

文章编号:1002-2082(2011)01-0124-04

电光有机聚合物多模干涉分束器

王春利, 廖进昆, 陈 韬

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘 要:分束器是光纤通信系统中光无源网络和光子集成回路的重要器件。 1×2 MMI(multimode interferences) 电光有机聚合物分束器是利用自成像效应设计的。分析了 1×2 MMI 的工作原理。利用有效折射率方法 (effective index method, EIM) 计算出 1×2 MMI 三维多模脊形波导的有效折射率分布。利用自成像效应的成像规律计算出成像位置并用导模传输分析法 (guided-mode propagation analysis, MPA) 对输出波导的光强进行模拟。分析表明: 在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的情况下, 1×2 MMI 的输出波导的光强在未加电极时可以实现预定分束比输出; 加上电极之后, 由于电光效应可调控有机聚合物波导折射率的改变, 利用有限差分光束传播法模拟输出波导的分束比可在 7.6 dB 范围内可调。

关键词: 电光有机聚合物; 分束器; 有效折射率法; 导模传输分析法; 分束比
中图分类号: TN252 文献标志码: A

Multimode interference power splitter based on electro-optic organic/polymers

WANG Chun-li, LIAO Jin-kun, CHEN Tao

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Optical power splitters are essential devices for optical fiber communication system in passive optical networks (PONs) and photonic integrated circuits (PICs). As one of the optical splitters, 1×2 electro-optical multimode interference (EO-MMI) power splitter fabricated by electro-optic organic polymer was analyzed by the self-imaging effect. The operation principle of the 1×2 EO-MMI power splitter was discussed. Firstly, the effective index of the three dimensional (3-D) ridge waveguide was computed by the effective index method (EIM). Then the positions of the two images were calculated respectively by using the formulas of the self-image effect. The power-splitting ratio in the output waveguides was simulated by the guided mode propagation analysis (MPA). Research results show that, for the 1×2 EO-MMI power splitter operating at $1.55 \mu\text{m}$, the special power-splitting ratio can be obtained if there are no electrodes on the ridge waveguide. Furthermore, when the electrodes are put on the top of the waveguide, the power splitting ratio is realized for a tunable scope of 7.8 dB , for the electro-optical effect to change the refractive index.

Key words: electro-optic organic polymer; power splitter; effective index method; guided mode propagation analysis; power splitting ratio

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2010-07-13

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA01Z269); 总装“十一·五”(2009AA03Z413)

作者简介: 王春利 (1985-), 女, 山东汶上人, 硕士, 主要从事集成光学器件、多模干涉器件的研究工作。

E-mail: wcl1224@126.com

引言

R. Ulrich 等首先将自映像原理应用于集成光学中,在理论上对多模干涉进行了分析,并在实验上进行了验证。到了20世纪90年代,随着集成光学的迅速发展,对多模干涉器的研究活跃,其应用也日益广泛^[1]。近年来,基于自成像效应的多模干涉分束器已被成功用于波分复用系统及时分复用系统,而且多模干涉分束器也已经被成功地集成于马赫-曾德尔干涉仪、光接收器、环形激光器等光子回路中^[2-4]。

基于自成像效应(self-imaging effects)的多模干涉(MMI)器具有尺寸小、制作容差性好、制作工艺简单、插入损耗小、偏振不敏感等特点。近年来,有机聚合物光电子器件受到人们广泛的关注,是当前聚合物光子学领域的研究热点之一。电光有机聚合物由于其介电常数低、响应速度快、半波电压低、易于与其他电子器件集成、价格低廉等特点而成为制作分束器的主要材料^[5-6]。

本文主要讨论利用电光有机聚合物制作的 1×2 EO-MMI分束器。根据多模干涉器的重叠成像特性,可得到以预定分束比输出的 1×2 EO-MMI分束器。由于聚合物的电光系数 $\gamma^{33} = 50 \text{ pm/V}$ 较高,多模波导上所加的控制电压则较小。

1 多模干涉器的原理介绍

多模干涉器的基本结构由输入单模波导、多模波导和输出单模波导组成。单模输入波导中的光场在多模波导中激励起多个模式,由于多模干涉效应在单模输出波导中形成自成像。在实际的三维脊型多模波导中,水平方向上的尺寸比垂直方向上大得多,可以认为在垂直方向各处光场传输行为相同,因此可以采用有效折射率方法将三维波导简化为二维波导^[7]。

定义 L_π 为两个最小模式的拍长,则

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_r W_c^2}{3\lambda_0} \quad (1)$$

