

聚合物 2×2 定向耦合型电光开关*

孙小强, 高伟男, 孙杰, 高磊, 陈长鸣, 张大明[†], 刘式墉

(吉林大学 a. 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区; b. 电子科学与工程学院, 长春 130012)

摘要: 设计并制作了一种聚合物 2×2 定向耦合型电光开关. 针对溶胶-凝胶法合成的有机/无机杂化电光材料膜厚较薄的情况, 采用一种加载条形波导结构, 利用掺有环氧丙脂的聚甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯作为引导层, 在电光薄膜上构成定向耦合器, 通过紫外光刻、反应离子刻蚀、电晕极化等工艺, 制备了聚合物定向耦合型电光开关, 并采用共面波导行波电极以电推挽方式工作. 经测试, 其器件损耗约为 16 dB, 开关电压 9 V.

关键词: 聚合物; 电光开关; 定向耦合; 有机/无机杂化

中图分类号: TN814

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3084-4

0 引言

光开关是波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 全光通讯系统中的一种基本器件. 在空分、时分和波分复用系统中有着广泛的应用. 有机聚合物材料由于具有电光系数大、响应速度快、成本较低和工艺简单的特点, 在高速光通讯领域显示出巨大的应用潜力^[1-4].

聚合物 2×2 定向耦合型电光开关是由波导定向耦合器、单模输入/输出波导、弯曲连接波导和共面波导 (Coplanar Waveguide, CPW) 行波电极组成. 采用溶胶-凝胶方法制备有机/无机杂化电光材料, 旋涂在长有 SiO_2 的 Si 衬底上, 高温电晕极化后, 电光系数 γ_{33} 大于 20 pm/V , 且常温下 18 个月保持不变^[5]; 利用铝掩膜结合反应离子刻蚀工艺, 在电光薄膜上制备 PMMA-GMA/环氧丙脂引导层波导, 构成加载条形定向耦合器. 采用 CPW 行波电极, 以电推挽方式工作. 经测试, 器件损耗约为 16 dB, 开关电压 9 V.

1 分析与设计

定向耦合型 2×2 光开关的结构如图 1, 当相互平行的两个波导互相靠近时, 波导中的传播模式在传输过程中发生耦合, 产生功率交换, 这种现象称为模式定向耦合.

通过电极施加电压, 使耦合区两波导的折射率发生大小相反的变化, 改变其传播特性, 实现两波导间的横向光耦合^[6-7]. 为了增强调制深度, 放宽对耦

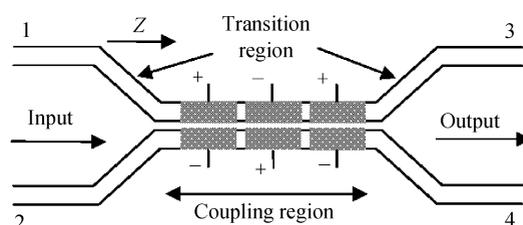


图 1 定向耦合型电光开关的结构

Fig. 1 Schematic diagram of directional coupler EO switches

合长度的要求, 设计采用了三节电极结构.

1.1 耦合器设计

耦合区由两个相互平行的直波导组成. 若两波导各自保持独立存在时的场分布和传输系数, 则输入光能量在两波导间周期性地转换, 耦合的影响表现为场的振幅随耦合长度的变化. 当电极上施加电压使波导间相位差 $\Delta\varphi = \sqrt{3}\pi$ 时, 可实现光功率的完全耦合^[8].

根据理论计算和软件模拟分析, 选择耦合区波导长为 $17\,000 \mu\text{m}$, 宽 $4 \mu\text{m}$, 波导间距 $4 \mu\text{m}$. 过渡区采用小半径余弦弯曲结构和楔形渐变波导, 将调制臂中的多模成分转化为单模, 使残余的多模辐射出去^[9-11].

1.2 波导结构

电光开关的设计包括波导和电极两部分, 二者互相制约, 共同决定着器件的性能. 由于有机/无机杂化电光材料薄膜厚度只有约 $0.5 \mu\text{m}$, 且热膨胀系数与聚合物不匹配, 单独作为有源层会在聚合物表面产生开裂现象. 经软件模拟和实验分析, 本文直接将杂化材料旋涂在 SiO_2 表面, 利用低损耗聚合物波导作为引导层, 构成一种加载条形结构, 如图 2.

