

聚合物绝热分叉型数字热光开关*

梁 琨¹ 陈 旺¹ 吴伯瑜^{1,†} 罗淑云¹ 殷建军² 叶 钢²

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(清华大学化学工程系, 北京 100084)

摘要: 利用有机聚合物材料的电光效应和热光效应研究并制作 2×2 绝热分叉波导数字型光开关, 采用光纤直接耦合方法测量了器件在 $1.31\mu\text{m}$ 红外光通信波段的数字开关特性.

关键词: 有机聚合物; 光波导器件; 数字光开关; Y 分叉

EEACC: 0560; 1240; 1250

中图分类号: TN256 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2006)04-0747-04

1 引言

光开关及其阵列是重要的光电子与集成光学器件, 作为光交叉连接的核心, 其性能的优劣直接影响到整个光交换网络性能的好坏. 因此, 研究开发高性能、低成本的光开关及阵列以适应相应的光纤通信系统的需要, 有着重要的现实意义.

聚合物是功能强大的光电子材料, 可以通过分子设计与合成获得所需的线性与非线性光学系数, 同时具有电光、热光、光放大等性质, 可以灵活地制备出各种功能的器件. 电光聚合物材料由于微波介电常数低, 易与光波相速匹配, 在高频调制器中具有非常广泛的潜在应用价值^[1]. 聚合物的热光系数 ($10^{-4}/^\circ\text{C}$) 比 SiO_2 材料大一个数量级, 导热系数较小, 虽然响应时间较长, 一般为毫秒量级, 不适于高速光网络中的应用, 但是聚合物在制作开关方面具有降低功耗和成本的优势, 因此聚合物热光开关及阵列的研究备受关注^[2-5].

本文研究的聚合物电/热光效应数字光开关, 是利用模式重组来实现开关动作, 即通过折射率控制光的走向: 当绝热型 Y 分叉的两分支臂波导中光的有效折射率存在一定的差异时, 从输入端口输入的光波将主要传向有效折射率大的分支臂. 数字光开关虽然驱动功率较干涉型器件要大, 但是其开关特性具有“双稳态”特点, 只要端口加电/热到一定数值, 就能保持开或者关的状态. 这种开关特性有利于器件驱动电路的设计, 无需精确的驱动功率控制电路, 而且对波长和偏振不敏感, 器件的制作容差也比较大.

2 器件设计

设计的 2×2 绝热分叉波导数字光开关如图 1 所示, 每组分支臂上都覆有不同长度的铬金作为电光效应开关电极, 同时又组合成宽为 $15\mu\text{m}$, 长分别为 7.6mm (a, b), 7.7mm (c, d) 以及 8.7mm (e, f), 8.7mm (f, g) 的铬金电极作为加热器的热光效应开关. 以热光开关为例, 不加热时, 光波从端口 4 或者 5 输入, 在 X 分支的 Y 分叉处平均分配功率, 分别从端口 4 和 5 输出. 利用聚合物材料的热光效应, 使得相应的 Y 分支臂处的温度上升, 波导的有效折射率下降, 从输入端口输入的光波能量将聚向另一分支臂输出. 因此, 通过控制两个分支臂上的加热器, 便可以控制光的两个输出端口的输出, 实现光开关.

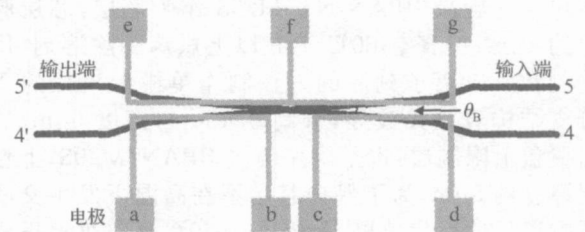


图 1 2×2 X 分支数字光开关

Fig. 1 Schematic diagrams of 2×2 X branch digital optical switch

设计数字光开关的分支角十分关键, 只有当分支角足够小, 其模式分离原则才能被严格遵守, 上述

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA313130) 及清华大学基础研究基金(批准号: J Z200005) 资助项目

