

# 一种定向耦合器型高聚物光开关设计\*

鲍俊峰 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江大学光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

**摘要** 本文提出了一种基于定向耦合器型的高分子聚合物波导光开关设计, 其突出特点是极低的波长相关性和耦合区几何尺寸敏感度, 可采用橡胶成型工艺 (Rubber Molding Process) 实现高聚物波导在硅基底上的快速转印成型. 利用 BPM 方法进行了器件的波导结构设计及性能模拟, 插入损耗为 0.4 ~ 0.6 dB, 串扰 < -32 dB, 偏振相关损耗约为 0.08 dB, 电光系数  $r_{33} = 14 \text{ pm/V}$  时, 器件的开关电压为 42 V.

**关键词** 光纤通讯; 光开关; 高分子聚合物; 定向耦合器

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

光开关作为一种重要的功能器件, 其实际用途极其广泛, 在光通讯系统中可用于信道交换、线路保护、多路光监控系统、LAN、多光源/探测器换接; 在光测试系统中则可用于光纤、光器件、网络、野外工程光缆等的光传感多点监测系统测试, 使原来手工跳线插拔的过程成为可编程电控化, 是现代多路光遥控、遥感中不可缺少的器件. 就器件工作原理而言, 既包括了最传统的机械工作方式, 也包括当前高速发展的微机械技术, 既包括电光效应和载流子注入效应, 也包括了热光效应和声光效应<sup>[1]</sup>.

光开关器件具备速度快、高消光比、低损耗、无偏振依赖性、高稳定性是人们追求的目标<sup>[2]</sup>. 作为电光开关和电光调制器的关键基底材料之一, 高分子聚合物材料与传统的无机光波导材料比较, 具有高电光耦合系数, 低介电常数, 同时有响应时间短, 热损小, 驱动电压低等优点; 一般聚合物的热光效应是硅的 10 倍<sup>[3]</sup>. 同时高分子聚合物光波导材料比硅基无机光波导材料加工工艺简单经济得多, 无须高温加热, 通过甩膜、光刻等工艺即可制造出复杂的光电集成器件<sup>[3]</sup>. 高聚物的这一优点受到了极大的关注, 使得基于该种材料的通讯器件成为目前的研究热点之一. 除光刻固化外, 还可以通过采用橡胶成型工艺实现高聚物波导在硅基底上的快速转印成型, 一旦该工艺成熟应用, 高聚物波导器件的大批量、低成本商业化生产将成为现实<sup>[4]</sup>.

本文提出了一种基于定向耦合器型的高分子聚合物波导光开关设计, 根据 BeamProp 软件模拟分析, 该器件实现了低插入损耗和串扰, 并具有偏振不敏感, 波长响应平坦, 易于集成等显著特点.

## 1 理论分析

目前见诸报道的高聚物波导光开关大多为热光型 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉型结构. 但其开关性能的波长相关性较强, 无法实现多波长输入情况下的平坦输出<sup>[5]</sup>.

为了实现器件的多波长平坦输出, 采用了定向耦合器的基本结构, 同时通过对波导耦合区长度、电极宽度的优化设计, 实现了更小的插入损耗, 更好的波谱平坦性. 如图 1, 器件的耦合段波导结构由两个平行且相距很近的两段高聚物波导组成, 一个波导内的光波能够横向耦合到另一个波导内, 两段波导的耦合段上贴有一对导电电极. 两波导间的相位失配可以通过电极电压加以调节, 适当施加的电极电压使两个波导产生的折射率变化大小相反, 即一段波导的折射率增大, 而另一段则减小, 这样可使得  $z$  切方向高聚物的最大电光系数  $r_{33}$  发挥作用. 以下将根据平行波导的模式耦合理论导出波导间的耦合系数表达式, 详细分析器件的工作原理.