引导层采用 PMMA-GMA/环氧丙脂共聚物, 在 1550 nm 波长下, 其折射率为 1.495, 小于杂化

* 国家重点基础研究发展规划 (2006CB302803) 资助

[†] Tel: 0431-85168097

Email: zhangdm@jlu.edu.cn

收稿日期: 2008-11-04

修回日期: 2009-02-03

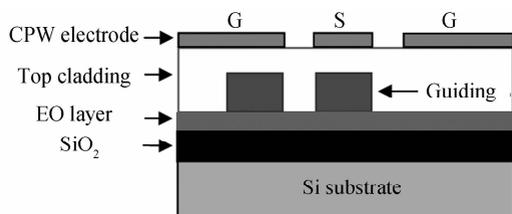


图2 加载条形波导结构

Fig. 2 Structure model of strip-loading waveguide with CPW electrode

材料的折射率 ($n \approx 1.65 @ 1550 \text{ nm}$), 大于上包层 PMMA-GMA 的折射率 ($n \approx 1.483 @ 1550 \text{ nm}$), 满足波导传输条件. 利用 Opti-BPM 软件模拟, 发现光场能量被较好的限制在杂化材料层中, 如图 3.

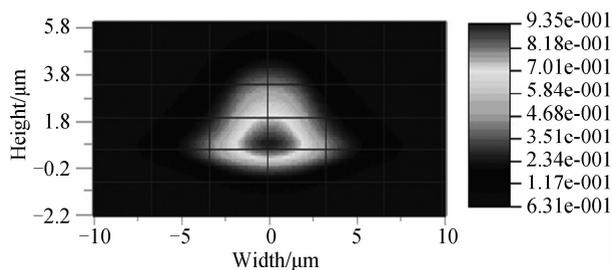


图3 加载条形波导光场能量分布

Fig. 3 Optical field distribution in strip-loading waveguide

为有效降低开关电压, 中心电极与地电极的间距选择 $4 \mu\text{m}$, 利用 Matlab 计算调制效率约为 25%.

2 实验

2.1 电光材料

电光材料的特性直接影响着开关器件的性能. 目前, 商业化的产品主要应用铌酸锂晶体等无机材料, 虽然稳定性和传输特性较好, 但成本较高. 有机聚合物材料具有高电光系数、低介电常量、高响应速度、容易集成等优点, 但极化稳定性一直制约着其有效应用. 为了克服这一缺点, 采用溶胶-凝胶方法合成了以分散红为生色团的硅基有机/无机杂化材料. 它的制备过程比较简单, 可以采用旋涂方法成膜, 加热固化后, 膜厚约为 $0.5 \mu\text{m}$; 利用高温电晕极化, 测得电光系数大于 20 pm/V , 且室温下放置 18 个月变化小于 5%; 折射率可调, 通过调节钛酸丁酯 $\text{Ti}(\text{OR})_4$ 与正硅酸乙酯 TEOS 的比例, 可以使得杂化材料折射率在 $1.49 \sim 1.82$ 范围内变化 (1550 nm 波长下), 容易实现相速度匹配^[12].

2.2 波导制备

定向耦合开关波导采用紫外光刻和反应离子刻蚀 (Reaction Ion Etching, RIE) 方法制备. 由于光刻胶 BP212 在反应离子刻蚀时无法阻挡下层的聚合物与氧气反应, 因此采用铝作为引导层的掩膜.

首先, 在长有 $2.2 \mu\text{m}$ 厚 SiO_2 的 Si 衬底上以 1500 rpm 旋涂有机/无机杂化材料, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 固化 2 h

后自然降温, 可获得表面平整的电光薄膜; 电晕极化后, 在杂化材料薄膜上以 2500 rpm 的转速旋涂 PMMA-GMA/环氧丙脂材料, $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下固化 2 h, 而后自然降温, 利用椭偏仪测量引导层膜厚度约 $3 \mu\text{m}$; 在引导层上蒸镀 50 nm 厚的铝作为掩膜, 利用 BP212 光刻胶和波导掩膜版进行紫外光刻, 采用 0.5wt. % 的 NaOH 溶液显影, 当波导图形完整出现时即停止; 而后在氧气环境中进行反应离子刻蚀, 结束后用 0.5wt. % 的 NaOH 溶液去除光刻胶和铝掩膜; 最后旋涂 PMMA-GMA 包层, $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 固化 2 h, 从而构成加载条形定向耦合器波导结构^[13].

