

新型结构超宽带 LiNbO_3 电光调制器的优化设计^{*}

高致慧 甘庆云 万俊康

(深圳大学师范学院;深圳大学工程技术学院,深圳 518060)

摘 要 采用有限元软件对新型结构的铌酸锂电光调制器进行了优化设计.分析表明,采用脊波导和 T 型电极相结合的方式,能在保持高的特征阻抗的同时有效的实现相速匹配和有效降低电极损耗,从而较好的提高器件性能,是一种比较有潜力的调制器.利用优化结果,给出一种带宽达 153 GHz,半波电压为 8.55 V,特征阻抗为 44 Ω 的调制器的设计例子.

关键词 LiNbO_3 电光调制器;行波电极;脊波导;T 型电极

中图分类号 TN761 **文献标识码** A

0 引言

在高速长距离光通信系统中,电光调制器是必不可少的关键器件.高速光调制器可以分为内调制和外调制两种.由于半导体激光器直接调制存在调制带宽不易提高,高速调制时激光稳定性差,啁啾现象严重等缺点,因此,外调制成为光调制器的主要手段.

目前使用的光外调制器主要有: LiNbO_3 M-Z 型电光调制器、电子吸收型半导体调制器和高速聚合物电光调制器.较之其他两种调制器而言, LiNbO_3 电光调制器具有频带宽、稳定性好、可以获得较高的信噪比,且光传输损耗小、电光系数高、易于和光纤兼容、制作工艺难度小等优点.因此,当前国内外针对 LiNbO_3 电光调制器的工作大量展开,许多优化结构被不断提出,调制器的各参量指标也得到了很大的改善.行之有效的优化结构主要有:埋入式电极^[1]、T 型电极^[2]、脊波导结构^[3]等,并由此引出一系列分析计算方法,由早先的保角变换法、镜像法、逐点近似法^[4]到线元法、有限差分法^[5]等,使得 LiNbO_3 电光调制器理论更趋成熟.

本文综合考虑各种优化结构,并将目前较为实用的 T 型电极结构与脊波导结构相结合,采用 T 型电极结构以灵活的实现相速匹配并有效地降低电极损耗,采用脊波导结构以有效地降低调制器的微波等效折射率,采用有限元分析软件 ANSYS 进行结构数据分析.最后对所得数据进行处理优化,得到能更好的改善调制器带宽、特征阻抗的设计结构.

1 调制器各参量计算分析

调制器的设计应考虑四个方面^[6]:微波和光波

的相位速度匹配、低微波电极损耗、低半波电压和与驱动源特性阻抗匹配.

限制行波型电光调制器带宽的主要因素是相速匹配和电极损耗.已知其带宽长度乘积^[7]

$$\Delta f L = \frac{2}{\pi} \frac{c}{N_m - n_e} \quad (1)$$

N_m 为调制器件中微波信号传播的等效折射率, n_e 为器件中光信号传输的等效折射率 (光波长 1.55 μm 时 $n_e = 2.14$).在相速匹配的情况下,调制器的带宽满足

$$a_0 \sqrt{\Delta f_{3\text{dB}} L} = 13.8 \text{ dB} \quad (2)$$

式中, a_0 为调制器的损耗系数.由增量电感公式,并考虑到对于 LiNbO_3 这种非磁性介质材料,单位长度上的电感可由介质被空气取代后电极系统的微波特性阻抗来表示,在导体厚度大于趋肤深度的条件下,导体的衰减系数 a 可由下式给出^[8]

$$a = a_0 f^{1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} R_s \sum \frac{\partial Z_0}{\partial n_m} \quad (3)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常量, μ_0 为真空磁导率, Z_c 为电极系统在有介质填充时的微波特性阻抗, Z_0 为无介质填充时的电极系统微波特性阻抗, $R_s = (\pi \mu_0 \rho f)^{1/2}$ 为电壁的表面电阻, ρ 为电阻率, f 为电磁波频率, n_m 为电壁 m 的法线方向.

