

文章编号: 0258-7025(2002)03-0209-04

X 切 LiNbO₃ 脊形结构集成电光 M-Z 型调制器

陈福深, 李其聪

(电子科技大学光纤通信国家重点实验室, 四川成都 610054)

提要 采用 X 切 LiNbO₃ 基片, 设计并研制了脊形结构集成电光 Mach-Zehnder(M-Z)波导调制器, 实验研制过程包含关键的 LiNbO₃ 基片湿腐蚀刻槽技术和大厚度电极制作技术。研究结果表明, 脊形结构调制器与传统的平面结构调制器相比, 在大幅度提高调制带宽方面, 有着明显的优越性。

关键词 脊形结构, 电光调制器, X 切 LiNbO₃, M-Z 型干涉仪

中图分类号 TN 761 文献标识码 A

Integrated Electrooptic M-Z Modulator with Ridge Structure in X-cut LiNbO₃

CHEN Fu-shen LI Qi-cong

(National Key Optic Fiber Lab, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

Abstract An integrated electrooptic Mach-Zehnder modulator with ridge structure has been designed and fabricated by using X-cut LiNbO₃ substrate. The key techniques of LiNbO₃ wet etching and large thick electrode fabricating are contributed to form the ridge structure for the modulator. Experimental results show that the ridge-type optical modulator has much more obvious advantages in increasing the modulation bandwidth compared with a conventional modulator with planar structure.

Key words ridge structure, electrooptic modulator, X-Cut LiNbO₃, Mach-Zehnder interferometer

1 引言

光调制的主要作用是光的强度调制, 近年来国外针对常用的 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪强度调制器, 采取在 LiNbO₃ 基片上刻槽, 并保留集成光波导部分, 使两个分支光波导位置相对上升, 形成脊形结构。其结果使电极的厚度加大, 从平面电极变为立体电极结构, 既能解决三电极共面波导(CPW)特征阻抗达到标准 50 Ω 的难题, 又使微波折射率大大降低且与光波折射率相等, 使光波和微波之间的速度匹配, 微波信号源与 CPW 电极之间的阻抗匹配达到较为理想的状态^[1]。

本文研制的新型超高速集成电光调制器, 是采用 X 切 LiNbO₃ 基片在实验室条件下制作的 M-Z 干涉仪强度调制器。现在, 国内外研制的 M-Z 型调制器, 绝大多数都是使用 Z 切 LiNbO₃ 基片, 工作在电极电场的垂直分量上, 以求利用最大电光张量系数。

但是, Kim 和 Ramaswamy^[2]已经从理论上证明, 在 X 切 LiNbO₃ 基片上制作 M-Z 型调制器, 利用电场的水平分量, 能够使电极电场与光波电场分量之间相互作用的重积分因子加大。由于 X 切基片上的电极位置不同于 Z 切基片, 所以还需要更加完善的器件结构设计, 以保证实现高速调制。

2 调制器的设计

2.1 光波导设计

采用 Mach-Zehnder 干涉仪结构的光波导设计如图 1 所示。图中除标注的尺寸外, 还有光波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $l = 3 \text{ mm}$, $w = 8 \mu\text{m}$, $h = 10 \mu\text{m}$ 。之所以设计光波导宽度 $w = 8 \mu\text{m}$, 是因为在半导体激光器的输出光波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的条件下, 必须保证形成该波长下的单模导波。另外, 为了获得较小损耗的光波导, 两分支光波导的弯曲部分应满足余弦曲

收稿日期 2000-12-22; 收到修改稿日期 2001-03-06

作者简介 陈福深(1945—), 男, 电子科技大学光纤通信国家重点实验室教授, 博士生导师, 主要从事集成光学与光电子技术的研究。E-mail: fchen@uestc.edu.cn

线方程

$$z = \frac{h}{2} \left[1 \pm \cos\left(\frac{\pi y}{l}\right) \right] \quad (1)$$

两分支波导平行段的间距为 $20 \mu\text{m}$, 目的在于有较大的消光比。图 1 中 LiNbO_3 基片为 X 切, 在干涉仪波导下方还设计了一个宽度相同的直波导, 它与调制器无关, 其作用是为了与 Mach-Zehnder 干涉式光波导对比光波导损耗。设计时需注意使直波导与器件波导的距离远大于波导间的耦合间距, 确保直波导与器件波导之间的耦合趋于零。