利用扫描电子显微镜观察波导截面和表面形貌, 如图 4, 发现由于 RIE 的侧向刻蚀, 使得波导截面形状与理论的矩形结构不同, 导致散射损耗增加. 另外, 为了降低开关电压, 设计中还采用了较大的耦合区长度, 这也会导致传输损耗的增加. 利用截断法测量, 器件损耗约为 16 dB.

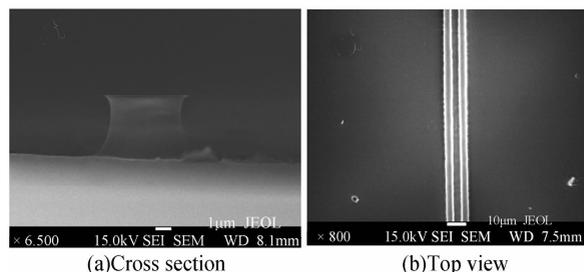


图4 耦合区波导的截面图及顶视图

Fig. 4 SEM micrograph of cross section and top view of coupling region waveguide

图 5 为 0.2 mW 的输入光经 4 cm 长定向耦合器开关波导传输后的近场光输出 (160 倍放大, 1550 nm), 图 5(a) 和 (b) 分别为输入光从 1 端输入 4 端输出, 2 端输入 3 端输出的近场光斑. 由于定向耦合器结构对耦合区长度和波导结构变化非常敏感, 因此反应离子刻蚀造成的波导表面粗糙度增加和对版等工艺误差的存在, 必然会导致耦合输出不平衡度较大, 无法实现光功率的完全耦合.

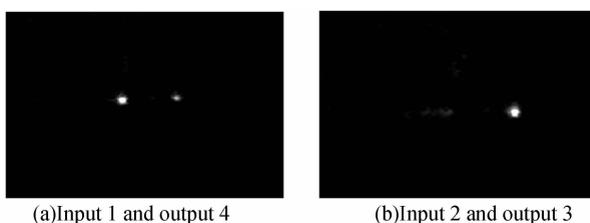


图5 耦合输出近场光斑

Fig. 5 Near-field light output of switch

2.3 电极制备

定向耦合型电光开关的电极结构有单节、两节、多节之分. 如采用单节电极, 则要求耦合区波导长度精确等于耦合长度的奇数倍, 对器件的制作工艺要

求很高,而多节反相电极结构不但可以增强调制深度,还可以放宽对耦合长度的要求.结合器件尺寸与工艺条件,本文采用了三节结构的共面铝电极^[14].即将电极做成多节的结构形式,并且在相邻近的电极上施加大小相等、极性相反的电压.此时,耦合效率 η 只与 δ^2 有关($\delta = \Delta\beta/2$, $\Delta\beta$ 为两波导的传播常量之差),故 $\Delta\beta$ 为正或为负均不会对 η 产生影响.反相电极定向耦合型电光开关的电压响应可通过每一段的传输矩阵相乘得到,不必考虑反相段的符号变化.对于三节反相电极结构的定向耦合型电光开关,只要使得耦合区长度 L 与耦合长度 L_0 的比值大于1,耦合区的长度就可以任意选择,总可通过调节外加电压的大小实现交叉与直通工作状态的转换^[15-16].通过理论计算和 ADS 软件模拟,本文采用 G-S-G 结构的 CPW 电极,信号电极宽 $4\ \mu\text{m}$,与地电极间距 $4\ \mu\text{m}$.

电极的制备采用蒸镀方法,在上包层表面蒸镀一层铝膜,旋涂 BP218 光刻胶,固化后利用电极掩模版光刻,显影后可获得形貌良好的 CPW 电极.利用矢量网络分析仪对其进行测试,电极的 3 dB 带宽约为 1.5 GHz,如图 6,可满足开关对电极的电学性能要求.

