

基于斜极化法的电光聚合物光波导偏振转换器*

杨建义¹ Zhou Qingjun² 江晓清¹ 王明华¹ Ray T. Chen²

(1 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

(2 Department of Electrical & Computer Engineering/Microelectronics Research Center,
University of Texas at Austin, Austin, TX78758, USA)

摘要: 采用斜极化法研制了电光聚合物光波导偏振转换器, 分析并设计了器件的 45°斜角电极化结构, 并基于 DR1/PMMA 电光聚合物材料, 对器件进行了制作. 所研制的偏振转换器, 由 TE 模到 TM 模和由 TM 模到 TE 模的偏振模转换效率分别约为 93.6% 和 95.1%, 偏振转换周期电压约为 380V. 并讨论了器件性能进一步提高的可能性与方法.

关键词: 集成光学; 有机聚合物; 光波导; 电光效应; 偏振转换

PACC: 4270J; 4280L; 4225J

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)11-1217-05

1 引言

光偏振转换器是光信号处理与光通信系统中重要的功能器件之一. 人们采用铌酸锂材料和 III-V 族化合物半导体材料设计并研制了基于 TE 模与 TM 模变换的光波导偏振转换器^[1-4]. 近年来, 有机聚合物光波导材料和器件得到了发展^[5-11]. 由于基于电极化技术的电光聚合物的光学主轴是由电极化时的电场方向决定的^[9], 倾斜极化电场方向可以实现电光聚合物的极化光学主轴与光波导的衬底平面间存在一定斜角. 与此同时, 由于沿极化电场方向的光学主轴的光学折射率和电光系数均大于垂直于电场方向的另两个光学主轴的光学折射率和电光系数^[9], 利用这种斜极化方法可以在电光聚合物光波导中实现 TE 模与 TM 模间的偏振模转换. Oh 等人采用渐变倾斜极化光学主轴的特殊结构与方法研制了高转换效率的光波导偏振转换器^[12], 但属于单向转换器件. 最为简单的 TE 模与 TM 模间偏振转换结构是设法在光波导中实现具有 45°斜角的极化光学主轴. Hwang 等人在理论上详细分析了采用 45°斜极

化实现高转换效率的偏振转换器^[13]; Kowalczyk 等人报道了初步的无源型 45°斜极化电光聚合物偏振转换器研制, 通过控制器件长度获得偏振模间的转换^[14].

本文将对有源型 45°斜极化电光聚合物光波导偏振转换器进行研究, 通过外加电压控制偏振模间的耦合转换长度, 实现偏振转换. 这种有源型偏振转换器不仅可以独立作为一个光波导偏振调制器, 而且可以用于构成光圆偏振调制器^[15, 16]和偏振无关光波导光调制器/光开关^[17]. 文中将首先简单描述器件工作原理, 然后进行器件的设计, 主要考虑实现 45°斜角光学主轴的电极化结构. 随后给出器件的制作过程, 最后对器件进行了特性测试.

2 器件的原理与设计

假设在垂直于光传输方向 z 的截面 (x, y) 内, 两个光学主轴 (a, b) 与空间坐标 (x, y) 成 45°夹角, 如图 1(a) 所示. 对偏振方向沿 x 轴的输入光波 $E_x(0) = E_0$, 传输至 z_0 时, 可获得偏振方向分别沿 x 和 y 轴的光波分量为:

* 国家重点基础研究发展规划(编号: G1999033104)和国家自然科学基金(批准号: 69907004, 60177012 和 60277034)资助项目

杨建义 男, 1969 年出生, 博士, 副教授, 主要从事集成光学与光电子、光波导理论、微光机电系统和光通信的研究.

2002-12-22 收到, 2003-02-12 定稿

©2003 中国电子学会

$$\begin{aligned} E_x(z_0) &= E_0 \cos \left[\frac{\theta_a(z_0) - \theta_b(z_0)}{2} \right] \exp \left[i \frac{\theta_a(z_0) + \theta_b(z_0)}{2} \right] \\ E_y(z_0) &= i E_0 \sin \left[\frac{\theta_a(z_0) - \theta_b(z_0)}{2} \right] \exp \left[i \frac{\theta_a(z_0) + \theta_b(z_0)}{2} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\theta_a(z_0)$ 和 $\theta_b(z_0)$ 分别为偏振方向沿两光学主轴 a 和 b 的光波传输 z_0 距离后的相位变化. 从(1)式中可以看到, 若能控制相位差因子 $\varphi = \theta_a(z_0) - \theta_b(z_0)$ 为 $2N\pi$ (N 为整数), 在 z_0 处的输出光波为沿 x 方向偏振的光波; 若此相位差因子 φ 为 $(2N+1)\pi$, 输出光波为 y 方向偏振光波, 完成偏振转换. 同样, 对偏振方向沿 y 轴的输入光波, 有同样的可控偏振输出特性和偏振转换.

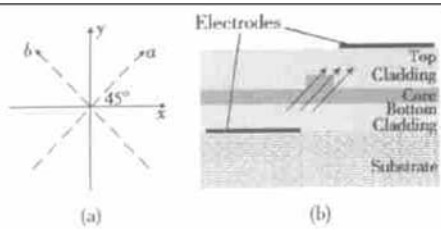


图1 (a) 空间坐标 (x, y) 与材料光学主轴 (a, b) 相交成 45° ; (b) 45° 斜极化后的电光聚合物光波导的剖面示意图.

Fig. 1 (a) Space coordinates (x, y) and optical principal axes (a, b) with a crossing angle of 45° ; (b) Cross-section diagram of 45° -tilt-poled electro-optic polymeric waveguide.

由于对电极化后的电光聚合物材料, 其光学主轴为沿电极化电场方向和垂直电场方向, 所以, 对图1(b)所示的电光聚合物材料的光波导, 若能实现具有 45° 斜角方向的电极化, 就可以利用其电光效应控制相位差因子 φ 制作出光偏振转换器. 假设图1(b)中的光波导截面与(a)中有相同的空间坐标, 电极化时的电场方向在脊波导的中心区域足够均匀, 且沿 a 方向. 由于 a 与 b 方向的电光系数 r_{33} 和 r_{31} 存在近似关系^[9, 11]: $r_{31} \approx \frac{1}{3}r_{33}$, 在沿 a 方向外加电场 E_a 后, 相位差因子的变化为:

$$\Delta\varphi(z_0, E_a) \approx \frac{2\pi}{3\lambda} n^3 r_{33} E_a z_0 \quad (2)$$

由(2)式可知, 当某一沿 x 或 y 方向的偏振光输入时, 通过对外加电场 E_a 的控制, 可以在图1(b)所示的电光聚合物光波导中实现相位差因子 φ 的变化, 从而控制 TE 模与 TM 模间的偏振转换, 以及光波的偏振调制输出.

研制基于上述原理的光波导偏振转换器, 设计并实现 45° 斜角的电极化结构是其中的关键. 文献

[13] 的分析表明, 对图1(b)所示的光波导, 采用具有一定水平偏离的一对上下电极, 在光波导的脊中心实现具有 45° 斜角的电极化电场, 就能实现高偏振转换效率. 其中电场的非均匀性视为可忽略的微扰.

为此, 我们详细分析了图1(b)中所示的极化电极的位置与电场的斜角之间的关系. 首先, 我们确定了聚合物光波导的材料选择与各项参数. 光波导的下限制层为 $4\mu\text{m}$ 厚的紫外固化型环氧树脂 UV15, 上限制层为 $5\mu\text{m}$ 厚的 UV11-3; 波导芯层为旁链型电光聚合物 DR1/PMMA, 厚度为 $2\mu\text{m}$, 脊高 $1\mu\text{m}$, 脊宽 $5\mu\text{m}$. 关于所选用有机聚合物材料的特性, 可以参见文献[18]. 电极化用的上下两个电极分别置于下限制层下面与上限制层上面, 宽度均选为 $50\mu\text{m}$, 且对脊波导的中心有相同的水平偏离. 基于这些结构参数, 对上下两电极在水平方向(x 方向)的不同间隙设置, 计算了电极所产生的电场分布情况. 我们以脊波导中心(指厚度 $2\mu\text{m}$ 和宽度 $5\mu\text{m}$ 的脊波导区域的中心点)处的电场斜角(指电场与水平方向的夹角)为衡量标准. 由计算可得, 脊波导中心的电场斜角随电极间隙的变化曲线如图2(a)所示, 当电极化电极的水平间隙约为 $2.4\mu\text{m}$ 时, 脊波导中心处电场的斜角为 45° . 利用有限差分法, 图2(b)给出了当电极化电极的水平间隙为 $2.4\mu\text{m}$ 时的电场电势分布图, 图中也标出了光波导的位置. 可以看到, 在脊波导处, 等势线相当均匀, 具有 45° 斜角. 由于电场方向与电场等势线相互垂直, 所以图2(b)所示的极化电场正是我们所需要的.

3 器件的制作和测试

实验中所采用的衬底材料是表面热氧化了 $2.5\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 硅片. SiO_2 层可以用于隔离半导体硅衬底对电极化电场的影 响. 有机聚合物光波导的各薄膜层由旋转匀膜方法完成, 各层厚度由二中的设计选择决定. 采用氧气对波导芯层进行反应离子刻蚀, 获得宽为 $5\mu\text{m}$, 高为 $1\mu\text{m}$ 的脊波导. 上下两个电极均为铝电极, 宽度为 $50\mu\text{m}$, 长度为 1cm , 水平间隙为 $2.4\mu\text{m}$. 在完成器件的所有结构制作工艺过

程后,我们进行了电光聚合物的接触式电极化. 电极化是在 120°C 下,采用 900V 极化电压进行的,极化

时间为 30min . 关于器件的具体结构制作工艺和接触式电极化的装置与过程,可以参见文献[18].

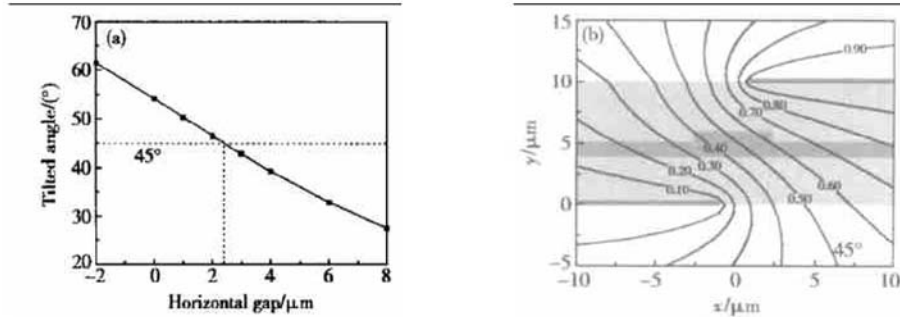


图2 (a) 光波导中心点的电极化电场斜角随电极化电极水平间隙的变化曲线;(b) 在水平间隙为 $2.4\mu\text{m}$ 时的电极化电场电势分布图

Fig. 2 (a) Tilted angle of electric poling field at center point of rib waveguide against horizontal gap of poling electrodes; (b) Electric-potential distribution of poling field when horizontal gap is $2.4\mu\text{m}$

器件的光学测试系统采用保偏光纤连接由光源经被测样品至光功率计的光路,所用光源波长为 1550nm . 在光源与被测样品间插入了在线旋转可调半波片和起偏器,用于调节输入偏振转换器的光波的偏振方向,以便在样品波导中激励起 TE 模或是 TM 模. 为了检测经被测器件偏振转换后输出的光波中各偏振模的功率,我们在光功率计前用另一在线旋转可调起偏器控制可输入光功率计的偏振光.

4 器件的测试结果

通过控制测试系统中输入光波的偏振方向,我们对输入光波为 TE 模和 TM 模的情况分别进行了器件的偏转转换测试. 当输入为 TM 模时,变化偏振转换器的外加电压,我们获得了如图 3 所示的 TE 模与 TM 模的最大与最小输出光近场图. 对 TE 模的输入,可以有类似的输出光近场图.

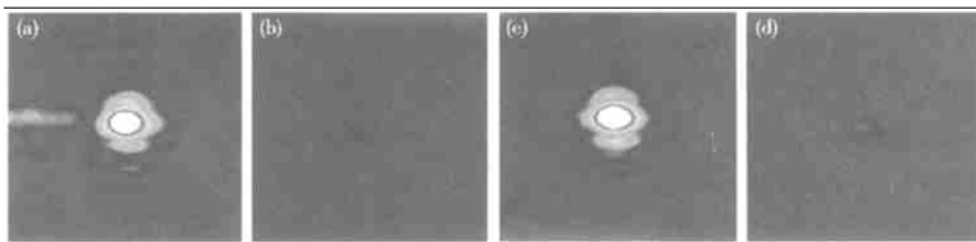


图3 当输入为 TM 模时,调节偏振转换器的外加电压所获得的 TE 模与 TM 模的最大与最小输出光近场图 (a) TE 模最大输出;(b) 对应的 TM 模最小输出;(c) TM 模最大输出;(d) 对应的 TE 模最小输出

Fig. 3 When the input is the TM mode, the obtained near fields of maximum and minimum outputs of the TE and TM modes by tuning the applied voltage on the fabricated polarization converter (a) Maximum TE-mode output; (b) Corresponding minimum TM-mode output; (c) Maximum TM-mode output; (d) Corresponding minimum TE-mode output

图 4 给出了所测得的偏振模转换曲线,以及用于比较的正弦曲线. 图中所示为 TE 模输入情况,对 TM 模输入情况,可以获得相类似的转换曲线. 通过计算所测得的数据,研制的偏振转换器对 TE 模转换为 TM 模的最大转换效率为 93.6% ,而由 TM 模转换为 TE 模的最大转换效率为 95.1% . 由文献

[13] 的分析可以知道,由于电极化导致光波导芯区电光聚合物材料存在一定的双折射效应,而相应的上下限制层中有机聚合物材料的双折射效应可以忽略,使得脊波导中的 TE 模与 TM 模间存在模场分布失配,限制了电光聚合物偏振转换器的转换效率. 要进一步提高器件的偏振转换效率,可能的方案是

将上下限制层也采用电光聚合物材料. 此外, 由于测试系统的控制精确性有限, 这也会导致所测得的最大转换效率值偏低.

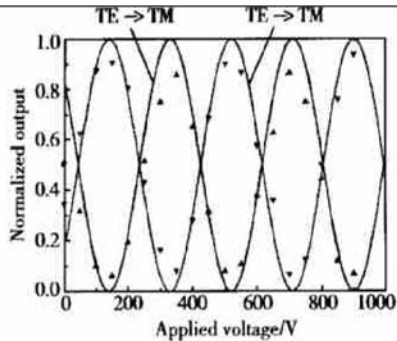


图 4 当输入为 TE 模时, 所测得的偏振转换器 TE 模和 TM 模输出随外加电压的变化

Fig. 4 Measured outputs of the TE and TM modes when the input is the TE mode

由图 4 中的正弦曲线可以知道, 实现一个偏振转换周期所需的电压约为 390V. 虽然斜电场会对所需电压大小有一定的要求, 但对比文献[18]中的结果, 我们发现, 电极化所获得的 DR1/PMMA 的电光效应还远未达到它可能的最大值. 进一步优化电极化参数将可以降低转换周期电压. 此外, 若能采用具有更大电光效应的聚合物材料, 如 CLD1^[19], 可将偏振转换所需电压降至实用要求范围.

实验中, 我们也测试了从保偏光纤经器件到保偏光纤的器件插入损耗. 对约 2cm 长的光波导偏振转换器, 测得的插入损耗约为 18dB. TE 模与 TM 模间并没有明显的差异. 对比文献[20]中的结果, 可以看到, 斜极化没有引入额外的损耗. 所测得的插入损耗一半是由于波导与单模光纤间模式失配以及光纤与器件进行耦合时的空气间隙引入的, 另外的一半主要来源于材料的吸收损耗^[20].

5 小结

本文采用斜极化法设计并制作了基于电光聚合物材料的光波导偏振转换器. 在详细设计了 45°斜角电极化结构基础上, 采用 DR1/PMMA 电光聚合物材料研制了器件. 所研制的光波导偏振转换器, 对由 TE 模到 TM 模的偏振模转换, 转换效率约为 93.6%; 由 TM 模到 TE 模的转换效率为 95.1%. 器件的偏振转换周期电压约为 380V. 通过进一步的聚合物材料选择, 若能采用大电光效应材料, 且在上

下限制层中也使用电光聚合物材料, 将可以提高偏振转换效率, 并降低偏振转换周期电压.

