导进入器件,经过第一个 Y 分支波导被分成两束强度、相位完全相同的光;两束光信号经过直波导调制区后,在第二个 Y 分支处发生干涉并合为一束光。用电极加热其中一个调制臂,就会导致该调制臂处波导的有效折射率变小,从而两个调制臂之间会形成相位差;当两个调制臂间的相位差为 π 时,在第二个 Y 分支处合束的两束光会发生相干减弱。

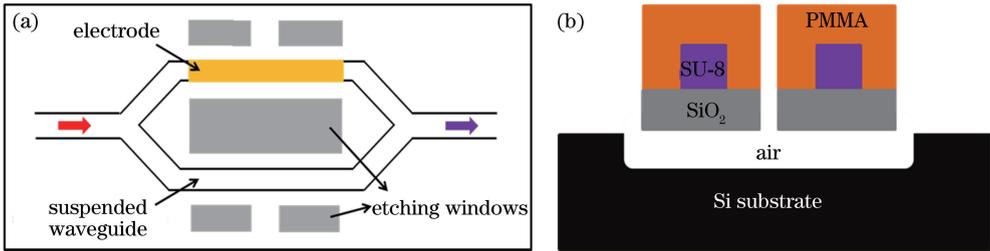


图 1 热光开关的结构示意图。(a)热光开关的俯视图;(b)悬浮波导的截面示意图

Fig. 1 Structure diagram of thermo-optic switch. (a) Top-view diagram of thermo-optic switch; (b) cross-section of the suspended waveguide

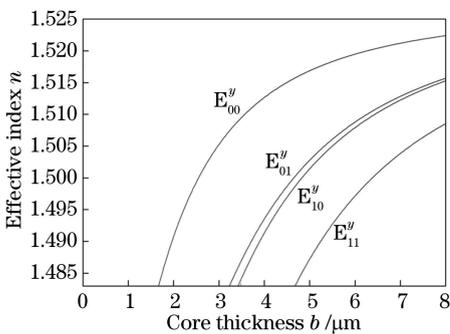


图 2 波导有效折射率  $n$  与波导尺寸  $b$  的关系

Fig. 2 Relations between the core thickness  $b$  and the effective refractive index  $n$  of the rectangle waveguide

在热光开关的工作模式中,有效地使热量集中在波导芯区附近并降低热扩散,是降低开关驱动功率的主要方法之一。对于本文设计的热光开关结构,聚合物波导材料以及 SiO<sub>2</sub> 的热传导系数分

别为 0.2 W/(m·K) 和 1.4 W/(m·K),而 Si 衬底的热传导系数高达 163 W/(m·K),Si 衬底的热传导系数过大将加剧波导芯区热量向衬底的扩散。因此,本文设计了一种具有悬浮波导结构的热光开关,通过分离波导结构与 Si 衬底来减少热量扩散,从而实现降低功耗的目的。在热光开关的调制臂波导附近制备刻蚀窗口,在刻蚀窗口位置通过干法刻蚀和湿法腐蚀的办法将调整臂波导与 Si 衬底分离,实现悬浮波导。悬浮波导通过刻蚀窗口之外的区域与器件整体连接,实现对悬浮波导的支撑。图 3(a) 和 3(b) 分别是传统波导结构和悬浮波导在 10 mW 加热功率下的热场分布模拟结果,Si 衬底的温度为 20.0 °C,加热电极处温度为 23.2 °C,可以看出,悬浮波导芯区处的温度更高,即利用悬浮波导有利于降低器件的功耗。

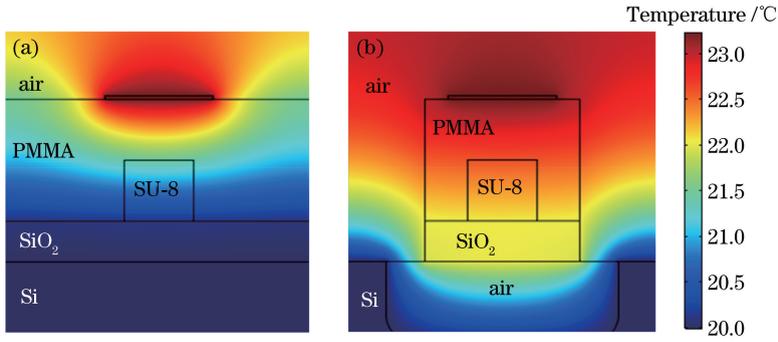


图 3 热光开关波导结构的热场分布。(a)传统波导结构;(b)悬浮波导结构

Fig. 3 Thermal field distribution of thermo-optic switch waveguides. (a) Conventional waveguide; (b) suspended waveguide