利用有限元法,可由 Laplace 方程得到电极系统空间电位的分布,然后利用 Gauss 定理得到电极单位长度上的电容,电极系统在有介质填充时的微波特性阻抗 Z_c 和无介质填充时的微波特性阻抗 Z_0 分别表示为

$$Z_c = 1/[C(CC_0)^{1/2}], Z_0 = 1/(CC_0) \quad (4)$$

式中, C 为实际电极的分布电容, C_0 为相应尺寸电极在空气填充时的电容.实际计算中,由有限元法不能直接得到式 (3) 的导数,可以通过求 Z_0 的差分获得.将电极的各电壁沿其法线方向缩进一小段距离 Δn_m (一般为趋肤深度的一半,为便于计算,取为

^{*}深圳市科技计划项目资助

Tel: 0755-26534240 Email: gaozh@szu.edu.cn

收稿日期: 2004-01-19

一致,均为 Δn),再利用有限元法求出各电壁缩进后新电极在自由空间的微波特性阻抗 Z_0' ,于是, a_0 可简化为^[6]

$$a_0 \approx \frac{(\pi \epsilon_0 \rho)^{1/2} (Z_0' - Z_0)}{2Z_c \Delta n} \tag{5}$$

调制器的另一重要参量——半波驱动电压,一般用最小直流半波电压表示^[5]

$$V_\pi = \frac{G\lambda}{2n^3 \gamma_{33} \Gamma L} \tag{6}$$

式中 G 为电极间隙宽度; λ 为自由空间中的光波长; n 为 LiNbO_3 光波导的等效折射率; $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 为 LiNbO_3 晶体的电光系数; Γ 为电场和光场之间重叠程度的系数,称为电光重叠积分; L 为电极长度.

而特性阻抗也和分布电容有如下关系

$$Z_c = \frac{N_m}{C_1 c} = \frac{1}{c \sqrt{C_1 C_0}} \tag{7}$$

综上所述,调制器主要特性参量都归结到求解实际电极的分布电容 C 和相应尺寸电极在空气填充时的电容 C_0 .

2 计算模型及分析

将 T型电极与脊波导相结合,设计模型如图 1. 图中电极材料为金属 Au,缓冲层为 SiO_2 ,脊波导层为聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, 以下简称为 PTFE),衬底为 LiNbO_3 . W_G 为两边地电极的横向尺寸; G 为电极间隙; W_U 为上电极的横向尺寸; W_L 为下电极宽; T_U 为上电极的纵向尺寸; T_L 为下电极厚度; T_h 为缓冲层厚度; T_b 为脊波导厚度; H 为基片厚度.

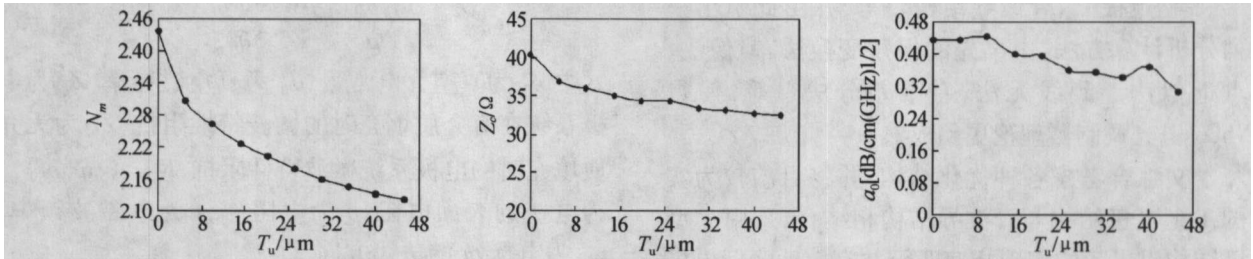


图 2 $W_U = 23 \mu\text{m}$, $T_h = 5 \mu\text{m}$, $T_b = 0 \mu\text{m}$ 时, N_m , Z_c 和 a_0 与上电极厚度 T_u 的关系曲线
Fig 2 The N_m , Z_c and a_0 as a function of T_u , while $T_h = 5 \mu\text{m}$, $T_b = 0 \mu\text{m}$, $W_U = 23 \mu\text{m}$

