

基于光学偏置的聚合物电光调制器研究

文 玥, 张晓霞, 刘华东, 黄春阳, 沈 杰
(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘 要:分析了两种使 Mach-Zehnder 调制器实现光学偏置的方法, 即路径非对称和折射率非对称的波导设计。采用有限差分束传播法(FD-BPM)对两种基于光学偏置的 Mach-Zehnder 型电光调制器进行了模拟仿真研究, 仿真结果显示两种光学偏置方法均实现了在转换函数的线性区域建立工作点的目标, 并且分别得到了 26 dB 和 23 dB 的消光比输出。

关键词:电光调制器; 光学偏置; 路径非对称; 折射率非对称

中图分类号: TN911.3 **文献标识码:** A

Investigation of the polymer electro-optic modulator based on optical bias

WEN Yue, ZHANG Xiao-xia, LIU Hua-dong, HUANG Chun-yang, SHEN Jie

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 641005, China)

Abstract: The path asymmetrical and refractive index asymmetrical design for optical waveguide methods have been introduced which can make the Mach-Zehnder modulator to achieve optical bias. The simulation studies of the two kinds of optical bias methods are based on finite difference-beam propagation method (FD-BPM). The results show that both the two methods can make the Mach-Zehnder modulators to be biased at half-power point in the most linear region. The initial phase difference of the two arms can reach around $\pi/2$, and the extinction ratios are 26 dB and 23 dB respectively.

Key words: electro-optic modulator; optical bias; path asymmetric; refractive index asymmetric

1 引 言

随着通信技术的飞速发展,尤其在微波光通信领域,信号频率的增加,调制器必须具有高速、宽带宽、低损耗等特性^[1-4]。以聚合物为材料的电光调制器在速率匹配方面有很好的特性,如 DR1/PMMA^[4],可以实现宽带宽的调制,目前已经报道的带宽可达到 150 GHz^[4]。聚合物具有很高的电光系数,是传统电光材料 LiNbO₃ 无法比拟的,可以高达 320 pm/V^[5],器件的半波电压很低,目前已有半波电压达到 0.65 V 的报道^[6]。

外调制器采用最为广泛的结构是马赫-曾德尔干涉型(Mach-Zehnder),本文对采用光学偏置设计聚合物 M-Z 调制器结构,改变两臂的光学路径或者改变两臂的折射率差,使得 M-Z 调制器两臂形成非

对称的结构,使两臂的固有相位差接近 $\pi/2$,并且使输出信号工作在最佳的线性区域内。

2 光学偏置的理论分析

所谓光学偏置是指采用光波导设计的方法使 M-Z 调制器的两臂之间产生 $\pi/2$ 奇数倍的相位差,在线性区域内建立工作点。两臂的初始相位差 Φ_0 为:

$$\Phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot \Delta L \quad (1)$$

其中, λ 为光波在真空中的波长; Δn 为 M-Z 两臂的有效折射率差; ΔL 为两臂的光程差。因此,实现光

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”新材料领域课题(No. 2009AA03Z413)资助。

作者简介: 文 玥(1982-), 博士研究生, 主要研究方向为光通信和集成光电器件。E-mail: wy0856@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-12-20

学偏置的方法主要有两种:一是路径非对称,通过改变两臂光程差 ΔL 来实现;一是折射率非对称,通过改变两臂等效折射率差 Δn 来实现。

路径非对称,即 M-Z 型调制器的两臂长度不等,根据式(1),要使两臂的初始相位差达到 $\pi/2$ 的奇数倍,两臂的光程差需为:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4n} (2M + 1) \quad (2)$$

其中, n 为波导的有效折射率; M 为非负整数。

折射率非对称,即两臂的有效折射率不等,当两臂的初始相位差达到 $\pi/2$ 的奇数倍时,两臂的有效折射率差值为:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{4L} (2M + 1) \quad (3)$$

其中, L 为两臂的有效光程。

通过比较零调制电压时的输出光强 I_0 和最大输出光强 I_{\max} 可反演计算出光学偏置的初始相位差 Φ_0 :

$$\Phi_0 = \arccos\left(2 \frac{I_0}{I_{\max}} - 1\right) \quad (4)$$

3 非对称 M-Z 结构的模拟

3.1 路径非对称

本文所模拟仿真使用的聚合物材料为:波导芯层材料为 DR1/PMMA,工作波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时的折射率为 $n_1 = 1.55$;下包层材料为 UV15,波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时折射率为 $n_2 = 1.501$;上包层材料为 UV11-3,波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时折射率为 $n_3 = 1.506$ 。

M-Z 干涉型强度调制器的两臂光程相同时,其初始相位差 Φ_0 为 0,可以通过改变两臂的光程差来调整其初始相位,这就是路径非对称 M-Z 干涉结构的设计思想,如图 1 所示。