† 通信作者. Email: wby@tsinghua.edu.cn

2005-09-01 收到, 2005-10-26 定稿

开关特性才能被实现. 若分支角取得过大, 波导传播方向上的折射率变化所引入的光波模式变换加强, 会使其模式分离原则作用逐渐失效, 光开关的串音上升. 为了实现具有良好串音特性的光开关, 分支角 θ_B 必须满足以下条件^[6]:

$$\theta_B \ll \lambda / d$$

式中 d 为 Y 分叉后的两臂已分离得相当远时, 两臂(加热臂与未加热臂)的纵向传播常数之差; λ 为光波电场在两臂之间包层中的横向传播常数, 即在包层中的横向衰减常数. 因此, 如要求开关热功率越小, 则要求 θ_B 越小. 我们所设计 X 绝热波导的分支角为 0.08° , 考虑输出端口间应有足够间距(选为 $52\mu\text{m}$), 和为使器件尺寸不至于太大, 选用在离 X 交叉点约 7mm 处每根光波导再拐 0.5° 的 Y 分支, 如图 1 所示.

3 器件制作

Si 材料成本低、工艺成熟, 具有低的热光系数和高的导热系数, 而且较容易解理, 非常适合作为聚合物光电器件的衬底. 我们在 Si 衬底上制备了 2×2 绝热分叉聚合物波导数字光开关. 采用的是清华大学化工系研制的有自主知识产权的聚合物材料, 芯层是异氰酸酯交联的环氧树脂基二阶非线性光学聚合物 BPAN-NT/M20S, 包层是异氰酸酯交联的环氧类聚合物 BPAN/M20S. 光波导为常用的脊型光波导.

首先应在清洁干燥的基片表面溅射 Cr-Au 下电极, 溅射铬是为了使金附着更牢. 在电极上旋涂包层, 为了得到厚度 $5\mu\text{m}$ 的下包层, 需要旋涂两次, 每层分别经 170°C 烘烤 13min 交联固化; 在固化好的下包层上旋涂 BPAN-NT/M20S 作为芯层, 芯层膜厚约 $1\mu\text{m}$, 经真空 60°C 12h 以上烘烤驱除溶剂, 用光刻和反应离子刻蚀的方法制作单模低损耗的 X 分支结构脊型光波导, 脊高 $0.45\mu\text{m}$, 宽度 $6\mu\text{m}$; 然后覆盖上限制层, 也是旋涂两次 BPAN/M20S, 上包层厚度约 $5\mu\text{m}$. 为了保护芯层不在高温下发生交联影响以后的极化效果, 上包层在 60°C 真空烘箱里固化. 最后聚合物膜总厚度大约 $11\mu\text{m}$. 因为设计的数字光开关既可以测量热光效应也可以测量电光效应, 将聚合物在 170°C 电晕极化, 极化时间 30min , 极化电压 $8 \sim 9\text{kV}$. 最后在聚合物膜上溅射 20nm 厚的铬和 150nm 厚的金, 进行电极图形与波导位置精确对准的套刻, 腐蚀掉多余铬金后制成可用于电光及热光测试的器件上电极. 解理好芯片, 形成较平整的聚合物光波导输入和输出端口. 图 2 是聚合物光波导器件剖面示意图.

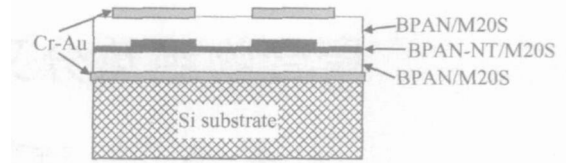


图 2 聚合物光波导器件剖面示意图

Fig. 2 Cross-section of polymer optical waveguide device

4 测试结果与讨论

我们采用光纤直接耦合方法测量聚合物波导数字开关在红外光通信波段的性能. 波长为 $1.3\mu\text{m}$ (或 $1.55\mu\text{m}$) 的激光束经由单模光纤直接对准器件耦合输入波导, 器件尾端输出波导的光束经透镜聚焦成像于红外摄像机的接收端面并显示在监视器和示波器上, 也可以用光纤耦合输出到光功率计. 在被测器件之前加入光纤偏振控制器调节入射光的偏振方向, 器件之后可以加入检偏器检查输出光的偏振方向.