式中: β_0 和 β_1 为基模和1阶模的传播常数; n_r 为芯层的有效折射率; λ_0 为光在真空中的波长; W_c 为考虑到古斯-汉森位移的多模波导的有效宽度。不同导模的古斯-汉森展宽不同,因此有效宽度不同,一般可用基模的有效宽度近似各导模的有效宽度。定义多模波导的有效宽度为

$$W_e = W + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_c}{n_r}\right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (2)$$

其中对于TE模, $\sigma=0$,对于TM模, $\sigma=1$; W 为多模波导的几何宽度; n_c 为多模波导限制层的有效折射率。由导模传输分析法得,MMI在多模波导出端 $z=L$ 处的输出横向场分布可以表示为

$$\Psi(x, L) = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_\nu \varphi_\nu(x) \exp\left(j \frac{\nu(\nu+2)}{3L_\pi} L\right) \quad (3)$$

式中: $\varphi_\nu(x)$ 为 ν 阶模的横向场分布; $\nu=1, 2, 3, \dots$,为多模波导的第 ν 阶本征模; c_ν 为模场激励系数。

2 1×2 MMI分束器的输出光强分析

MMI器件的基本工作原理是应用了多模波导中多个模式的电磁场相干叠加导致的自成像效应。所以 1×2 MMI分束器的输出波导由于各个导模的相干叠加可以形成不同的光强分布。

当多模波导的长度满足 $L_N = s(3L_\pi/N)$,输入波导的初始位置 x_0 等于 W/N 时多模波导终端出现重叠成像,所得的像的个数小于 N ,并形成新的强度分布,这里 s 和 N 为自然数,且 s 与 N 互质。

将输入场区域由实际区域 $[0, W]$ 扩展为 $[-sW, sW]$,则输入场为

$$f_{in}(x, 0) = \Psi(x, 0) - \Psi(-x, 0) \quad (4)$$

当 $\varphi = \sin(k_y y)$ 时输出横向场分布为

$$\Psi(x, L) = \frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} f_{in}(x - x_q) \exp(j\varphi_q) \quad (5)$$

式中:

$$x_q = (2q - N)sW/N$$

$$\varphi_q = s(N - q) \frac{q\pi}{N}$$

k_y 为水平方向波数; C 为复归一化系数且 $|C| = \sqrt{N}$; $q=0, 1, 2, \dots, N-1$; x_q 和 φ_q 是第 q 个的相对成像位置和相位关系。

假设强度为 $1/N$,相位分别为 φ_1 和 φ_2 的两个像发生重叠,相干叠加后得到的光强度为 r^2 ,相位差为 $\Delta\varphi$,则重叠像的强度和相位^[8]为

$$r^2 = \frac{4}{N} \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \quad (6)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。利用光束传播法,可以得到 1×2 EO-MMI分束器多模波导的最优宽度为 $W = 40 \mu\text{m}$ 。对于TM模偏振,对图1的脊形波导利用有效折射率法进行分析,可得有效折射率的横向分布^[9]为

$$n(x) = \begin{cases} n_{\text{eff}} = 1.6583, & |x| \leq w/2 \\ n_s = 1.6532, & |x| > w/2 \end{cases}$$

式中 $w = 5 \mu\text{m}$ 为脊宽。利用多模干涉理论的重叠

成像分析,可以在输出端得到1×2 EO-MMI分束器的特定分束比。

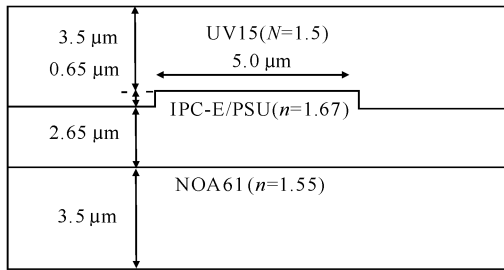


图1 输入单模波导的横截面分布

Fig. 1 The cross-section design of input single mode waveguide

当 $N=4$,输入光场位置 $x_0=W/4$ 时,应用导模分析法(MPA)可得1×2 MMI分束器输出波导光场分布如图2所示。此时成像位置分别为 $W/4, 3W/4$ 。成像位置为 $W/4$ 时发生重叠的两个像的相位分别为 $\varphi_1=3\pi/4, \varphi_2=\pi$,根据(6)式可得 $r^2=\frac{4}{4}\cos^2(\frac{\pi}{8})=0.1465$ 。成像位置为 $3W/4$ 时发生重叠的两个像的相位分别为 $\varphi_1=0, \varphi_2=3\pi/4$,根据(6)式可得 $r^2=\frac{4}{4}\cos^2(\frac{\pi}{8})=0.8536$ 。于是可得 $N=4$ 时输出分束比为85:15。

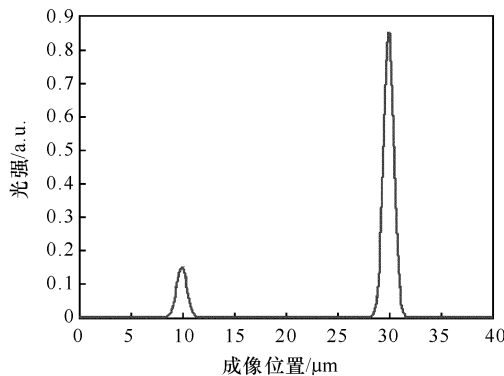


图2 N=4时成像分布

Fig. 2 The distributions of images, when N=4

当 $N=5$,输入位置 $x_0=W/5$ 时,同样利用导模分析法(MPA)得到1×2 MMI分束器输出波导光场分布如图3所示。此时成像位置分别为 $2W/5, 4W/5$ 。成像位置为 $4W/5$ 时发生重叠的两个像的相位分别为 $\varphi_1=\pi, \varphi_2=4\pi/5$,根据(6)式可得 $r^2=\frac{4}{5}\cos^2(\frac{\pi}{10})=0.7236$ 。成像位置为 $2W/5$ 时发生重叠的两个像的相位分别为 $\varphi_1=4\pi/5+\pi, \varphi_2=6\pi/5$,根据(6)式可得 $r^2=\frac{4}{5}\cos^2(\frac{3\pi}{10})=0.2764$ 。于是可

得 $N=5$ 时输出分束比为72:27。

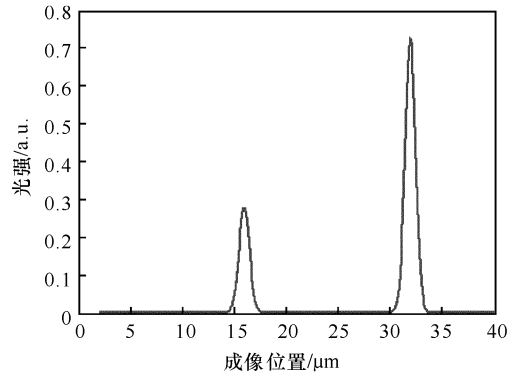


图3 N=5时成像分布

Fig. 3 The distributions of images, when N=5

3 可调分束比的1×2 EO-MMI分束器

对于1×2 EO-MMI分束器,采用有机聚合物作为制作波导的材料。由于所采用有机聚合物的电光系数 $\gamma^{33}=50\text{ pm/V}$ 较大,波导上所加控制电压则较小^[10]。

利用多模波导的对称干涉,当 $L=\frac{1}{2}(\frac{3L\pi}{4}+(\frac{3L\pi}{4}))=3108\mu\text{m}$ 时,在输出端可得到两个自成像,且此时两个输出波导的分束比为1:1^[11],则可得到3 dB的1×2 EO-MMI分束器。利用BPM软件可得 L 的最优长度为 $L=3120\mu\text{m}$ 。如图4所示,一对电极加在第一对自成像位置 $L=1040\mu\text{m}$ 处,由于有机聚合物的电光特性,可得到可调分束比的1×2 EO-MMI分束器。对图4结构的1×2 EO-MMI电光调制器用软件进行仿真模拟,波导仿真结构如图5所示。运行后,由于聚合物的电光效应调控多模波导折射率的改变,1×2 EO-MMI电光调制器的输出光功率发生改变,由一个波导转移到另一个波导,仿真结果如图6所示。

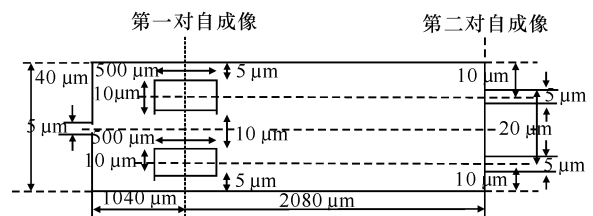


图4 加电极时多模区的切面分布

Fig. 4 Dimensions of planar multimode section with electrodes

由于分束器本身的消耗,对于TM模而言,附加损耗为0.8 dB,不能得到理论上的3 dB的1×2

EO-MMI 分束器。多模波导上所加的电压不同,在 1×2 EO-MMI 的输出端可得到不同的分束比,如图7所示。通过图7可看出 1×2 EO-MMI 分束器的分束比在控制电压为 $0 \sim 16.5$ V 时可在 7.6 dB 范围内可调^[12]。