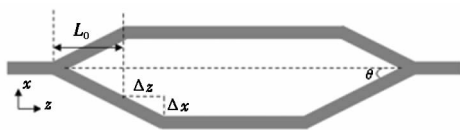


图1 路径非对称 M-Z 干涉结构

通过式(1),可计算出当两臂光程差为 $\Delta L = \lambda/(4n_1)$ 时, $\Phi_0 = \pi/2$ 。M-Z 调制器的分束角为 2θ ,过渡区长度为 L_0 。根据几何关系,可得 Δz , Δx 与 ΔL 之间满足关系式:

$$2\Delta z = \Delta L / (1/\cos\theta - 1) \quad (5)$$

$$2\Delta x = \Delta L \tan\theta / (1/\cos\theta - 1) \quad (6)$$

利用 FD-BPM 法进行脊型波导的光场传输仿真,脊型波导参数如下:对于 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\Delta L = 0.25 \mu\text{m}$, $\Delta z = 9159 \mu\text{m}$, $\Delta x = 48 \mu\text{m}$,长臂路径的平

行直波导长度为 20 mm ,脊波导宽度 $w = 4 \mu\text{m}$,脊高 $b = 0.5 \mu\text{m}$,芯层厚度 $d = 1.2 \mu\text{m}$,入射直波导长 2.5 mm ,分支波导过渡区长度 $L_0 = 6 \text{ mm}$,分束角 $2\theta = 1.2^\circ$,平行波导间距 $110.79 \mu\text{m}$,微带电极长度为 20 mm 。路径非对称 M-Z 调制器的仿真结果如图 2 所示,当电极上施加的调制电压为零时,归一化输出光功率为 0.512268 ,最大归一化输出光功率为 0.9746 ,最小归一化输出光功率为 0.002599 ,消光比为 26 dB ,器件的传输损耗约为 0.4096 dB 。根据式(1),光学偏置初始相位为 87.11° 。

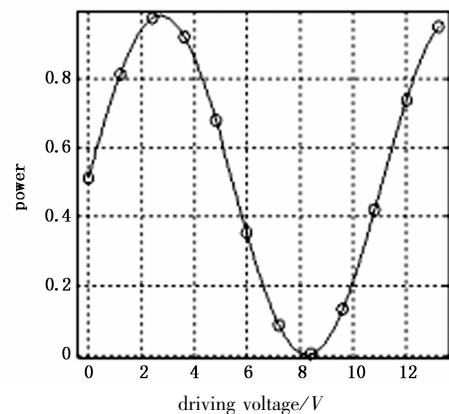


图2 路径非对称 M-Z 干涉结构光学偏置仿真

图 3 反映了两平行波导中的光强分布情况,横坐标为衬底的 x 方向,纵坐标为归一化光强,两平行波导的光强分别为 0.4955 和 0.4952 。图 4 描述了路径非对称 M-Z 干涉结构光学偏置的光场传输情况,入射光的光场分布为归一化的高斯分布。

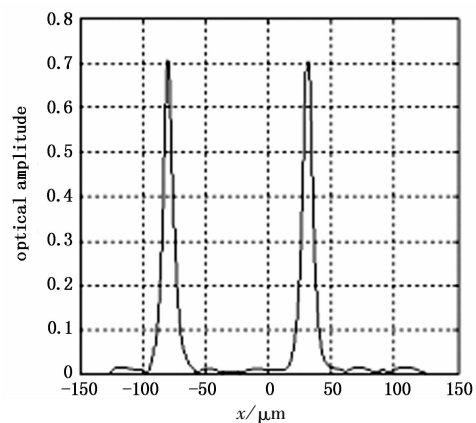


图3 两平行波导的光强分布图

对脊型波导进行 3 D 仿真,上包层厚度为 $4.3 \mu\text{m}$,下包层厚度为 $4 \mu\text{m}$,芯层波导为 $1.2 \mu\text{m}$,脊型波导高为 $0.5 \mu\text{m}$ 。通过脊型波导的 3D 模型进行模式分析,得到的模折射率为 1.5208 ,如图 5 所示为非等臂 M-Z 调制器的 TM_{00} 模场分布。

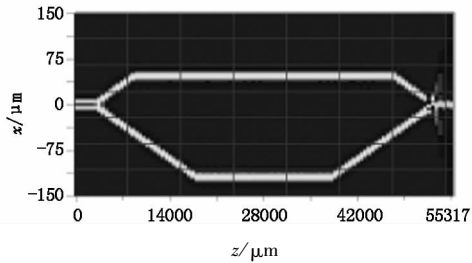


图4 路径非对称 M-Z 干涉结构的光场传输

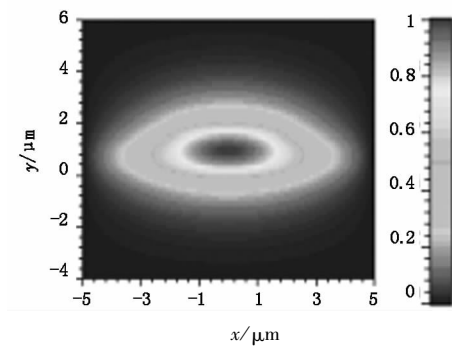


图5 TM_{00} 的模场分布

3.2 折射率非对称

根据式(3)可知,当两臂的折射率差达到 $\Delta n = \lambda/(4L)$ 时, M-Z 强度调制器两臂的初始相位差达到 $\pi/2$ 。改变两臂的折射率差的方法主要有两种: ①两臂选用适宜的具有不同折射率的电光材料, 并且折射率差满足要求; ②优化设计脊型波导结构(改变脊高或脊宽), 使两臂的有效折射率差满足要求。第一种方法要求选取两种不同的电光材料, 并且其折射率差到达要求, 还要考虑与包层材料间的兼容性, 这样的两种电光材料的制作和极化过程都比较复杂, 因此本文采用第二种方法。

两臂采用同一种聚合物电光材料, 当宽度不相等时, 两臂呈现的有效折射率存在差异, 合理设计两臂的宽度可以达到两臂 $\pi/2$ 的初始相位差。

采用与路径非对称相同的结构参数和聚合物材料, 即入射直波导 2.5 mm, 过渡区长度 $L_0 = 6.0$ mm, 平行波导长度为 20 mm(即微带电极长度), 分支波导分束角 $2\theta = 1.2^\circ$, 如图 6 所示。根据有效折射率法, 当波导分支 1 的宽度 $w_1 = 3 \mu\text{m}$ 时, 有效折射率为 $N_1 = 1.5259$; 波导分支 2 的宽度为 $w_2 = 4 \mu\text{m}$, 有效折射率为 $N_2 = 1.5268$ 。折射率差为 $\Delta n = N_2 - N_1 = 0.00089$ 。

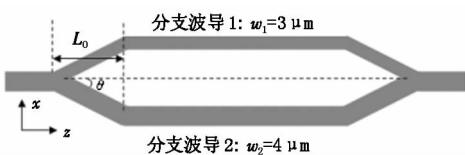


图6 折射率非对称 M-Z 干涉结构

仿真结果如图 7 所示, 当电极电压为零时, 折射率非对称 M-Z 干涉结构电光调制器的归一化输出光功率为 0.552338。改变调制电压, 归一化最小输出光功率为 0.004976, 归一化最大输出光功率为 0.96559, 消光比为 23 dB, 器件的传输损耗为 0.3828 dB。根据式(4), 由于计算精度误差, 光学偏置初始相位为 81.77° 。

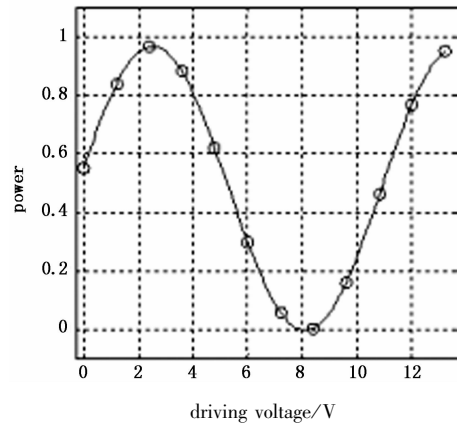


图7 折射率非对称 M-Z 干涉结构光学偏置仿真

平行波导的光场分布如图 8 所示, 横坐标为衬底的 x 方向, 纵坐标为归一化光强。波导分支 1 的归一化光强为 0.4307, 波导分支 2 的归一化光强为 0.5642。由于两波导的脊型宽度不等, 有效折射率有差异, 传输常数不同, 导致光波损耗不相等, 两臂光强差异较大。图 9 描述了折射率非对称 M-Z 干涉结构光学偏置光场传输情况。