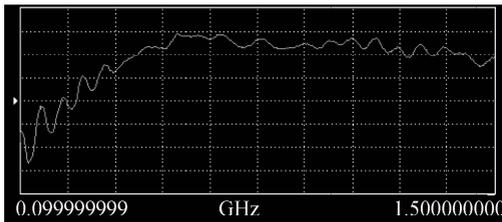


图 6 矢量网络分析仪测得电极 S21 参量
Fig. 6 S21 parameter of CPW electrode

2.4 测试

测试系统结构如图 7,信号光由单模光纤(SMF-28)耦合进波导,在 1 kHz 正弦调制信号和直流偏置电场的共同作用下,光场能量在波导输出端呈正弦规律变化,经 InGaAs/InP 光电探测器转换为电信号后显示在示波器上,如图 8.上方为调制电信号,下方为输出光信号.

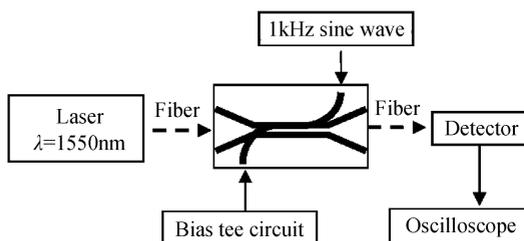


图 7 光开关测试系统
Fig. 7 Structure of device test system

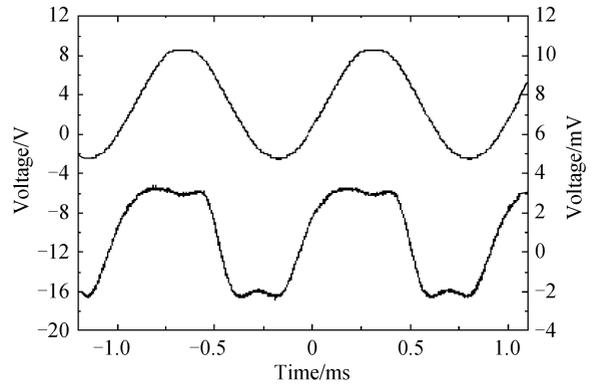


图 8 直流偏置电压 4 V 时调制输出信号
Fig. 8 Modulation response (bottom) and source voltage (upper) under 1 kHz frequency sine signal

通过调节直流偏置电压,使定向耦合开关的光信号调制输出变化 π 相位,测得直流电压变化为 9 V,如调制电信号为方波,则光输出呈现开关状态.开关电压较大的原因主要是由于:反应离子刻蚀时间不够精确,耦合区波导的底部未完全分开;刻蚀时间过长时,又会导致侧蚀严重,波导截面形貌变差,破坏了边界条件,导致耦合效率降低,从而需要增加调制电压才能实现光功率的完全转移;另外信号与地电极间距仅为 $4\ \mu\text{m}$,且耦合区波导长度较大,对版时信号电极很难完全准确覆盖调制臂波导,使调制深度下降,开关电压增加.

当电极只施加直流调制信号,使波导输出光功率由最大降至最小,利用光功率计测得消光比约为 11 dB.分析消光比不高的原因,主要是由于加载型的波导结构调制效率较低,且波导的串扰较大.下一步尝试采用微带电极结构,以提高光场与电场的耦合作用.

3 结论

本文利用溶胶-凝胶方法制备了有机/无机杂化电光材料,它具有工艺简单,电光系数较大和极化稳定性好的优点.采用加载条形波导,利用定向耦合器结构,制备了基于杂化型电光材料和 PMMA-GMA/环氧丙脂引导层的电光开关.采用反相多节 CPW 行波电极,获得 9 V 的开关电压,消光比约 11 dB.

参考文献

- [1] WANG Xiao-long, YU Jin-zhong. The latest progress of optical waveguide switch[J]. *Physics*, 2003, **32**(3): 165-170.
王小龙,余金中. 光波导开关的最新进展[J]. *物理*, 2003, **32**(3): 165-170.
- [2] MA H, JEN A K Y, DALTON L R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices[J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(19): 1339-1365.