图 2中的两组曲线反映 T_u 对 N_m 、 Z_c 和 a_0 的影响. 可以看到 T_u 的增大,即厚的上电极有利于 N_m 的降低,有利于降低微波损耗,它为我们在相速匹配的前提下,进一步提高带宽提供可行性.但同时 Z_c 值却逐渐偏离 50Ω 的特性阻抗.导致这些结果的原因是电极尺寸的增大,空气中的电容增大.同时,应该注意到,采用这种 T型电极结构的损耗系数较之传统共面波导电极要小得多,传统结构的损耗系

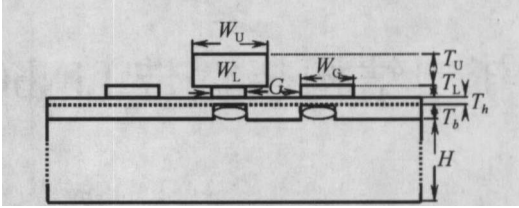


图 1 光电调制器设计模型电极结构横截面示意图
Fig 1 The cross-sectional configuration of our design-model electrode structure

本文主要考虑的是 T型电极和脊波导的影响,相关一些参量在已有的分析理论和其他参考文献的基础上进行,因此,在分析的过程中,不再对调制器部分尺寸 W_G 、 T_L 、 G 、 W_L 和 H 做优化. $G = 30 \mu\text{m}$ ^[9], $W_L = 10 \mu\text{m}$, $T_L = 5 \mu\text{m}$, $W_G = 15 \mu\text{m}$, LiNbO_3 的厚度我们取为 $H = 200 \mu\text{m}$ ^[10]. 我们也大致计算了一下这些参量对器件的影响,结果和已有理论基本吻合.

在计算的过程中,取 SiO_2 的相对介电常量为 3.78,聚四氟乙烯的相对介电常量为 2.3, Z-切 LiNbO_3 基片的相对介电常量在垂直基片表面方向为 28,平行基片表面方向为 43,工作波长取为 $1.55 \mu\text{m}$,电光重叠积分为 0.36.

3 计算结果及数据优化

由前述分析,本器件主要优化参量有: T型电极参量 W_U 、 T_U 、缓冲层厚度 T_h 和脊波导层厚度 T_b .

3.1 上电极尺寸对调制器性能的影响

按照现行工艺水平,上电极厚度 T_U 的优化范围取 $0 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间.图 2给出了在上电极宽度 $W_U = 23 \mu\text{m}$, $T_h = 1 \mu\text{m}$, $T_b = 3 \mu\text{m}$ 保持不变的情况下,不同 T_U 值对应的调制器的微波特性参量(电极长度取 25 mm).

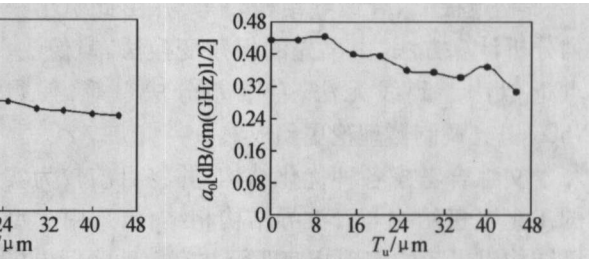


图 3 所示的曲线是在保持 $T_U = 35 \mu\text{m}$ 不变的前提下,对 $W_U/2$ 在 $5 \sim 34 \mu\text{m}$ 范围内每隔 $3 \mu\text{m}$ 计算一次所得的分析曲线.由曲线可见,当上电极半宽 $W_U/2$ 增大时,调制器的微波等效折射率下降,但同时特征阻抗也随着下降.当上电极离两边地电极不是很近时,T型电极横向尺寸的改变对损耗系数的影响不大,一般维持在 $0.4 \text{ dB/cm (GHz)}^{1/2}$ 水平.

数一般为此结构损耗系数值的两倍左右.

当上电极半宽 $W_u/2 > 29\text{ }\mu\text{m}$ 时,即上电极和地电极的横向距离小于 $6\text{ }\mu\text{m}$ (电极间隙 $G = 35\text{ }\mu\text{m}$) 时,损耗系数迅速上升.这是由于电极相距过近,电场在部分空间过分加强,使得中心电极的表面电极分

布不均,反而使传导电流的有效截面积减小,从而引起损耗的增大.所以,设计上电极的宽度时,最关注的还是尺寸改变所带来微波损耗的影响,这是设计的重点所在.