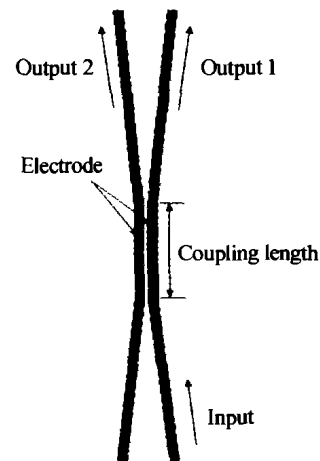


图 1 波导形式及电极分布方式

Fig. 1 Waveguide type and electrode distribution

根据两平行波导间的模耦合方程<sup>[6,7]</sup>

$$R' - j\delta R = -jkS \quad (1)$$

$$S' + j\delta S = -jkR \quad (2)$$

式中  $\delta = \Delta\beta = \frac{\pi(N_2 - N_1)}{\lambda}$ , 其中  $N_2, N_1$  分别为两波导的有效折射率;  $L$  为两波导平行时耦合段的长度;  $K$  为耦合系数, 为横向耦合系数与纵向耦合系数之和.  $R$  和  $S$  分别代表两个波导的导模的复振幅值,  $R' = dR/dz, S' = dS/dz, z$  为传播方向. 由式(1)、(2)联立求解, 可得耦合系数  $\eta$  的表达式<sup>[6]</sup>

$$\eta = \frac{1}{1 + (\delta/k)^2 \sin^2 kL [1 + (\delta/k)^2]^{1/2}} \quad (3)$$

分析上式: 当不加驱动电压即  $\delta = 0$  (波导的传播常数差  $\Delta\beta = 0$ ) 时,  $\eta = \sin^2 kL$ , 欲使输入第一个波导的光波全部耦合到第二个波导中传输, 第一波导的光输出为零, 即  $\eta = 1$ , 必有

$$kL = (2n + 1)\pi/2 \text{ 或 } L = \frac{(2n + 1)\pi}{2k} \quad (4)$$

式中:  $n$  取任意整数,  $n = 0$  时对应的  $L$  称为耦合长度.

在耦合长度下, 改变驱动电压时, 即使  $\delta \neq 0$ , 欲使输入第一个波导光波中的光波仍然从第一波导中输出, 即  $\eta = 0$ , 须满足

$$\Delta\beta L = \sqrt{3}\pi \quad (5)$$

综合上述分析, 改变驱动电压, 其直接效果将导致  $\Delta\beta$  变化, 实现光路的切换.  $\Delta\beta = 0$  时, 光波将从第一波导完全耦合至第二波导;  $\Delta\beta = \frac{\sqrt{3}\pi}{L}$  时, 光波将在第一波导内传播.

## 2 波导结构数值计算及器件性能数值模拟

### 2.1 波导结构数值计算

采用光束传输法 (BPM) 波导分析软件 Beamprop<sup>TM</sup> 作为波导设计及器件模拟工具. 据上述理论分析, 首先确定波导的耦合段长度, 并使其严格等于耦合长度的整数倍, 基于该耦合段长度来确定驱动电压, 然后对电极宽度等相关参数进行优化模拟计算, 从而完成波导结构的设计.

本文选取芯层的宽度为  $8.3 \mu\text{m}$ , 厚度为  $3 \mu\text{m}$ , 覆盖层折射率  $n = 1.59$ , 芯层与覆盖层的折射率  $\Delta n = 0.04, r_{33} = 14 \text{ pm/V}$ , 耦合区长度  $L = 3400 \mu\text{m}$ , 整个波导结构为掩埋式的沟道波导.

改变耦合段长度, 对两个输出端口的输出光强进行数值模拟计算, 得到如图 2 的曲线, 从曲线可知, 在驱动电压为 0 的情况下, 耦合区长度取  $3400 \mu\text{m}$  时, 从第 1 波导段中输入的光束完全耦合到第 2 波导段中传播输出. 插入损耗约为  $0.6 \text{ dB}$ .

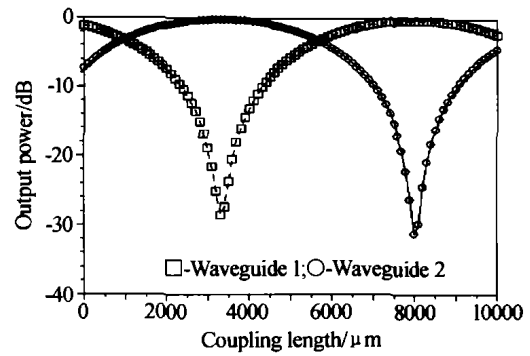


图 2 输出功率随耦合区长度变化曲线  
Fig. 2 Output power as a function of coupling length

从图 3 中可知在不同的电压驱动下, 第 2 波导段的输出光强呈现周期性变化趋势, 同时变化振幅随驱动电压增大逐渐变小. 所以可取其最小的一个周期  $42 \text{ V}$  电压为器件的切换电压, 此时的器件串扰值为  $-32 \text{ dB}$  左右. 器件插入损耗约为  $0.4 \text{ dB}$ .

