

# 聚合物热光相移器件的研究及其应用<sup>\*</sup>

杨晓红<sup>1</sup> 杜 云<sup>1</sup> 吴荣汉<sup>1</sup> 赵榆霞<sup>2</sup> 李 兆<sup>2</sup> 周家云<sup>2</sup> 沈玉全<sup>2</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

(2 中国科学院感光化学研究所, 北京 100101)

**摘要:** 利用聚合物材料研制出热光 Mach-Zehnder(MZ)型干涉调制器, 单位相移为  $1.53\pi/(cm \cdot ^\circ C)$ , 产生  $\pi$  相移所需功率为  $12mW$ . 热光开关的响应时间为  $1.2ms$ , 消光比为  $16dB$ , 接近实用水平. 并且讨论了热光相移在多种光电子器件中的应用.

**关键词:** 热光相移; 聚合物波导; Mach-Zehnder 干涉型调制

**EEACC:** 0560; 2830C; 1310; 6240D

中图分类号: TN814<sup>+</sup>. 6

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)01-0087-04

## 1 引言

目前, 聚合物光波导及器件在光电子和光互联领域引起了广泛的兴趣. 聚合物材料可以在任何材料的衬底上大面积旋涂成型, 不需要高温处理, 易于波导器件制备. 其中热光聚合物以大的热光系数和较小的热导率在热光相移方面具备优越的性能. 所谓的热光特性指聚合物材料随温度的升高而出现的折射率的减小. 一般聚合物的热光系数  $\frac{\partial n}{\partial T}$  在  $-1 \times 10^{-4} \sim -3 \times 10^{-4}/^\circ C$  之间, 是二氧化硅材料的十倍. 固化温度一般在  $300^\circ C$  以下, 工作温度可以达到  $100^\circ C$  左右. 聚合物的热光特性可以应用在模拟/数字光开关<sup>[1,2]</sup> 和可调节波导阵列光栅(AWG)复用/解复用器<sup>[3,4]</sup> 等多种光波导器件中.

本文运用聚合物热光效应研制出脊波导型 Mach-Zehnder(MZ)干涉器, 对其时间响应、消耗功率、消光系数等特性进行了测定, 并对其在衰减器、滤波器、可调 AWG 等方面的实际应用进行了讨论.

## 2 MZ 型热光相移器件的原理设计

对于如图 1 所示的 MZ 型热光干涉器件, 要求

波导为单模波导, 波导外形尺寸如图中所示, 单模波导结构和文献[5]中的脊波导结构相同. 器件的工作原理、单位相移量和  $\pi$  相移动功率的理论计算将在下面给出.

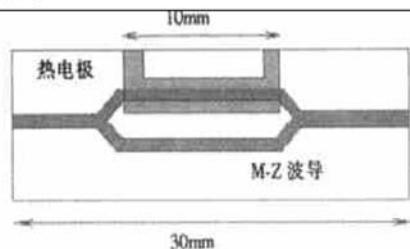


图 1 热光 Mach-Zehnder 调制器的示意图

Fig. 1 TO Mach-Zehnder modulator configuration

波导中波导层和限制层的折射率分布以及波导的结构尺寸共同决定了波导中光的传播常数  $\beta$ . 当某一段长度为  $l$  的波导由于折射率的改变而使传播常数有一个变化  $\Delta\beta$  时, 那么在此段波导的出射端导波光的相位有一个移动,

$$\Delta\varphi = \Delta\beta l = k_0 \Delta N_{eff} l \quad (1)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  为真空传播常数,  $\lambda_0$  为真空波长;  $\Delta N_{eff}$  为波导有效折射率的变化. 若取  $\Delta N_{eff}$  近似等于材料折射率的变化  $\Delta n$ , 则有

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n l \quad (2)$$

\* 国家“八六三”高技术计划资助项目(项目号: 715-002-0030)

杨晓红 女, 1973 年出生, 博士研究生, 从事聚合物光波导器件和半导体器件的研究.