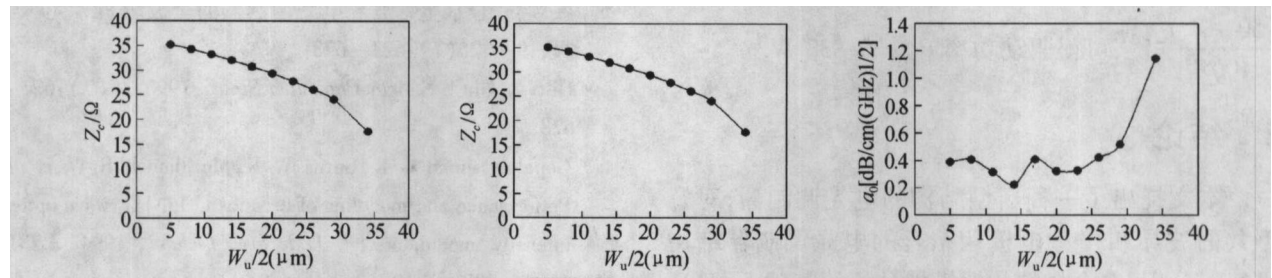


图 3 $T_u = 35\text{ }\mu\text{m}$, $T_h = 0\text{ }\mu\text{m}$, $T_b = 5\text{ }\mu\text{m}$ 时, N_m , Z_c 和 a_0 与上电极宽度 W_u 的关系曲线

Fig 3 The N_m , Z_c and a_0 as a function of W_u , while $T_h = 5\text{ }\mu\text{m}$, $T_b = 0\text{ }\mu\text{m}$, $T_u = 35\text{ }\mu\text{m}$

3.2 缓冲层、脊波导参量对调制器性能的影响

采用脊波导结构可以有效的降低微波等效折射率,并提高调制器制器的带宽.图 4 为采用脊波导结构的分析数据曲线.

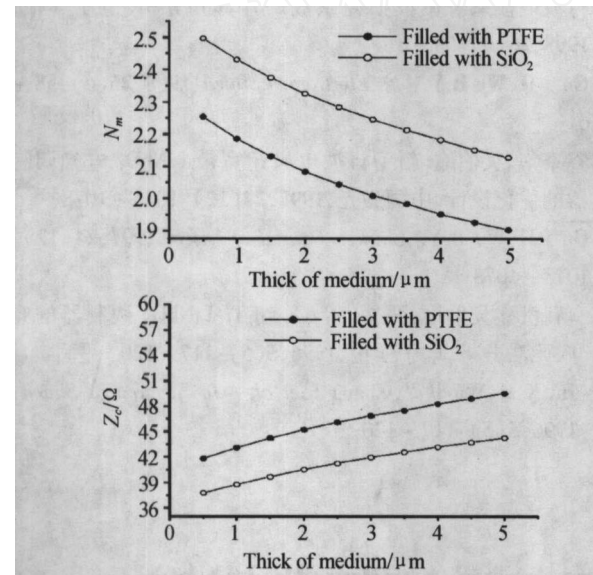


图 4 $T_u = 35\text{ }\mu\text{m}$, $W_u = 27\text{ }\mu\text{m}$, $T_h = 1\text{ }\mu\text{m}$, 脊波导层与缓冲层同种材料时, N_m , Z_c 与 T_b 的关系曲线

Fig 4 The N_m , and Z_c as a function of T_b , while $T_h = 1\text{ }\mu\text{m}$, $W_u = 27\text{ }\mu\text{m}$, $T_u = 23\text{ }\mu\text{m}$, one medium filled

分别采用 SiO_2 (相对介电常量 3.78) 和 PTEF (相对介电常量 2.3) 对缓冲层以及脊波导层进行填充,缓冲层厚度均为 $1\text{ }\mu\text{m}$,脊波导层的厚度变化 (如图 4 所示). 两幅图中的黑色实心圆表示缓冲层、脊波导层均为 PTEF 填充时的 N_m 和 Z_c 曲线,空心圆则为 SiO_2 填充时的数据. 可以看到,随着脊波导厚度 T_b 的增大, N_m 逐渐减小, Z_c 逐渐增大,也就是说厚的脊波导对调制器的性能有好的影响,充分显示出脊波导在降低等效折射率上的优势.