图 3 是 2×2 数字光开关在 $\lambda = 1317\text{nm}$, TM 模、端口 4 为光输入口时, 下分支波导臂上两个电极

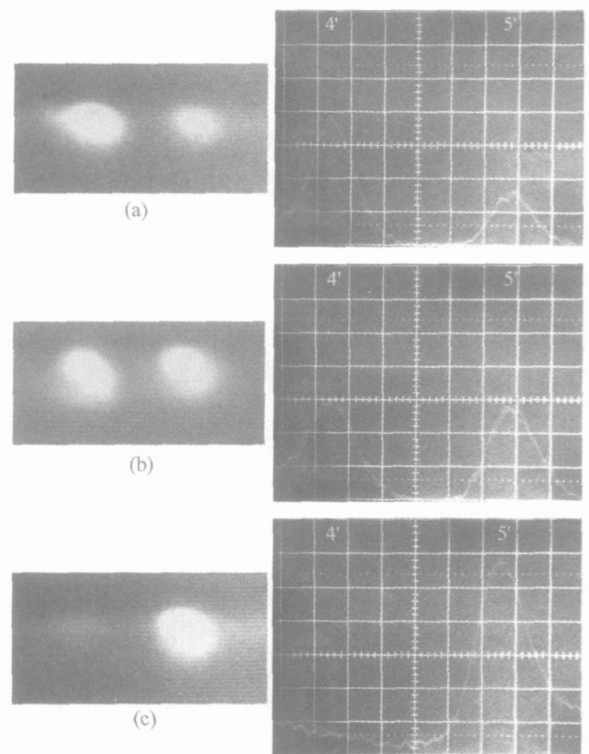


图 3 不同热功率下的 2×2 绝热分叉波导热光开关的输出及近场光斑 $\lambda = 1317\text{nm}$, TM 模, 端口 4 输入, 加热电极 (a, b) (a) $P_{\text{热}} = 0$; (b) $P_{\text{热}} = 135\text{mW}$; (c) $P_{\text{热}} = 29\text{mW}$

Fig. 3 Output of 2×2 X branch digital optical switch varying with the heating power

间(a, b 电阻) 通电流加热时, 光开关的两个输出端口 4 和 5 的近场光斑与示波器上光功率随加热功率的变化. 图 3(a) $P_{热} = 0$ 不加热时, 光波从端口 4 输入, 端口 4 与输入波导的耦合比端口 5 强, 光场大部分从端口 4 输出. 功率不平均可能有以下原因: 分支角非常小, 对工艺精度要求很高, 光刻时如果在分支处形成楔形, 将会影响功率分配及其他器件性能; 材料本身缺陷造成波导各部分损耗不同; 器件解理面不理想导致端面不一致. 图 3(b) $P_{热} = 13.5\text{mW}$, 对与端口 4 相连的波导分支臂加热使该波导折射率变小, 与端口 5 相连的分支波导的模折射率与输入波导更加匹配, 光场开始转向端口 5 输出, 同时端口 4 由亮变暗; 图 3(c) $P_{热} = 29\text{mW}$, 4 峰降为零, 5 峰升到最高. 器件串音约为 21.2dB. 由

于端口 5 的加热电极受损, 因此无法达到端口 4 完全导通, 开关的消光比小于 -19dB.

图 4 为工作波长 1317nm 时光开关在加热功率变化下的开关特性曲线. 图 4(a) 为 TM 模式, 对端口 4 加热直至 $P_{热} = 185\text{mW}$, 端口 4 始终保持关断状态, 这是典型的数字开关特性. 图 4(b) 为 TE 模式, 随着对端口 4 加热功率增加, 端口 4 在 $P_{热} = 50\text{mW}$ 时开始出现关断状态, 在 $P_{热} = 295\text{mW}$ 时器件串音约为 -25.3dB, 消光比小于 -26dB. TE 模式下开关特性出现了幅度较小的振荡, 是因为其中一段加热电极同时覆盖了部分分叉波导, 而分叉角很小时两根波导的间距只有 $1 \sim 2\mu\text{m}$, 因此出现类似定向耦合器的光输出调制.