热光开关的制备过程如下:1)通过氧化工艺在 Si 衬底表面形成  $3\ \mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  下包层;2)在下包层表面旋涂 SU-8 光刻胶材料,旋涂后的样片在  $90\ ^\circ\text{C}$  下加热固化  $19\ \text{min}$ ,再使用波导掩模板对冷却后的样片进行紫外曝光,并在异丙醇溶液中显影  $35\ \text{s}$ ,得到  $3\ \mu\text{m}\times 3\ \mu\text{m}$  的矩形波导,之后在  $130\ ^\circ\text{C}$  下将样片坚膜  $20\ \text{min}$ ;3)在波导芯区表面旋涂 PMMA 材料,样片在  $120\ ^\circ\text{C}$  下加热固化  $2\ \text{h}$ ,形成上包层;4)在样片表面蒸镀金属铝,然后旋涂光刻胶并在  $95\ ^\circ\text{C}$  下固化  $20\ \text{min}$ ,通过掩模板对样片的加热调制区进行局部曝光,再通过显影在加热调制臂波导两侧形成刻蚀窗口;5)使用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀对调制臂区的刻蚀窗口进行局部刻蚀,将波导芯区两侧的包层 PMMA 和  $\text{SiO}_2$  刻蚀掉,形成隔离槽波导结构;6)当刻蚀窗口处的 PMMA 和  $\text{SiO}_2$  被刻蚀掉后,使用 ICP 刻蚀继续对裸露的 Si 衬底进行刻蚀,形成约  $20\ \mu\text{m}$  深的 Si 凹槽;6)将 NaOH 溶液导入刻蚀凹槽区域,对  $\text{SiO}_2$  层下面的 Si

衬底进行腐蚀,再将调制臂区域的波导与 Si 衬底分离,从而实现悬浮波导结构;7)去掉样片表面的金属铝和残余光刻胶,在样片表面再次旋涂光刻胶,使用电极掩模板对样片进行光刻套刻,利用显影将需要制备电极的图形区露出来,通过蒸镀金属铝和光刻胶剥离工艺,去掉电极图形以外的金属以及凹槽内的光刻胶,制备出金属电极,从而完成芯片的制备。在上述制备中,将波导结构与 Si 衬底分离从而实现悬浮波导是关键工艺。在实际制备中,由于溶液腐蚀浸泡,调制臂处的聚合物波导与  $\text{SiO}_2$  容易发生分离。为解决这个问题:一方面增加了刻蚀 Si 凹槽步骤,从而减少去除 Si 材料所需要的溶液浸泡时间;另一方面优化 NaOH 溶液的浓度和温度,在保证聚合物波导不发生脱落分裂的前提下,加快 Si 腐蚀速率。图 4(a)所示为传统波导结构的扫描电子显微镜(SEM)照片;图 4(b)所示为悬浮波导结构的 SEM 照片,在调制臂区域实现了波导与 Si 衬底的分离。

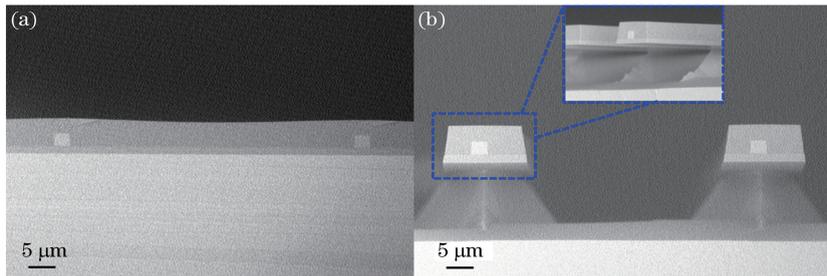


图 4 热光开关波导截面的 SEM 照片。(a)传统波导;(b)悬浮波导

Fig. 4 SEM images of the cross-section of thermo-optic switch waveguides.

(a) Conventional waveguide; (b) suspended waveguide

### 3 热光开关的测试

可调谐激光器输出的  $0.2\ \text{mW}$ 、 $1550\ \text{nm}$  的信号光通过单模光纤耦合进入光开关的输入端;信号光

经波导传输之后,在器件的输出端输出,被红外摄像机接收,并在监视器显示输出光斑,光开关的输出光斑如图 5 所示,结果显示光开关器件的通光情况良好。光开关的输出端经单模光纤连接到光功率计,

在输入光功率为 1 mW(0 dBm)情况下,测得器件的插入损耗为 9.5 dB。

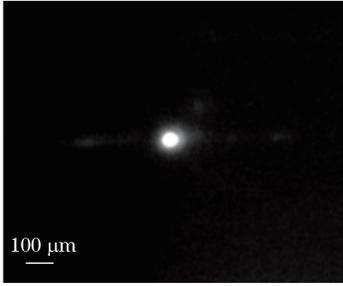


图 5 热光开关的输出光斑

Fig. 5 Output pattern of thermo-optic switch

通过探针将直流电信号施加到加热电极上,器件输出光功率随驱动功率的变化曲线如图 6 所示。当驱动功率为 0 mW 时,悬浮波导结构光开关的输出光功率是 -9.5 dBm,器件处于开状态;当驱动功率增大到 9.3 mW 时,输出光功率降到最小值 -30.5 dBm,器件处于关状态。由此可知,悬浮波导结构光开关的消光比为 21.0 dB,功耗为 9.3 mW。作为对比,本研究同样制备了传统波导结构的光开关,并在相同条件下进行了测试,得到传统波导结构光开关的消光比为 22.1 dB,功耗为 13.9 mW。悬浮波导结构光开关的功耗比常规波导结构的功耗小 4.6 mW。表 1 将本文制备的热光开关与文献中报道的热光开关进行了对比。和文献中报道的低功耗聚合物热光开关相比,本文制备的热光开关的功耗略大,分析原因主要是在本文光开关器件的波导结构中,上包层的厚度比文献中器件的上包层要厚。文献中报道的热光开关的上包层厚度只有 2.5 μm,

表 1 不同结构热光开关的功耗对比

Table 1 Comparison of power consumption among thermo-optic switches with different structures

Reference	Structure	Wavelength /nm	Thickness of upper cladding /μm	Power consumption /mW
Ref. [9]	Polymer/silica with air trench	1550	2.5	3.4
This work	Polymer/silica	1550	5.0	13.9
	Polymer/silica with suspended waveguide	1550	5.0	9.3

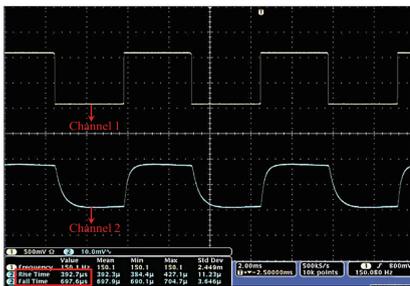


图 7 热光开关的开关响应曲线

Fig. 7 Switch response curves of thermo-optic switch

本文器件的上包层厚度为 5 μm。而在器件截面的热场分布中,从电极到波导芯区,温度是呈梯度降低的,上包层越薄,波导芯区距离加热电极越近,电极产生的热量就能更大限度地施加到波导芯区,从而实现低功耗。本文目前只验证了对于相同材料和相同波导尺寸的热光开关,悬浮波导结构可以有效地降低功耗。

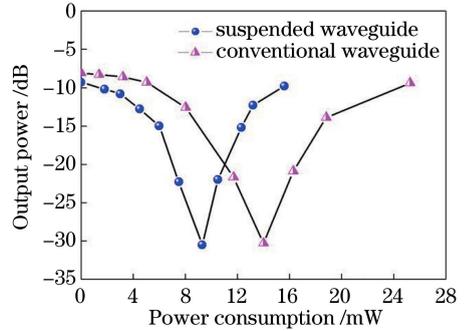


图 6 不同波导结构的光开关输出光功率与驱动功率的关系曲线

Fig. 6 Output optical power of thermo-optic switches with different waveguide versus electrical heating power

频率为 150 Hz 的方波信号通过探针加载到电极上,通过示波器测得的器件响应如图 7 所示。图 7 上方 Channel 1 波形是函数信号发生器产生的方波信号,下方 Channel 2 波形是光开关的响应波形。根据测量可知,开关响应的上升时间和下降时间分别为 392 μs 和 697 μs。而传统结构的光开关,其开关响应的上升时间和下降时间分别为 178 μs 和 228 μs。这表明对于悬浮波导结构的热光开关,在功耗降低的同时,开关的响应也会变慢。

## 4 结 论

本文使用 SU-8 和 PMMA 聚合物材料,设计制备了一种低功耗的 MZI 型热光开关器件。为了降低开关的功耗,本文将调制臂波导设计成一种悬浮波导,将波导结构与 Si 衬底分离,抑制了波导芯区处热量向硅衬底的扩散。并利用半导体工艺,成功制备出具有悬浮波导结构的热光开关。测试结果表明:在 1550 nm 波长下,该热光开关的功耗为

9.3 mW, 消光比为 21 dB, 开关的上升和下降时间分别为 392  $\mu\text{s}$  和 697  $\mu\text{s}$ ; 使用相同材料制备的传统波导结构的热光开关的功耗增大到 13.9 mW。本文提出的这种悬浮波导结构可以有效地降低热光开关的功耗。

## 参 考 文 献

- [1] Ramaswami R, Sivarajan K N. Optical networks: a practical perspective [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1998: 186-195.
- [2] de Dobbelaere P, Falta K, Gloeckner S, et al. Digital MEMS for optical switching [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(3): 88-95.
- [3] Lin L Y, Goldstein E L, Lunardi L M. Integrated signal monitoring and connection verification in MEMS optical crossconnects [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 885-887.
- [4] Shibata T, Okuno M, Goh T, et al. Silica-based waveguide-type  $16 \times 16$  optical switch module incorporating driving circuits [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1300-1302.
- [5] 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.
- [6] Chen K X, Chu P L, Chan H P. A vertically coupled polymer optical waveguide switch [J]. Optics Communications, 2005, 244: 153-158.
- [7] Wang W, Sun X Q, Wang X B, 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.
- [8] Sun J W, Sun J, Wang Y S, et al. Polymeric MZI thermo-optic switch with low power consumption [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0706001.  
孙静雯, 孙健, 王艳双, 等. 低功耗聚合物 MZI 结构热光开关研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0706001.
- [9] Liu Y F, Wang X B, Sun J W, et al. Improved performance of thermal-optic switch using polymer/silica hybrid and air trench waveguide structures [J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 1888-1891.