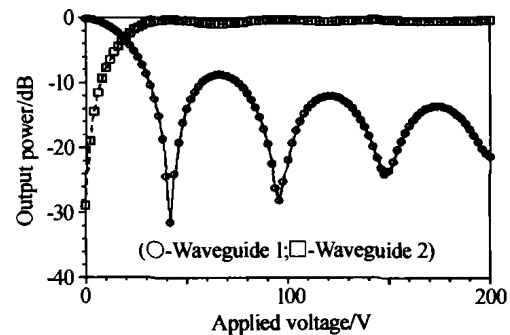
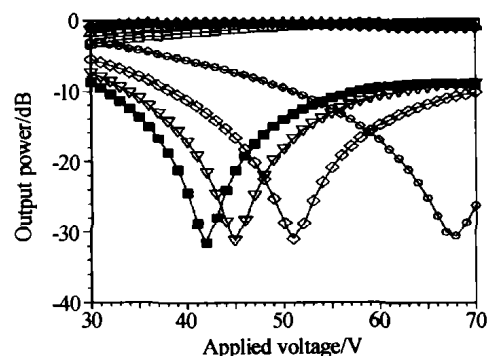


图 3 驱动电压与输出光强的关系曲线  
Fig. 3 Output power as a function of driving voltage

得到上述两个基本参数后, 对电极宽度进行优化计算得到了如图 4 所示曲线, 电极宽度  $= 4.5 \mu\text{m}$  时驱动电压为最小, 故该电极宽度为最优值. 通过上述数值模拟, 基本确定了器件的几何尺寸和驱动电压, 完成了波导的结构设计.



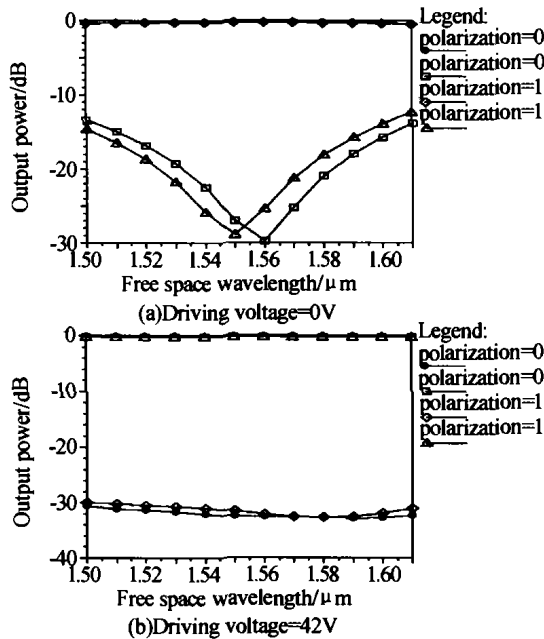
( $\circ$ □-electrode width= $0 \mu\text{m}$ ;  $\diamond$ △-electrode width= $1.5 \mu\text{m}$ ;  $\nabla$ ●-electrode width= $3 \mu\text{m}$ ;  $\blacksquare$ ◆-electrode width= $4.5 \mu\text{m}$ ; the first and the second mark denote the waveguide 1 and the waveguide 2 respectively)

图 4 不同的电极宽度下输出光强与驱动电压关系曲线  
Fig. 4 Output power as a function of driving voltage in variant electrode width

### 2.2 器件性能数值模拟

就器件的偏振相关性及波长相关性问题, 我们进行了数值模拟, 图 5 中给出了器件在 TE 和 TM 偏

振下两路波导的波长相关曲线, (其中(a)中□△和(b)中○◇标记出的曲线是关闭波导段的功率曲线,对器件性能没有影响.)图中可见该器件具有较大的带宽,较低的串扰(<-37dB). 较小的PDL(偏振相关损耗). 在1.55 μm的工作波长下,其PDL为0.08 dB左右.(器件的PDL损耗由(a)中○◇标记两曲线的差值波动和(b)中□△标记两曲线的差值波动决定.)