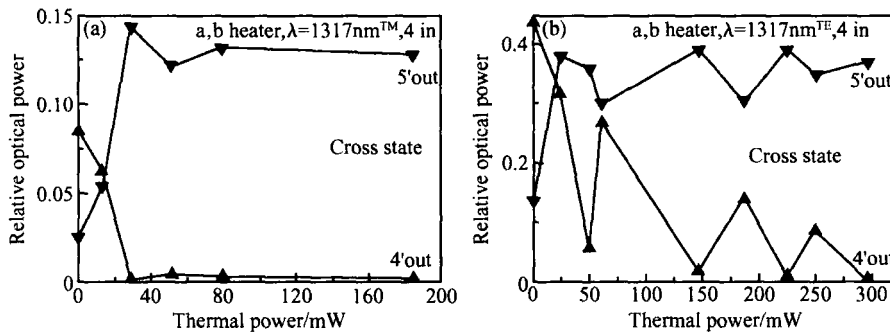


图 4 热光效应数字光开关特性曲线 = 1317nm (a) TM 模式; (b) TE 模式

Fig. 4 Switching property of 2 × 2 X branch digital optical thermal-optical switch (a) TM mode; (b) TE mode

我们看到, 随着加热功率增大, 开关串扰减小, 但是损耗增大了. 由于制作开关采用的芯层材料是二阶非线性光学聚合物, 高的生色团浓度不可避免地引入了较大的吸收损耗和散射损耗, 还有极化引入额外损耗, 波导与单模光纤间模式失配以及光纤与器件的耦合损耗等, 使得器件的插入损耗比较大. 测试结果表明, 长度为 3cm 的芯片, 器件的插入损耗约是 18.6dB. 另外, 器件对 TM 模损耗高于 TE 模损耗, 偏振相关损耗平均值 1.5 ~ 2dB 的问题, 有待进一步研究.

采用同样方法测量了聚合物绝热分叉型波导开关的电光效应, 得到输出端口 5 的光功率随着下分支波导臂上的电极(a, b)所加电压升高而明显减小. 由于目前聚合物芯层材料电光系数较小, 故未测得全关的电光开关效应.

5 结论

研究和制作了 2 × 2 X 分支聚合物电/热光数字开关. 利用热光效应的开关, 在 $\lambda_0 = 1317\text{nm}$, TM

模, $P_{热} = 29\text{mW}$ 时, 开关串音约 -21.2dB, 消光比小于 -19dB; 在 $\lambda = 1317\text{nm}$, TE 模, $P_{热} = 295\text{mW}$ 时, 开关串音约 -25.3dB, 消光比小于 -26dB, 开关响应时间为 ms 量级.

参考文献

- [1] Shi Y Q, Lin W P, Steier W H, et al. Electro-optic polymer modulators with 0.8V half-wave voltage. Appl Phys Lett, 2000, 77: 1
- [2] Brauer A, Darmberg P. Polymers for passive and switching waveguide components for optical communications. Proc SPIE, 1997, CR63: 334
- [3] Moosburger R, Petermann K. 4 × 4 digital optical matrix switch using polymeric oversized rib waveguides. IEEE Photonics Technol Lett, 1998, 10(5): 684
- [4] Guiziou L, Ferm P, Jouanno J M. Low-loss and high extinction ratio 4 × 4 polymer thermo-optical switch. ECOC2001, TuL1. 4, 1: 84
- [5] Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui, et al. Study of 1 × 2 total-internal-reflection thermo-optic polymeric switches. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(7): 741 (in Chinese) [杨建义, 江晓清, 杨方辉, 等. 1 × 2 全内反射型有机聚合物热光开关的研制. 半导体学报, 2002, 23(7): 741]

- [6] Burns W K, Milton A F. Mode conversion in planar dielectric separating waveguides. *IEEE J Quantum Electron*, 1975, 11(1) :32

Polymeric Thermo-Optic Digital Optical Switches^{*}

Liang Kun¹, Chen Wang¹, Wu Boyu^{1,†}, Luo Shuyun¹, Yin Jianjun², and Ye Gang²

(1 *Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(2 *Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The organic polymeric 2 × 2 digital optical switches taking advantages of the electro-optic and the thermo-optic effects are studied and fabricated. At a 1.31 μm optical communication wavelength, the typical digital behavior of the thermo-optic polymeric switch is demonstrated.

Key words: organic polymer; optical waveguide device; digital optical switch; Y branch

EEACC: 0560; 1240; 1250

Article ID: 0253-4177(2006)04-0747-04

^{*}Project supported by the Basic Research Foundation of Tsinghua University (No. JZ200005) and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA313130)

[†]Corresponding author. Email: wby@tsinghua.edu.cn

Received 1 September 2005, revised manuscript received 26 October 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics