

15 GHz 马赫-陈德尔型 Ti:LiNbO₃ 行波幅度电光调制器*

吴伯瑜 张知恒 许广俊

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 比较了四种马赫-陈德尔调制器的结构特性, 表明 Z 切共面波导(CPW)是最好的一种结构。用阶跃倒相电极设计了新型电光光波导幅度调制器, 研制了包装式带尾光纤的有 5 段倒相电极的马赫-陈德尔调制器。在 1.532 μm 波长上, 该器件调制带宽为 14.8 GHz, 半波电压为 14 V, 消光比为 21.3 dB, 光纤-器件-光纤插入损耗 7.6 dB。

关键词 电光调制器, 铌酸锂器件, 光波导调制器。

1 引 言

光源的高速内, 外调制技术是光纤通信的一个重要研究分支。由于掺铒光纤放大器的研制成功, 大大地提高了强度调制-直接检测(IM-DD)制式在光纤通信系统中的重要性。高速光波导 Ti:LiNbO₃ 幅度电光调制器是实现高速光外调制的优选器件, 倍受各科研机构和公司的重视。特别是在光孤子通信系统中, 目前在高重复频率下(几 GHz-几十 GHz), 光孤子源只能产生周期性脉冲, 因而外部信息只能通过高速外调制器去调制光孤子链。本文介绍作者研制的带尾光纤、包装式 15 GHz 倒相电极马赫-陈德尔型 Ti:LiNbO₃ 行波幅度电光调制器, 其工作波长为 1.55 μm 。

2 设计考虑

总体结构设计中, 考虑到要求调制带宽为 15 GHz 和便于光波导器件的制作, 选用行波型马赫-陈德尔干涉仪结构形式。并采用倒相电极系统以补偿光波与调制微波之间的速度失配, 从而达到既有较高的调制带宽, 又有较低开关电压的目的。选用调制器最佳结构和横向尺寸的选择是器件设计中一个重要问题。马赫-陈德尔型 Ti:LiNbO₃ 电光调制器的行波电极有两种形式: 非对称微带线(简称 ASL)和共面波导(简称 CPW), 配合选用两种切向 LiNbO₃(X 切和 Z 切)晶片上制作光波导, 构成图 1 所示的四种器件结构。对四种结构作了大量计算, 并以驱动功率作比较标平, 得到各种结构最小驱动功率点的尺寸和参量列于表 1。

* 本课题得到 863 高技术计划资助。

收稿日期:1994 年 4 月 22 日; 收到修改稿日期:1994 年 6 月 27 日

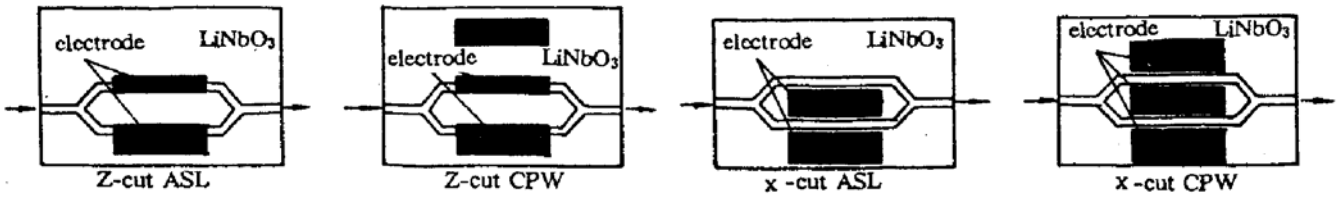


Fig. 1 Four kinds of M-Z type electro-optical modulator configurations

Table 1.

structure	Z cut CPW	X cut CPW	Z cut ASL	X cut ASL
driving power (W)	0.311	0.334	0.413	0.610
switch voltage (V)	10.4	9.0	13.2	14.0
characteristic (Ω)	43.9	31.8	52.5	40.5
W (μm)	8	14	9	11
G (μm)	18	10	18	7

在计算中作以下近似：1) LiNbO_3 上缓冲层 SiO_2 厚度为 0；2) 不考虑电极厚度，即电极为无限薄；3) LiNbO_3 无限厚。光波长为 $1.523 \mu\text{m}$ ，光波导中光模场半径为 $7 \mu\text{m}$ ，电光相互作用区为长度 $L = 10 \text{ mm}$ 的直电极系统。在驱动功率最小的结构尺寸附近，四种结构所需驱动功率与电极间隙 G ($W = 10 \mu\text{m}$)、电极宽度 W ($G = 20 \mu\text{m}$) 相应关系如图 2 所示。由图 2 可见 ASL 电极所需驱动功率偏高，CPW 电极的 Z 切和 X 切所需最小驱动功率较低，并且比较接近，尤以 Z 切 CPW 电极结构为最佳，本文设计的调制器就是选用这种结构。考虑到细长中心电极在电镀金加厚工艺中的难度，最终选用 $W = 13 \mu\text{m}$ ， $G = 23 \mu\text{m}$ 的横向尺寸。

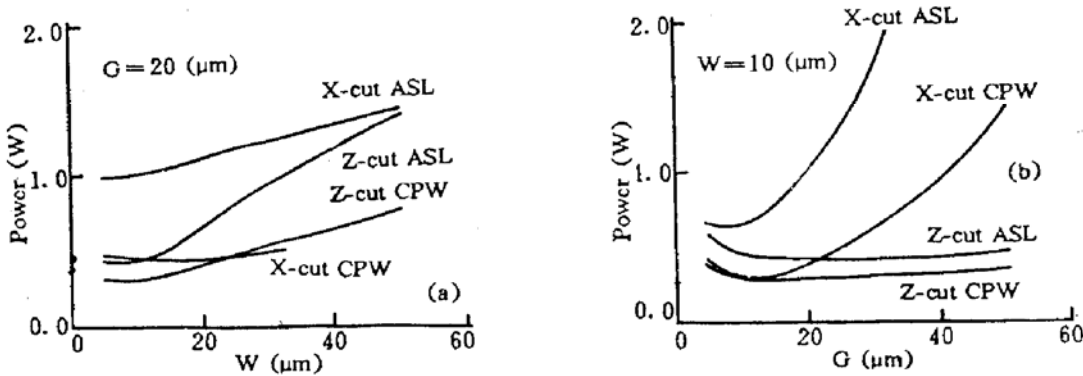


Fig. 2 (a) Drive power versus the width W of central electrode at $G = 20 \mu\text{m}$, (b) drive power versus the gap G at $W = 10 \mu\text{m}$ for four kinds of modulator configurations

电极的纵向尺寸是限制调制带宽的重要因素，利用倒相电极可以补偿光波与微波之间的速度失配对电极长度的限制^[1]，已有实验结果发表。Dolfi 等人用 7 分段 13 bit Barker 码倒相电极，在 $1.3 \mu\text{m}$ 获得 3 dB 带宽为 10 GHz、半波电压 7.5 V 的结果^[2]。Betts 用 3 分段和 6 分段周期倒相电极^[3]，在 $1.3 \mu\text{m}$ 制作了中心频率为 10 GHz 和 21 GHz 的带通型调制器，3 dB 带宽分别为 7 GHz 和 8 GHz。他们所用的倒相电极在每段上电光重叠积分 Γ 的绝对值是完全相同的。依据作者提出的倒相电极系统的设计理论^[4]，设计了如图 3 所示的每分段上 Γ 绝对值不相同的电光调制器。考虑到现有的 LiNbO_3 晶片尺寸，选用了 5 分段倒相电极，每分段长 5 mm，以保证有 15 GHz 的调制带宽，电极作用区总长 25 mm。考虑到电极系统传输的是的微

波损耗, 最终选用了电光重叠积分 Γ 值在各段的相对分布为 -0.895 、 1 、 0.325 、 0.325 、 0.286 , 由此确定了每段电极与光波导的相对尺寸。在此 Γ 分布下, 微波损耗系数 $\alpha_0 = 1.4 \text{ dB/cm} \cdot \text{GHz}^{1/2}$ 时, 理论计算有频率响应曲线在图 4 中给出, 图中亦给出作用区长 5 mm 的直电极调制器的频响应曲线, 可以看到倒相电极调制器 3 dB 带宽 18.5 GHz 大于直电极调制器的带宽 15.6 GHz , 并有高的调制效率。特别在高频端, 其优点更为明显。设计的倒相电极调制器 3 dB 带宽为 18.5 GHz 是为了补偿一些不可计算因素, 预期可制出 15 GHz 带宽的器件。

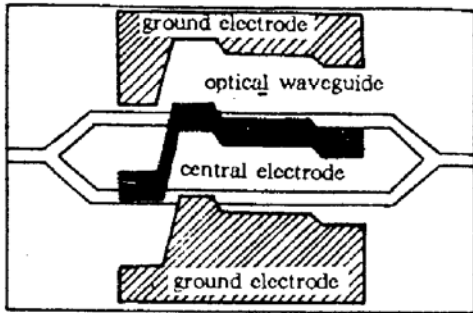


Fig. 3 Schematic diagram of M-Z type Ti : LiNbO₃ electro- optical modulator with phase reversal electrode

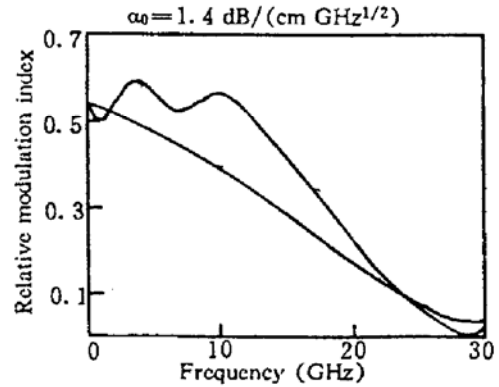


Fig. 4 The comparison of theoretical frequency response relative modulation index between modulators with phase reversal electrode and straight electrode

3 制作与测试

器件制作在 Z 切 LiNbO₃ 晶体的一 Z 面上, 用射频溅射钛膜, 膜宽为 $9 \mu\text{m}$, 厚 78 nm , 在干氧气氛、 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温中扩散 6.5 hr , 得到单模光波导, 波导分叉角为 1° 。然后再溅射 200 nm 厚的 SiO₂ 缓冲层, 最后套刻用电镀法制成的厚 $3 \mu\text{m}$ 左右的金倒相电极。LiNbO₃ 晶体两端经光学磨抛后, 装在带有 SMA 微波同轴插头的铜架上, 光波导两端用紫外曝光胶粘上 Corning 公司单模光纤, 成为带尾光纤的实用器件。

低频 (1 kHz) 下测出调制器的开关电压为 14 V 。改变电极上的直流电压, 用光功率计测得消光比为 21.3 dB , 光纤-器件-光纤的插入损耗为 7.6 dB 。用低频替代法测得相对强度调制系数的频率响应曲线如图 5 所示, 由此得到 3 dB 带宽为 14.8 GHz 。

结 论 用新型分段阶跃倒相电极制作了调制带宽为 14.8 GHz 、开关电压为 14 V 、消光比为 21.3 dB 、光插入损耗为 7.6 dB 的马赫-陈德尔型 Ti:LiNbO₃ 行波幅度电光调制器。

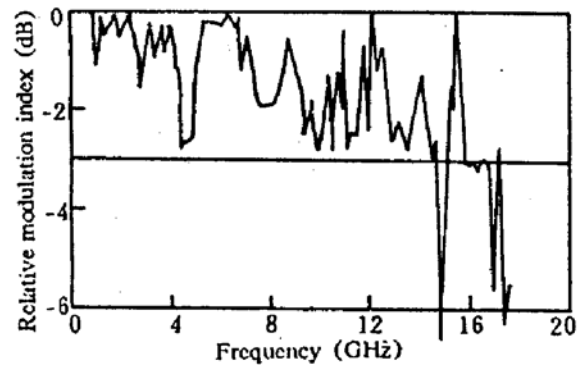


Fig. 5 Experimental frequency response of relative modulation index for the modulator with phase reversal electrode

参 考 文 献

- [1] R. C. Alferness, Waveguide electrooptics modulators. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology*, 1982, **MTT-30**(8) : 1121~1137
- [2] D. W. Dolfi, M. Nazarathy, R. L. Jungerman, 40 GHz electro-optic modulator with 7.5 V drive voltage. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(9) : 528~529
- [3] G. E. Betts, Microwave bandpass modulators in lithium niobate. *Integrated and Guided-Wave Optics 1989 Technical Digest Series*, 1989, 4 : MAA 4~1 (Integrated and Guided-Wave Optics Topical Meeting, Houston, Texas, U. S. A. Feb. 1989)
- [4] 吴伯瑜, 张 京, 邵晓风等, 宽频带行波型电光调制器阶跃倒相电极系统的设计. *通信学报*, 1993, **14**(1) : 69~73
- [5] S. Uehara, Calibration of optical modulator frequency response with application to signal level control. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(1) : 68~71

15 GHz Mach-Zehnder Ti:LiNbO₃ Electron-Optic Travelling-Wave Amplitude Modulator

Wu Boyu Zhang Zhiheng Xu Guangjun

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 22 April 1994; revised 27 June 1994)

Abstract The characteristics of four kinds of M-Z modulator configurations have been compared, and the Z-cut coplanar waveguide structure is the best. Using the step phase reversal electrode structure, we have designed a new type electro-optical waveguide amplitude modulator. Packaged and pigtailed phase-reversal M-Z modulators including 5 sections of electrode have been manufactured. The device with 14.8 GHz modulation bandwidth, half wave voltage of 14 V, extinction ratio of 21.3 dB and fiber-device-fiber insertion loss of 7.6 dB at 1523 nm is obtained.

Key words electro-optic modulator, Ti:LiNbO₃ device, optic waveguide modulator.