(○□-TE mode;◇△-TM mode)The first and the second mark denote the waveguide 1 and waveguide 2 respectively

图5 TE及TM模的波长相关曲线  
Fig. 5 Output power of TE and TM mode as a function of wavelength

对于定向耦合器型的开关,器件制作时必须保证耦合段长度非常精确的等于一个耦合长度的整数倍,使得零电压时实现100%的光波跨越即耦合,故在工艺上对该参数的控制将直接影响器件的插入损

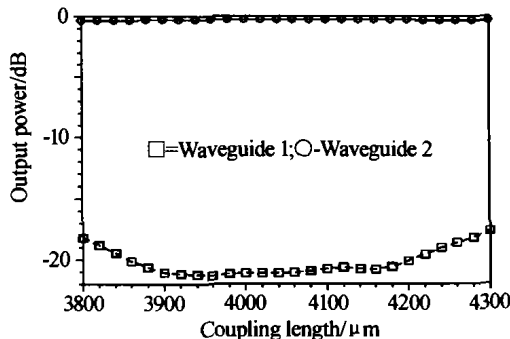


图6 输出光强与耦合段长度的关系曲线  
Fig. 6 Output power as a function of coupling length

耗. 我们进行了输出光强对耦合段长度敏感性的模拟计算,给出了如图6输出光强与耦合段长度的关系曲线. 当耦合段长度在3800~4300 μm的长度范围内变化时,模拟结果显示器件的插损波动<0.3 dB.

### 3 结论

本文提出了一种基于电光聚合物的定向耦合器型电光开关. 插入损耗为0.4~0.6 dB,串扰<-32 dB,偏振相关损耗约为0.8 dB. 电光系数 $r_{33} = 14 \text{ pm/V}$ 时,器件的开关电压为42 V. 较传统的无机物材料波导开关(如LiNbO<sub>3</sub>其插入损耗在5~10 dB左右,串扰则为-17~-20 dB左右)性能有了明显的提升. 而在电光系数 $r_{33} = 50 \text{ pm/V}$ 时,器件开关电压将下降到10 V左右. 进一步稳定制作工艺,降低开关电压,将能使此类低成本波导型光开关得到广泛的应用.

### 参考文献

- 1 谢光,傅焰烽,龚威,等. 光交叉连接(OXC)关键器件技术研究. 光子学报,2000,29(Z1):140~144  
Xie G, Fu Y F, Gong W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(Z1):140~144
- 2 江晓清,占恒正,王明华. 改进型非对称Y分叉内全反射光开关特性分析. 光子学报,2002,31(2):183~186  
Jiang X Q, Zhang H Z, Wang M H. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(2):183~186
- 3 禹忠,汪敏强,姚熹. 光通讯波段聚合物光波导材料的研究进展. 化学通报,2001,(1):5~10  
Yu Z, Wang M Q, Yao X. *Chemistry Online*, 2001, (1):5~10
- 4 Lee Byung-Tak, Kwon Min-Suk, Yoon Jun-Bo, et al. Fabrication of polymeric large-core waveguides for optical interconnects using a rubber molding process. *Photonics Technology Letters*, 2000,12(1):62~64
- 5 Hwang Wol-Yon, Oh Min-Cheol, Lee Hyang-Mok, et al. Polymeric 2x2 electrooptic switch consisting of asymmetric Y junctions and Mach-Zehnder interferometer. *Photonics Technology Letters*, 1997,19(6):761~763
- 6 陈福深. 集成电光调制理论与技术. 北京:国防工业出版社,1995  
Chen F S. *Integrated electro-optic modulation theory and technology*. Beijing: National Defence Industry Press, 1995

## The Design of a Directional Coupled Electro-optical Switch Based on the Polymeric Waveguide

Bao Junfeng, Wu Xingkun

*State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation Center of Optical and Electromagnetic Research Zhejiang  
University, Hangzhou 310027*

Received date: 2004-01-14

**Abstract** A design of directional coupler based polymeric electro-optical switch is presented, focusing on the reduction of both wavelength dependence and the sensitivity of optical characteristics to coupling length. A optimized configuration of the switch was found with a  $<0.3$  dB insertion loss variation for the coupling length to change from 3800 to 4300  $\mu\text{m}$ , making it feasible to form the polymer structure on silicon substrate by rubber molding process or other rapid printing techniques. The characteristics of the optical switch were analyzed by BPM simulations and an insertion loss as low as 0.4 ~ 0.6 dB was obtained, along with a crosstalk of  $-32$  dB and a PDL of 0.08 dB. The driving voltage was found to be 42 V when  $r_{33} = 14$  pm/V.

**Keywords** Optical communications; Optical switch, polymers; Directional coupler



**Bao Junfeng** was born in 1976, in Hubei, China. He received his bachelor degree from Tongji University in 1998 and is currently working towards his Ph. D. degree in optical engineering at Zhejiang University. His current research focuses on both micro-machining and polymer based optical switches, variable attenuators and other opto-electronic devices.