2001-03-15 收到, 2001-06-22 定稿

假设芯层和包层的热光系数相同, 具有相同的折射率变化,  $\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_w$ , 其中  $\Delta T_w$  为波导温度的变化.

MZ 干涉器中容易观察到两臂之间相位差对光强的影响. 在如图 1 所示的 MZ 型波导结构中, Y 分支波导将光分为两束功率相等的光. 在两平行波导上施加不同的热源, 由于聚合物材料在热场下折射率的变化, 导致传播常数和相位的变化. 当两束光通过 Y 分支波导合并时, 两臂之间的光的相位差为  $\Delta\Phi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2$ . 二者相干得到的光强为

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2}{2}\right) = I_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (3)$$

当只在其中一个波导臂上施加电流, 即单臂调制时,  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \times \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T_w l$ . 在半波调制, 即干涉光强为零时,  $\Delta\Phi = \pi$ , 此时波导需要升高的温度为

$$\Delta T_w(T) = \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|^{-1} \frac{\lambda_0}{2l} \quad (4)$$

当热电极的作用长度为 1cm, 热光系数  $\frac{\partial n}{\partial T}$  取  $-10^{-4}/^\circ\text{C}$  时,  $1.3\mu\text{m}$  光波导达到  $\pi$  相移需要的温度约为  $0.6^\circ\text{C}$ . 定义单位相移量为单位长度(cm)单位温升( $^\circ\text{C}$ )的波导的热光相移, 则此情况下的聚合物波导的单位相移为  $1.53\pi$ , 与硅波导近似, 比  $\text{SiO}_2$  要高一个量级.

当功率为  $P$  的信号加载到热电极上时, 热能主要通过波导扩散到 Si 或 GaAs 衬底. 热电极的温升和所施加功率的关系可以近似写为<sup>[6]</sup>:

$$\Delta T_h = \frac{Pt_w}{L_h W_h k_w (1 + 0.88 \frac{t_w}{W_h})} \quad (5)$$

其中  $k_w$  为波导的热导率;  $t_w$  为波导的总厚度;  $L_h$  为电极的长度;  $W_h$  为电极宽度. 假设衬底的热导率  $k_s \gg k_w$ , 即衬底的温度始终不变, 根据线性传导规律和波导芯层处的温升为  $\Delta T_w = \frac{1}{2} \Delta T_h$ , 将  $k_w = 0.17\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $t_w = 10\mu\text{m}$ ,  $L_h = 10\text{mm}$ ,  $W_h = 30\mu\text{m}$ ,  $\Delta T_w = 0.6^\circ\text{C}$  代入上式, 则达到  $\pi$  相移需要的电流功率为  $8\text{mW}$ .

### 3 波导型 MZ 干涉器的制备

对用于调制的波导型干涉器件, 单模光波导是最关键的部分. 最初的光波导利用聚合物材料的光化学作用进行金属掩模和紫外照射, 这种波导结构

的稳定性较差. 目前单模波导一般采用干法刻蚀的矩形波导或脊波导结构, 此方法用普通光刻胶掩模和氧反应离子刻蚀即可完成任务, 且波导稳定性很好.

用于波导制备的聚合物材料需满足波导层之间的折射率匹配和固化中的热力学稳定性的匹配, 即不龟裂不起皮; 还应满足可加工性的要求, 固化后的聚合物与加工过程中的光刻胶、显影液以及电极制备过程中的电极腐蚀液不发生反应.

光波导的具体制备过程如图 2 所示, 在下包层旋涂后固化, 旋涂芯层后固化, 在完全固化的芯层上用光刻胶掩模, 然后反应离子刻出脊型波导, 去掉光刻胶后旋涂、固化上包层. 刻蚀的波导截面的 SEM 图中清晰地显示了脊型的台面<sup>[5]</sup>, 刻蚀速率为  $40\text{nm}/\text{min}$ . 最终的波导和电极结构如图 2(e) 所示. 电极为溅射的 Cr 和 Au, 然后电镀金增加电极的牢固性. 电镀之后热电极的电阻约为  $20\Omega$ .