从图中还可看到,采用相对介电常量较低的 PTEF 填充有利于 N_m 的进一步下降,能更好的实现微波等效折射率的降低以达到与光波折射率的匹配,且能保持更大的特性阻抗. 更重要的是,制作厚

的聚四氟乙烯层比同样的 SiO_2 层容易的多. 因此,采用聚四氟乙烯来作为脊波导层材料将会有不少优势,唯一的缺点是聚四氟乙烯比较软. 但是,实际制作中不可能将缓冲层悬空在脊波导之上,所以在制作过程中,仍需要一定厚度的 SiO_2 层,因此,鉴于目前的加工工艺和分析结构,对 SiO_2 层采用较低厚度 $1\text{ }\mu\text{m}$. 图 5 是缓冲层为 SiO_2 填充,脊波导层为聚四氟乙烯填充时的分析数据.

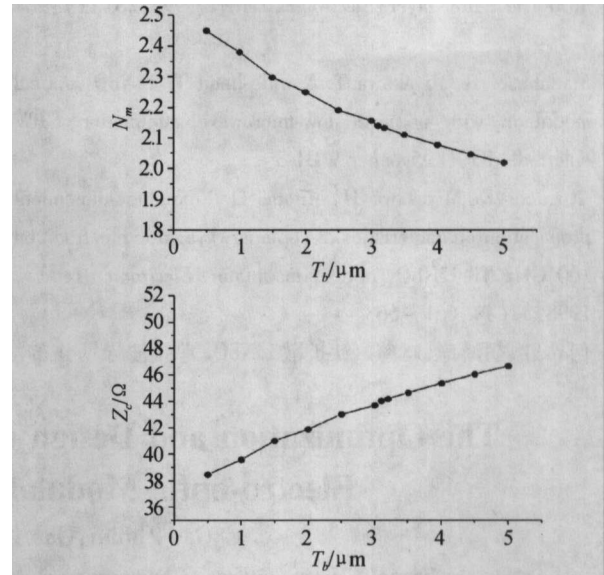


图 5 $T_u = 35\text{ }\mu\text{m}$, $W_u = 27\text{ }\mu\text{m}$, $T_h = 1\text{ }\mu\text{m}$, 缓冲层为 SiO_2 , 脊波导层为聚四氟乙烯时, N_m 和 Z_c 与脊波导层厚度 T_b 的关系曲线

Fig 5 The N_m and Z_c as a function of T_b , while $T_h = 1\text{ }\mu\text{m}$, $W_u = 27\text{ }\mu\text{m}$, $T_u = 23\text{ }\mu\text{m}$, different medium filled

可以看到,此时的数据在折射率匹配和特征阻抗匹配上不如完全为聚四氟乙烯填充脊波导层、缓冲层时的结果,但是优于完全 SiO_2 填充时的结果. 这种结构是为了适应实际制作需要,采用此结构仍然能较好的满足各项性能指标.

通过以上分析,最后优化得到一组结构,各参量为 $T_u = 35\text{ }\mu\text{m}$, $W_u = 27\text{ }\mu\text{m}$, $T_h = 1\text{ }\mu\text{m}$, $T_b = 3.1\text{ }\mu\text{m}$, 在此结构下调制器的各项性能指标分别为:微波等

等效折射率 $N_m = 2.140$, 特征阻抗 $Z_c = 44.03 \Omega$, 导体损耗系数 $\alpha_0 = 0.446365 \text{ dB}/(\text{cm} \cdot \text{GHz}^{1/2})$ (由于实际制作因素, 此处参考文献 [6] 已乘修正因子 2); 当电极长度 $L = 2.5 \text{ cm}$ 时, 由式 (2) 可得 $\Delta f_{\text{dB}} = 153 \text{ GHz}$, 由式 (6) 得到此时半波电压 $V_\pi = 8.55 \text{ V}$, 由式 $P_{\text{dr}} = \frac{(50 + Z_c)^2}{400Z_c^2} V_\pi^2$, 可得驱动功率 $P_{\text{dr}} = 0.833 \text{ W}$.

4 结论

本文提出了一种新型结构的电光调制器, 对脊型共面波导和 T 型电极相结合的电光调制器结构进行了分析, 在大量的数据模拟分析的基础上, 验证了这种结构相对于传统结构而言, 可以有效的降低调制器的微波等效折射率, 并同时保证较大的特征阻抗, 从而大大的提高了调制器的带宽. 利用优化的结构, 给出一组带宽达 153 GHz , 半波电压为 8.55 V , 特征阻抗为 44Ω 的调制器的设计例子.

参考文献

- Miyamoto H, Ohta H, Tabuse K, et al Ultra-broad-band and highly-stable Ti:LiNbO₃ optical modulator using electrodes buried in buffer layer *Electronics Letters*, 1992, 28 (11): 967~979
- Madahushi R, Miyakawa T. A wide-band Ti:LiNbO₃ optical modulator with a novel low-microwave attenuation CPW electrode. DOC 95 paper WD1-3
- Noguchi K, Miyazawa H, Mitomi O. Frequency-dependent propagation characteristics of coplanar waveguide electrode on 100 GHz Ti:LiNbO₃ optical modulator *Electronics Letters*, 1998, 34 (4): 661~663
- 何希红, 胡鸿璋, 赵慈. 钛扩散 LiNbO₃ 单模波导场分布. *光子学报*, 1996, 25 (3): 256~260
He X H, Hu H Z, Zhao C. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25 (3): 256~260
- 戚颂新, 丘水生. 波导电光调制器的全波分析. *光子学报*, 1996, 25 (7): 623~628
Qi S X, Qiu S S. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25 (7): 623~628
- Gopalakrishnan G K, Burns W K, McElhanon R W, et al Performance and modeling of broadband LiNbO₃ wave optical intensity modulators *J Lightwave Technol*, 1994, 12 (10): 1807~1819
- 陈福深. 集成电光调制理论和技术. 北京: 国防工业出版社, 1995
Chen F S. *Theory and Technology of Integrated Electro-Optic Modulator*. National Defence Industry Press, 1995
- 谷京华, 吴伯瑜. Ti:LiNbO₃ 电光调制器中复杂截面形状行波电极系统微波损耗系数的计算和分析. *电子学报*, 1998, 26 (6): 58~61
Gu J H, Wu B Y. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26 (6): 58~61
- 谷京华, 吴伯瑜. 新型行波电极超宽带 LiNbO₃ 电光调制器的优化设计. *中国激光*, 1997, 24 (12): 1073~1078
Gu J H, Wu B Y. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24 (12): 1073~1078
- 靳晓民, 吴伯瑜, 张军, 等. X 切 Ti:LiNbO₃ 调制器的有限元法分析. *电子学报*, 1996, 5 (5): 117~120
Jin X M, Wu B Y, Zhang J, et al. *Acta Electronica Sinica*, 1996, 5 (5): 117~120

The Optimization and Design of Ultra-broad-bandwidth LiNbO₃ Electro-optic Modulator with a New Structure

Gao Zhihui, Gan Qingyun, Wan Junkang

Normal College, College of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060

Received date: 2004-01-19

Abstract A new structure with both ridge waveguide and T-type electrode is given to enhance the bandwidth of electro-optic modulator. After calculating and optimizing by the finite-element method, as an example, an excellent modulator, whose bandwidth is 153 GHz , half wave voltage is 8.55 V , characteristic impedance is 44Ω and driving power is 0.833 W is designed.

Keywords LiNbO₃ electro-optic modulator; Travelling wave electrode; Ridge waveguide; T-type electrode



Gao Zhihui received B. S. degree from Southeast University, Nanjing, China in 1982 and M. S. degree from Xidian University, Xi'an, China in 1986. Now she is a professor in Shenzhen University. She is engaged in research on laser theory and laser technology.