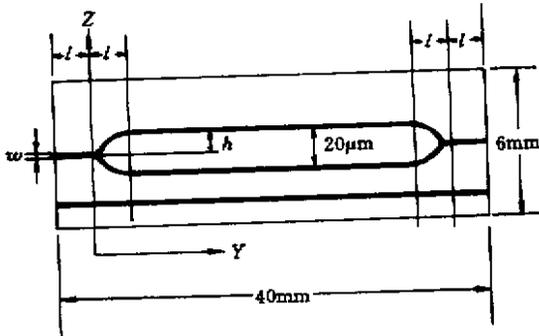


图1 Mach-Zehnder干涉式光波导

Fig.1 Mach-Zehnder interferometer

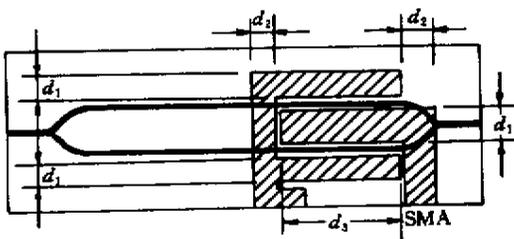


图2 直流偏置电极

Fig.2 DC bias electrodes

2.2 电极设计

调制器的电极分成两部分, LiNbO_3 基片的左边为行波电极, 右边为直流偏置电极, 如图 2 所示。图 2 中 $d_1 = 20 \mu\text{m}$, $d_2 = 100 \mu\text{m}$, $d_3 = 10 \text{mm}$, 这里 d_3 就是直流偏压与光波导的作用长度。由于直流偏置电极仅工作在直流 ($f = 0 \text{Hz}$) 状态, 不存在工作带宽的问题, 所以设计为集总参数的对称结构, 电极与光波导表面在一个平面上, 电极厚度也无特殊要求。在 LiNbO_3 基片的光波导上面设计专门的直流偏置电极, 再与外壳的 SMA 型高频连接器连接, 实现单独的一个 SMA 接口供电, 避免了使用隔直电容与微波信号源时共同使用一个 SMA 接口供电的问题。因为本器件设计工作频率范围是 $0 \sim 16 \text{GHz}$, 隔直电容对高频信号的反射将会严重破坏行波电极的传

输特性。

CPW 结构的行波电极如图 3 所示, 这是典型的对称三电极结构, 中间电极与微波信号输出的 SMA 接口(左边)的芯片连接, 两个边电极接地(封装金属盒)。同时, 还要把图 2 中直流偏置电极左侧接地端与图 3 行波电极右侧接地端焊接在一起, 以保证直流电极入地。

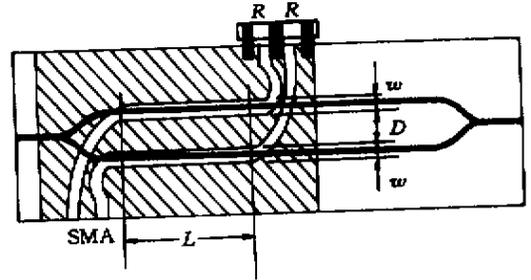


图3 CPW行波电极

Fig.3 Traveling-wave electrodes with the coplanar waveguide type

2.2.1 行波电极阻抗

依据图 1 所示的光波导结构, 可以知道行波电极的 $w = 8 \mu\text{m}$, $D = 20 \mu\text{m}$, 所以 $w/D = 0.4$, 依照通常的对称三电极特征阻抗的计算公式与曲线^[3], 在 $w/D = 0.4$ 时, 特征阻抗 $Z_0 = 16 \Omega$, 这就需要两只 $R = 32 \Omega$ 的高频片式电阻焊接在行波电极的输出端, 形成并联电阻, 如图 3 所示。

2.2.2 驱动电压

驱动电压一般用最小直流半波电压 V_π 表示

$$V_\pi = \frac{\lambda w}{n^3 r_{33} L \Gamma} \quad (2)$$

这里 λ 为光波长, w 为电极间距, n 为光折射率, L 为电光作用长度, r_{33} 为电光系数, Γ 为电场与光波电场之间的重积分因子^[4]

$$\Gamma = \frac{w}{v} \iint_{-\infty}^{\infty} |E| |E'| | dA \quad (3)$$

式中, E' 为归一化的光波电场分布函数, E 为电极电场分布函数。经过计算^[2,5], 得到 $V_\pi \approx 5.8 \text{V}$ 。

2.2.3 调制带宽

调制带宽主要取决于微波折射率与光波导中导模的有效折射率之差, 而这两种折射率又与电极和光波导的结构形式直接相关^[6]。图 4 为电光作用范围内的基片截面图。如果不存在脊形光波导结构, 电极表面与波导脊表面几乎一样高, 则图 4 中 $H = 0$, $T_e \approx 0$, 那么微波折射率就是 4.25; 当 $H = 2 \mu\text{m}$, $T_e \approx H$ 时, 微波折射率增至 4.2984, 使调制带宽从

15.7 GHz 降至 15.1 GHz。所以 , 只有加大电极厚度 , 使其表面高于光波导脊表面 , 才能降低微波折射率。如果我们设计的电极厚度 $T_e = 6 \mu\text{m}$, 如图 4 所示 , 此时微波折射率降至 4.1239 , 相应的调制带宽为 16.5 GHz。当然 , 还可以继续增加电极厚度 , 如 $T_e = 20 \mu\text{m}$, 此时的微波折射率基本上接近光波折射率 $n = 2.286$, 但是由于电极与光波导脊的高度差明显加大 , 重积分因子会急剧减小 , 其结果是过大的半波电压 , 这是器件设计所不允许的。

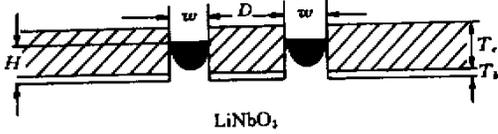


图 4 电光作用范围内的基片截面图

Fig.4 Cross section in the range of electrooptic interaction

为了形成脊形结构的光波导和较大厚度的电极 , 必须在图 3 中的电光作用范围 L 内 , 对 LiNbO_3 基片进行腐蚀刻槽 , 如图 4 所示 , 这里 $w = 8 \mu\text{m}$, $D = 20 \mu\text{m}$, 电极厚度 $T_e = 6 \mu\text{m}$, 下面的 SiO_2 缓冲层厚度 $T_b \approx 0.3 \mu\text{m}$ 。在电极与基片间增加一层 SiO_2 , 目的在于减少器件的热漂移和直流漂移。脊波导表面的高度 $H = 4 \mu\text{m}$ 。

3 调制器的制作与测试

由于 LiNbO_3 晶体的电光张量系数 γ_{33} 远大于 γ_{22} , 所以我们采用 X 切 Y 方向传输的 LiNbO_3 作为制作器件的基片 , 主要的实验室制作过程如下。

3.1 光波导的制作

光波导采用钛扩散技术制作 , 将基片清洗烘干后 , 在其上蒸上一层钛膜 , 厚度为 $0.08 \mu\text{m}$, 光刻腐蚀后保证形成光波导的钛条宽度为 $8 \mu\text{m}$ 。然后把覆盖有与图 1 所示光波导图形完全相同的钛条的 LiNbO_3 基片放入扩散炉内 , 扩散时间 8 h , 扩散温度 1050°C , 扩散过程中需不断加入带有水蒸气的氧气 , 流量为 $1 \text{ L}/\text{min}$ 。

3.2 基片的腐蚀刻槽^[4,7]

把两端面研磨好的 LiNbO_3 基片清洗干净后 , 放入电子束蒸发台内蒸金属 Cr , 厚度为 $0.08 \mu\text{m}$, 然后光刻出与波导相同的图形 , 腐蚀掉不需要的 Cr 金属层。这样的结果 , 使制作好的 M-Z 型光波导全部被 Cr 金属覆盖 , 然后将掩膜好的基片放进氢氟酸 (HF) 加上双氧水 (H_2O_2) 的容器内 , 加热至 90°C , 时间为 2

h 即可得到凸现在基片表面上高度约 $4 \mu\text{m}$ 的脊形光波导。最后 , 再将覆盖光波导的 Cr 金属腐蚀掉。

3.3 蒸 SiO_2 缓冲层

用 PCVD 法蒸 SiO_2 缓冲层 , 厚度为 $0.25 \mu\text{m}$, 然后再用 PCVD 法蒸一层 Si-O , 厚度约为 $0.08 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

3.4 电极制作

将基片清洗后 , 放入电子束蒸发台内蒸 Cr 和 Au , Cr 的厚度控制在 $0.05 \mu\text{m}$ 左右 , Au 的厚度控制在 $0.08 \mu\text{m}$ 左右 , 然后使用行波电极掩膜板 , 光刻出电极图形 , 再腐蚀掉多余的金属 , 再次进行光刻 , 使用粘稠度较大的光刻胶 , 然后电镀加厚 Au 金属层。之后 , 需再光刻和电镀 1 ~ 2 次 , 基本上可以保证行波电极的厚度达到 $6 \mu\text{m}$, 形成如图 4 所示的立体结构的大厚度行波电极。直流偏置电极的制作与行波电极制作过程相同 , 因工作在直流状态且无功率消耗 , 所以没有必要再进行电镀。

完成上述工作后 , 采用硅 V 型槽倒装耦合方式 , 实现两集成光波导端面与单模光纤的耦合 , 再焊接匹配负载电阻和 SMA 接头 , 最后用设计好的铝盒封装 , 便成为一个完整的器件。

3.5 测试结果

工作波长 $1.55 \mu\text{m}$, 插入损耗 3.0 dB , 半波电压 10.7 V , 消光比 18 dB , $\pm 3 \text{ dB}$ 带宽 9.1 GHz。插入损耗、半波电压、消光比的测试条件与原理如图 5 所

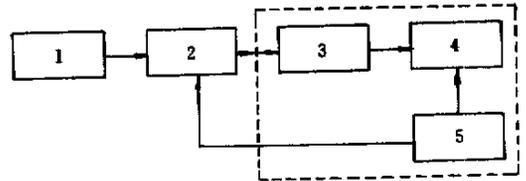


图 5 调制器参数测试原理图

- 1 稳定化光源 2 被测调制器件 ;
- 3 光功率计 4 示波器 5 电信号源

Fig.5 Experimental setup for measuring the parameters of modulator

- 1 : stabilized LD ; 2 : integrated modulator ;
- 3 : optical power meter ; 4 : oscilloscope ; 5 : DC supply

示,若把图 5 右边的虚线部分改成光波元件分析仪(HP854320A 型),则表示为调制器的带宽测试。带宽测试结果用器件的 S_{21} 参数曲线表示,如图 6 所示。

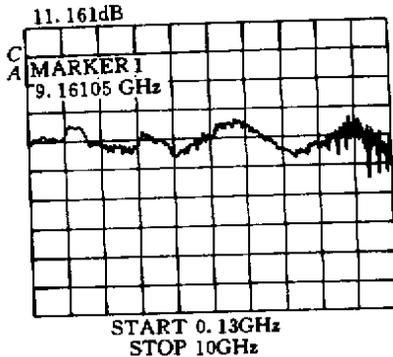


图 6 调制器的频响特性(S_{21})

Fig.6 Bandwidth curve of the modulation transmitted power(S_{21})

4 讨论与总结

详细分析和介绍了 X 切 LiNbO_3 脊形结构集成电光调制器的设计和制作技术。集成光学的难度在于实验室制作技术,本文研制的调制器主要有 LiNbO_3 基片的湿腐蚀刻槽技术、钛扩散光波导技术、大厚度电极制作技术等。其中以 LiNbO_3 晶体的腐蚀技术最为重要,因为它是形成脊形光波导的关键保障技术。本文的主要工作为:

1) X 切 LiNbO_3 晶体面上形成脊形结构光波导后,造成在晶体表面腐蚀后的凹陷处制作大厚度电极的条件,与传统的平面结构相比,形成 CPW 的三

电极传输行波时,由于占有了较多的空气空间作为介质,因此它的行波相速大大提高,朝接近光波相速的途径上迈出了关键的一步,这为根本上解决微波与光波的失配问题提供了行之有效的方法。

2) 我们研制的器件,由于中间电极较宽 $D = 20 \mu\text{m}$,未能使电极阻抗达到标准的 50Ω ,导致微波信号传输反射加剧,而且频率越高反射越严重,这是器件测试带宽(9.1 GHz)未能达到设计带宽(16.5 GHz)的原因。如在此基础上改进设计与工艺,半波电压还可以减小,带宽达到 $0 \sim 25 \text{ GHz}$ 是没有问题的。

参 考 文 献

- 1 K. Noguchi, H. Miyazawa, O. Mitomi. 75 GHz broadband Ti: LiNbO_3 optical modulator with ridge structure [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12):949 ~ 951
- 2 C. M. Kim, R. V. Ramaswamy. Overlap integral factors in integrated optic modulators and switches [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(7):1063 ~ 1070
- 3 Chen Fushen. Theory and Technology of Integrated Electro-optic Modulations [M]. Beijing: New Times Press, 1995. 135 ~ 145 (in Chinese)
- 4 S. J. Chang, C. L. Tsai, W. S. Wang *et al.*. Improved electrooptic modulator with ridge structure in X-cut LiNbO_3 [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5):843 ~ 847
- 5 C. Wei, R. F. Harrington, J. R. Mautz *et al.*. Multiconductor transmission lines in the presence of a dielectric media [J]. *IEEE MTT*, 1984, **32**(4):439 ~ 450
- 6 R. C. Alferness. Waveguide electrooptic modulators [J]. *IEEE MTT*, 1982, **30**(8):1121 ~ 1137
- 7 R. S. Cheng, T. J. Wang, W. S. Wang. Wet-etched ridge waveguides in y-cut lithium niobate [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10):1880 ~ 1885