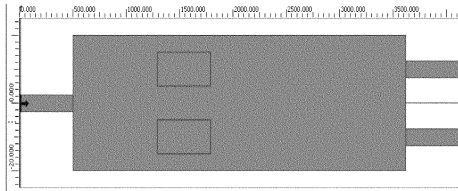


图5 加电极仿真时波导图形

Fig. 5 The layout of waveguide when simulated

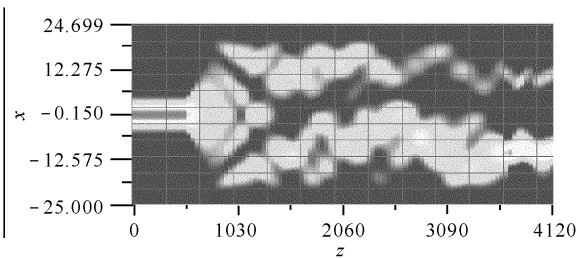


图6 加电极之后的仿真结果

Fig. 6 The results after simulation with electrodes

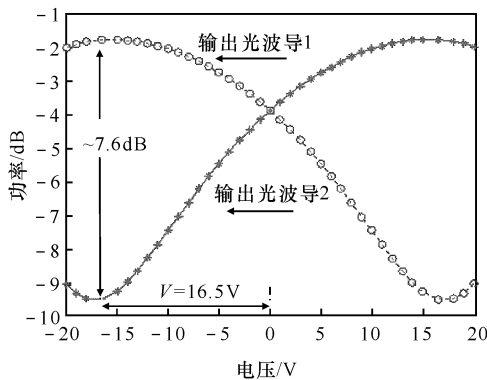


图7 1×2 EO-MMI 分束器的理论分析结果

Fig. 7 Theoretical results of 1×2 EO-MMI power splitter

4 结论

由于多模干涉的重叠成像原理, 1×2 EO-MMI 分束器可以以特定的分束比输出。而将有机聚合物与多模干涉器结合的 1×2 EO-MMI 分束器,在输出端的分束比可调。由于有机聚合物的电光系数 $\gamma^{33} = 50$ pm/V 较大,则 1×2 EO-MMI 分束器的可控电压偏小。 1×2 EO-MMI 分束器的分束比在 $V = 16.5$ V 时可在 7.6 dB 范围内可调。

参考文献:

- [1] ULRICH R, KAMIYA T. Resolution of self-images in planar optical waveguides [J]. Journal of the Optical Society of America, 1978, 68(6): 583-592.
- [2] JIANG X, LI X, ZHOU H, et al. Compact variable optical attenuator based on multimode interference coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(5): 2361-2363.
- [3] MACKIE D M, LEE A W. Slotted multimode-interference devices [J]. Applied Optics, 2004, 43(5): 6609-6619.
- [4] PAIAM M R, MACNONALD R I. Design of phased-array wavelength division multiplexers using multimode interference couples [J]. Applied Optics, 1997, 36(6): 5097-5108.
- [5] LEE S S, GARNER S M. Optical intensity modulator based on a novel electro optic polymer incorporating a high $\mu\beta$ chromophore [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(3): 527-532.
- [6] SHI Y, ZHANG C, ZHANG H, et al. Low (sub-1-volt) half wave voltage polymeric electro-optic modulators achieved by controlling chromophore shape [J]. Science, 2000, 288(4): 119-122.
- [7] SOLDANO L B, PENNING S E C M. Optical multimode interference devices based on self-imaging: principles and application [J]. Lightwave Technology, 1995, 13(6): 615-618.
- [8] BACHMANN, BESSE P A, MELCHIER H. Overlapping-image multimode interference couplers with a reduced number of self-images for uniform and nonuniform power splitting [J]. Applied Optics, 1995, 34(7): 6898-6900.
- [9] SOREFF R A, SCHIDTCHEN J, PETERMANN K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂ [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(5): 1971-1974.
- [10] GARNER S M, CITTES I S, HE M, et al. Polysulfone as an electro-optic polymer host material [J]. Applied Physics Letters, 2007, 84(6): 4156-4158.
- [11] THAPLIYA R, KIKUCHI T, NAKAMURA S. Tunable power splitter based on an electro-optic multimode interference device [J]. Applied Optics, 2007, 46(4): 4156-4158.
- [12] THAPLIYA R, KIKUCHI T, NAKAMURA S. Electro-optic multimode interference device using organic materials [J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 5409-5411.