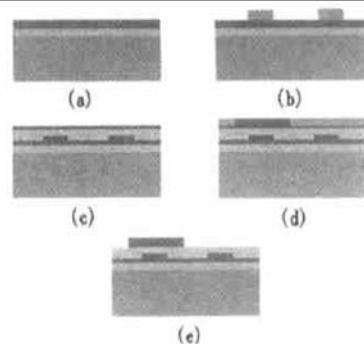


图 2 器件的工艺制备过程 (a) 旋涂下包层和芯层; (b) 芯层的掩模和刻蚀; (c) 旋涂上包层并溅射热电极; (d) 电极掩模和电镀; (e) 原型器件的截面图

Fig. 2 Devices processing

### 4 聚合物波导及其热光特性的测试

通过波导输出的近场图可以看到波导具有很好的单模特性. 将器件从中间截断, 测试从两 Y 分支的双波导输出情况, 可以得到 MZ 的两臂光强基本相等的近场图.

器件的热光特性主要包括产生  $\pi$  相移需要施加的功率、电流、电压、 $\pi$  相移时的消光比以及器件的时间响应等. 我们具体采用了单臂调制的器件结构. 理论上, 当施加电流(或功率)使得波导的温度线性增加时, 根据(4) 式相移线性增加, 得到的输出光强将呈周期性变化. 一般以锯齿信号作为功率源来测

试 $\pi$ 相移点的功率、电压,以方波信号测试波导的热光响应时间。

器件的具体测试结果如下:从波导在锯齿波信号下的热光响应,得到 $\pi$ 相移所需施加电压为0.5V,所需功率为12mW。实际所需功率比理论值8mW稍大,这是因为热电极的热扩散是向四周的,向空气的扩散减小了向波导的热量传输。从图3可以看到器件作为热光开关时的响应时间为1.2ms,这相对其他结果而言是一个很快的响应,这主要与波导的总厚度有关。

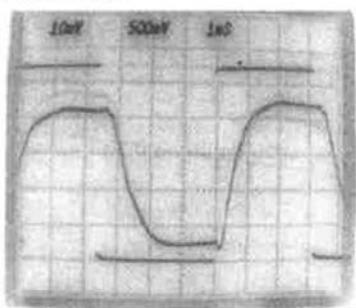


图3 热光开关的时间响应

Fig. 3 Response time of the switch

MZ式结构中当存在两臂之间的 $\pi$ 相差时,理论上调制深度可达到100%。由于Y结在工艺中产生的不对称和缺陷,实际上的调制深度可到90%以上。图4为 $\pi$ 相移时调制输出的近场图结果,用功率计测试消光比为16dB。

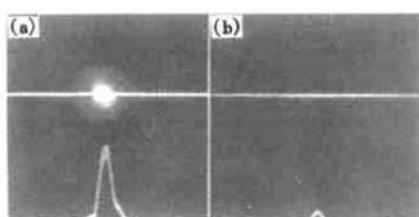


图4 调制输出的近场图开关对比 (a)无热调制时近场输出; (b)达到 $\pi$ 相移时的近场输出

Fig. 4 Near field graphs of on and off status

## 5 热光相移的几种应用分析

### 5.1 可调节光衰减器

在0~ $\pi$ 相移点之间,光强是一个从最大到最小的非线性变化过程,每一个光强点都有一个功率点与之对应。应用这一特点可以设计成可调节光衰减

器。在波分复用系统中,掺铒光纤放大器的普遍应用,使每一通道光信号的强度无法完全相同,这时均衡每一通道的光强成为必然。聚合物的波导可以较容易地实现平面地集成,从而在光的通路中实现多通道的均衡。

### 5.2 滤波器

对于不同波长在相同的调制功率下有不同的相差,当 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的波长的相差分别为 $(2n+1)\pi$ 和 $2n\pi$ 时, $1.3\mu\text{m}$ 的波长的光干涉相消为0而 $1.55\mu\text{m}$ 的光无障碍通过,达到了波长选择的作用。根据(4)式,可以得到波长分离所需的最小温度为

$$\Delta T = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \right]^{-1} \frac{1}{l} \quad (6)$$

当 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ ,取材料的热光系数为 $-10^{-4}/^\circ\text{C}$ , $\Delta T$ 为 $8^\circ\text{C}$ 。这个温升对聚合物而言是完全可以接受的。此滤波器可以作为一种宽带滤波的选择。

### 5.3 可调节AWG波分复用/解复用器

目前世界范围内很多有名的研究组都在进行聚合材料的AWG研究,如日本的NTT<sup>[1]</sup>、加拿大的CRC<sup>[5]</sup>、德国的HHI等。因为聚合物材料易于制备且偏振不敏感,有着很优越的应用前景。但由于制作过程中的偏差容易产生某些通道波长的偏移和串话。用聚合物的热光特性很容易调节各通道波导的有效光程,从而调节输出波长的准确性。

## 6 小结

制备完成了脊波导聚合物MZ型热光调制器,器件波导的单模特性良好,调制 $\pi$ 相移所需功率为12mW,电压为0.5V,消光比为16dB,接近实用水平。为热光相移在MZ型可调节光衰减器、光开关、波长选择器,以及可调节阵列波导光栅波分复用/解复用器中的具体应用提供了依据。

## 参考文献

- [1] Watanabe T, Ooba N, Hayashida S. Polymer optical waveguide circuits formed using silicone resin. IEEE J Lightwave Technol, 1998, 16(6): 1049
- [2] Yoshimura R, Hikita M, Tomaru S, et al. Low loss polymer

- optical waveguide fabrication with deuterated polyfluoromethacrylate. *IEEE J Lightwave Technol*, 1998, 16: 1030
- [ 3 ] Watanabe T, Inoue Y, Kaneko A, et al. Polymeric arrayed-waveguide grating mutiplexer with wide tuning range. *Electron Lett*, 1997, 33(18): 1547
- [ 4 ] Robitaille L, Callender C L, Noad J P. Polymer waveguide devices for WDM applications. *SPIE*, 1998, 3281: 14
- [ 5 ] Yang Xiaohong, Du Yun, Wu Ronghan, et al. Ridge waveguide electro-optic polymer modulator with a new kind of corona poled crosslinkable polyurethane. *Chinese Journal Semiconductors*, 2001, 22: 130
- [ 6 ] Hida Y, Onose H, Imamura S. Polymer waveguide thermo-optic switch with low electric power consumption at  $1.3\mu\text{m}$ . *IEEE Photo Tech Lett*, 1993, 5(7): 782

## Polymer Thermo optic Phase Shifter and Its Applications<sup>\*</sup>

Yang Xiaohong<sup>1</sup>, Du Yun<sup>1</sup>, Wu Ronghan<sup>1</sup>, Zhao Yuxia<sup>2</sup>, Li Zhao<sup>2</sup>, Zhou Jiayun<sup>2</sup> and Shen Yuquan<sup>2</sup>

(1 National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,

The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Institute of Photographic Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** A kind of polymer thermo optic(TO) phase shifter of Mach-Zehnder configuration is developed. The theory, processing and testing results are given. Power of 12mW is needed for the  $\pi$  shift of the light wave. The response time of the TO switch is 1.2ms, and the extinction ratio is 16dB. Some designs for the potential applications of the phase shifter are also given.

**Key words:** TO phase shift; polymer waveguide; Mach-Zehnder interferometer modulation

**EEACC:** 0560; 2830C; 1310; 6240D

**Article ID:** 0253-4177(2002)01-0087-04

\* Project supported by National High Technology Research and Development(863) Program (No. 715-002-0030)

Yang Xiaohong female, was born in 1973. She is engaged in the research on polymer waveguide devices and semiconductor devices.

Received 15 March 2001, revised manuscript received 22 June 2001

© 2002 The Chinese Institute of Electronics