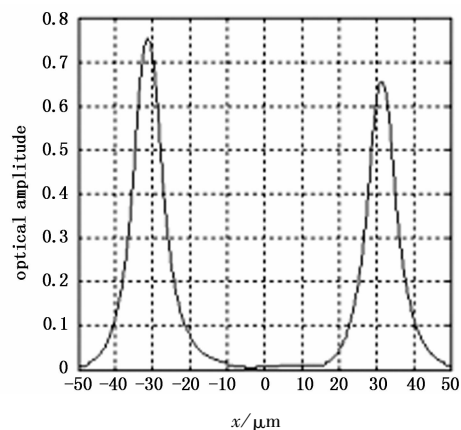


图8 平行波导处的光强

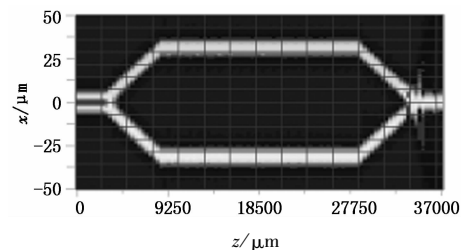


图9 折射率非对称 M-Z 干涉结构光场传输图

折射率非对称 M-Z 干涉型调制器的两臂脊波导设计成不同的宽度,因此两臂的模场分布和传输常数不相同,图 10 比较了两波导分支 TM_{00} 模的模

场分布。3D 模拟同样采用 FD - BPM 法,脊波导结构参数为上包层厚度为 $4.3 \mu\text{m}$,下包层厚度为 $4 \mu\text{m}$,芯层波导为 $1.2 \mu\text{m}$,脊型波导高为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

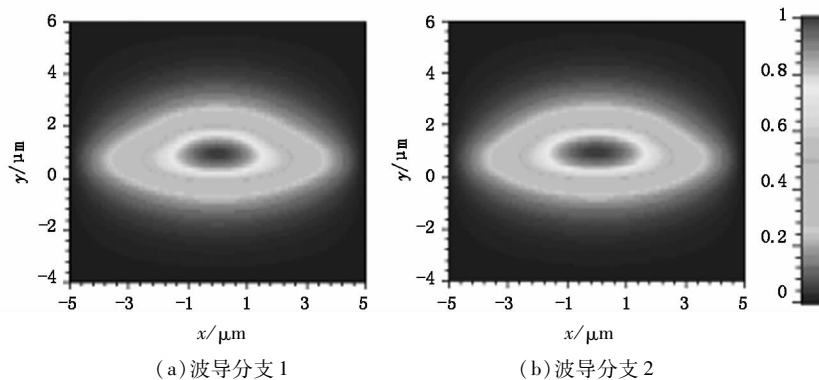


图 10 波导分支 1 ($w_1 = 3 \mu\text{m}$) 和波导分支 2 的 TM_{00} 模式 ($w_2 = 4 \mu\text{m}$)

4 非对称 M-Z 设计性能

采用 FD - BPM 算法,前文对两种基于光学偏置的非对称 M-Z 结构进行了模拟仿真,比较结果如表 1 所示,两种结构均能在 $\pi/2$ 附近建立工作点。由于在理论计算过程中忽略了聚合物材料的介质损耗,传输损耗较小,消光比也仅能达到 26 dB,这主要是由两臂的光功率差异引起的。然而在实际聚合物波导的制作工艺中,材料的介质损耗与聚合物的极化技术和制作工艺有很大关系,不得不考虑聚合物波导的介质损耗。在介质损耗较大时,非对称 M-Z 两臂的光功率差异会很大,有可能在第二个 3 dB 分支波导处不满足干涉条件,器件的消光比会比较小。因此,非对称 M-Z 的研究受聚合物波导制作工艺的限制,还仅处于理论阶段。

表 1 两种非对称 M-Z 结构的性能比较
(忽略介质损耗)

	零驱动电压归一化光功率	消光比 /dB	偏置相位 /($^\circ$)	传输损耗 /dB
路径非对称	0.51	26	87.11	0.4096
折射率非对称	0.55	23	81.77	0.3828

5 结论

本文介绍了 M-Z 调制器的偏置原理,提出了两种光学偏置的方法:路径非对称和折射率非对称,并

针对这两种方法设计了两种非对称的 M-Z 型结构,两臂的固有相位差接近 $\pi/2$,初步实现了 M-Z 调制器调制曲线的最佳线性区域内建立工作点的目标,但是由于实际工艺中存在介质损耗,非对称 M-Z 的消光比很难提高,其研究仅限于理论阶段。

参考文献:

- [1] C T DeRose, D Mathine, Y Enami, et al. Electrooptic polymer modulator with single-mode to multimode waveguide transitions [J]. IEEE Photon Technol. Lett., 2008, 20, 1051 - 1053.
- [2] R Dinu, D Jin, G Yu, et al. Environmental stress testing of electro-optic polymer modulators [J]. J. Lightw. Technol., 2009, 27: 1527 - 1532.
- [3] D Chen, H R Fetterman, A Chen. Demonstration of 110 GHz electro-optic polymer modulator [J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(25): 3335 - 3337.
- [4] M Lee, H E Katz, C Erben, et al. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer [J]. Science, 2002, 298: 1401 - 1403.
- [5] T D Kim, J W Kang, J Luo, et al. Ultra-large and thermally stable electro-optic activities from supramolecular self-assembled molecular glasses [J]. J. Amer. Chem. Soc., 2007, 129: 488 - 489.
- [6] Y Enami, D Mathine, C T DeRose, et al. Hybrid cross-linkable polymer/sol-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1550 nm [J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91: 093505 - 1 - 093505 - 3.