- [3] YUAN W, KIM S, SADOWY G, *et al.* Polymeric electro-optic digital optical switches with low switching voltage [J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(3): 195-197.
- [4] LABBÉ P, DONVAL A, HIERLE R, *et al.* Electro-optic polymer based devices and technology for optical telecommunication[J]. *CR Physique*, 2002, **3**(4): 543-554.
- [5] HOU A-lin. Fundamental research on electro-optic modulator based on poled polymer materials [D]. Changchun: Jilin University, 2007: 125.
候阿临. 极化聚合物电光调制器的基础研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 125.
- [6] BAO Jun-feng, WU Xing-kun. The design of a directional coupled electro-optical switch based on the polymeric waveguide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 361-364.
鲍俊峰, 吴兴坤. 一种定向耦合器型高聚物光开关设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 361-365.
- [7] MA Chun-sheng, LIU Shi-yong. Optical waveguide mode theory[M]. Changchun: Jilin University Press: 322-329.
马春生, 刘式慵. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006: 322-329.
- [8] ZHENG Chuan-tao, MA Chun-sheng, YAN Xin, *et al.* Simulation and optimization of polymer directional coupler electro-optic switch with push-pull electrodes [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(4): 3695-3702.
- [9] YANG Di, YU Jin-zhong, CHEN Shao-wu. A novel 2×2 SOI thermo-optic switch[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(11): 1280-1285.
杨笛, 于金中, 陈少武. 一种新型 2×2 SOI 热光开关[J]. 光子学报, 2007, **18**(11): 1280-1285.
- [10] YAN Xin, MA Chun-sheng, WANG Xian-yin, *et al.* Simulation and optimization of polymer directional coupled electro-optic switches[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2145-2149.
闫欣, 马春生, 王现银, 等. 聚合物定向耦合电光开关的模拟和优化[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2145-2149.
- [11] WANG Zhang-tao, YU Jin-zhong. Modeling of $N \times N$ integrated optical switch array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 773-776.
王章涛, 余金中. $N \times N$ 集成光开关阵列模型[J]. 光子学报, 2003, **32**(7): 773-776.
- [12] HOU A-lin. Fundamental research on electro-optic modulator based on poled polymer materials [D]. Changchun: Jilin University, 2007: 109.
候阿临. 极化聚合物电光调制器的基础研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 109.
- [13] ZHANG Xi-zhen, WANG Fei, ZHANG Hai-Ming, *et al.* Fabrication of 32×32 arrayed waveguide grating using fluorinated polymers [J]. *Chinese Physics Letter*, 2005, **22**(8): 1955-1957.
- [14] AN DC, SHI Z, SUN L, *et al.* Polymeric electro-optic modulator based on 1×2 Y-fed directional coupler [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **76**(15): 1942-1974.
- [15] REEM Song, STEIER W H. Overlap integral factor enhancement using buried electrode structure in polymer Mach-Zehnder modulator [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**: 031103.
- [16] CHAKRABORTY R, BISWAS J C, LAHIRI S K. Analysis of directional coupler electro-optic switches using effective-index-based matrix method [J]. *Optics Communications*, 2003, **21**(9): 157-163.

Polymer 2×2 Directional Coupler Electro-optic Switches

SUN Xiao-qiang, GAO Wei-nan, SUN Jie, GAO Lei, CHEN Chang-ming, ZHANG Da-ming, LIU Shi-yong
(a. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics; b. College of Electronic Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The design and fabrication of a directional coupler electro-optic switches are presented. A strip-loading optical waveguide is proposed which uses organic/inorganic hybrid EO material, synthesized by sol/gel technique, as the active layer. Polymethyl-methacrylate-glycidyl-methacrylate (PMMA/GMA) with index regulator bis-A-epoxy, acting as the guiding waveguide, forms the coupler configuration. The device is fabricated by Corona poling, UV lithography and reactive ion etching method (RIE) process. A co-planar waveguide (CPW) electrode is adopted and the switches is working in electric push-pull way. The test results show that the device loss is about 16 dB, and a switching voltage of 9 V is observed.

Key words: Polymer; Directional coupling; Electro-optic switches; Hybrid material



SUN Xiao-qiang was born in 1977, and received the M. S. degree from Jilin University, 2005. He is currently working toward the Ph. D. degree at College of Electronic Science and Engineering, Jilin University. His research interests focus on nonlinear optic material, active and passive polymeric waveguide devices in ROF system.