参考文献

- [1] Alferness R C. Electro-optic guided-wave device for general polarization transformation. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, 17(6): 965
- [2] Alferness R C. Electro-optic waveguide TE-TM mode converter with low drive voltage. *Opt Lett*, 1980, 5(11): 473
- [3] Shani Y, Alferness R C, Koch T, et al. Polarization rotation in asymmetric periodic loaded rib waveguide. *Appl Phys Lett*, 1991, 59(7): 1278
- [4] Reinhart H, Logan R, Sinclair W. Electro optic polarization modulation in multielectrode Al_{0.5}Ga_{0.5}As rib waveguide. *IEEE J Quantum Electron*, 1982, 18(5): 763
- [5] Eldada L, Shacklette L W. Advances in polymer integrated optics. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2000, 6(1): 54
- [6] Keil N, Yao H H, Zawadzki C, et al. Athermal all-polymer arrayed-waveguide grating multiplexer. *Electron Lett*, 2001, 37(9): 579
- [7] Yang J, Zhou Q, Chen R T. Polyimide-waveguide-based thermal optical switch using total-internal-reflection (TIR) effect. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(16): 2947
- [8] Noh Y O, Yang M S, Won Y H, et al. PLC-type variable optical attenuator operated at low electrical power. *Electron Lett*, 2000, 36(24): 2032
- [9] Teng C. High-speed electro-optic modulators from nonlinear optical polymers. In: *Nonlinear Optics of Organic Molecules and Polymers*. Hari Singh Nalwa, Seizo Miyata, ed. Boca Raton: CRC Press, 1997: 441
- [10] Yang X, Du Y, Yin A, et al. Ridge waveguide electro-optic polymer modulator with a new kind of corona poled crosslinkable polyurethane. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22: 133(in Chinese) [杨晓红, 杜云, 殷爱民, 等. 用新型可交联极化聚合物材料制备的脊波导有机电光调制器. *半导体学报*, 2001, 22: 133]
- [11] Yang J Y, Jiang X Q, Yang F H, 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]
- [12] Oh M C, Shin S Y, Hwang W Y, et al. Wavelength insensitive passive polarization converter fabricated by poled polymer waveguides. *Appl Phys Lett*, 1995, 67(13): 1821
- [13] Hwang W, Kim J, Zyung T, et al. TE-TM mode converter in a poled-polymer waveguide. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, 32(6): 1054
- [14] Kowalczyk T, Liu L, Lackritz H. Passive polymeric EO devices. 1998 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, 1998:

- III/21
- [15] Maki J, Taboada J, Sun L, et al. Electro-optic-polymer circular-polarization modulator. SPIE, 1999, 3623: 147
- [16] Yang J, Zhou Q, Jiang X, et al. Electro-optic-polymer-based optical circular-polarization modulators. Acta Optica Sinica, to be published (in Chinese) [杨建义, Zhou Qingjun, 江晓清, 等. 基于电光聚合物材料的光圆偏振调制器的研制. 光学学报, 待发表]
- [17] Yang J, Jiang X, Wang M. EO-polymer-based polarization-independent optical intensity modulator/switch (Patent Application) [杨建义, 江晓清, 王明华. 基于电光聚合物材料的偏振无关光波导强度调制器/光开关. 专利申请中]
- [18] Yang J, Jiang X, Wang M. Study of polymer-based electro-optic modulators using contact poling. Acta Optica Sinica, to be published (in Chinese) [杨建义, 江晓清, 王明华. 采用接触式极化法研制有机聚合物电光光波导调制器. 光学学报, 待发表]
- [19] Shi Y, Zhang C, Zhang H, et al. Low (sub-1-volt) halfwave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromosphere shape. Science, 2000, 288: 119
- [20] Yang J, Jiang X, Wang M. Electro-optic Mach-Zehnder polymeric modulators based on contact-poling. Optoelectronics • Lasers, to be published (in Chinese) [杨建义, 江晓清, 王明华. 基于接触式极化法的 Mach-Zehnder 型聚合物电光强度调制器研究. 光电子 • 激光, 待发表]

Electro-Optic Polymeric Polarization Converter Employing Tilted-Poling Method*

Yang Jianyi¹, Zhou Qingjun², Jiang Xiaoqing¹, Wang Minghua¹ and Ray T. Chen²

(1 Department of Information Science & Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 Department of Electrical & Computer Engineering/Microelectronics Research Center,
University of Texas at Austin, Austin, TX78758, USA)

Abstract: A tilted-poling-based electro-optic polymeric polarization converter is demonstrated. The poling structure for realizing the 45°-tilted optical principal axis is investigated and designed. The polarization converter is fabricated by using DR1/PMMA polymer. The measured polarization conversion efficiencies from TE mode to TM mode and from TM mode to TE mode are 93.6% and 95.1%, respectively. The electrical voltage for a period of the polarization conversion is about 380V. The possibility and measures to improve the performance of the polarization converter are also discussed.

Key words: integrated optics; polymer; waveguide; electro-optic effect; polarization conversion

PACC: 4270J; 4280L; 4225J

Article ID: 0253-4177(2003)11-1217-05

* Project supported by Major State Basic Research Development Program (No. G1999033104) and National Natural Science Foundation of China (Nos. 69907004, 60177012 and 60277034)

Yang Jianyi male, was born in 1969, PhD, associate professor. His research area is in integrated optics and optoelectronics, optical waveguide theory, MOEMS, and optical communications.

Received 22 December 2002, revised manuscript received 12 February 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics