

文章编号: 0253-2239(2003)07-0865-5

退火质子交换平面波导型电光调制器的研究

廖尉钧 陈险峰 曾祥龙 李 劬 陈英礼

(上海交通大学物理系光学与光子学研究所, 上海 200240)

摘要: 基于双棱镜耦合 m 线技术提出了一种新型的平面波导强度调制器。由于质子交换平面波导的导波层在加上电场后折射率发生变化, 从而引起棱镜耦合输出的 m 线强度的变化, 实现电光调制。讨论了电极间隙宽度和导波层吸收对器件性能的影响。与其他类型强度调制器相比, 这种调制器具有简单的电极结构, 而且调制带宽可达 40 GHz 以上。

关键词: 应用光学; 双棱镜耦合; m 线; 质子交换波导; 电光调制

中图分类号: TN252 文献标识码: A

1 引 言

光通信在近十年来得到了飞速的发展, 各种无源和有源光器件得到了广泛的研究和应用, 其中, 把外界电信号调制到激光上的光调制器起着非常关键的作用。利用法拉第效应可以制成磁光调制器^[1,2], 由于磁光效应的响应速度慢, 同时材料价格也较高, 实用调制器产品较少。在声光介质上可以制作声光调制器^[3~5], 而目前声光调制器调制带宽最高的仅为 200 MHz, 又由于其大都采用结晶工艺制造, 制造加工非常复杂, 成本较高, 声光调制器的应用也受到限制。电光调制器是人们研究得最多也运用得最多的光调制器, 它利用晶体的电光效应实现对光信号的调制, 可分为反射型电光调制器和传输型电光调制器。反射型光波导调制器^[6,7]中, 被调制光通过激发表面等离子波利用衰减全反射实现对激光的调制。这种调制器虽然避免了传输损耗, 但是却受到调制带宽的限制。传输型电光调制器多在波导上制成, 采用行波型电极设计, 调制带宽很大, 可以覆盖 45 MHz~110 GHz^[8]的频带范围。有机聚合物和铌酸锂是人们最常用的两种制作波导电光调制器波导的材料。有机聚合物电光调制器^[9~11]往往需要经过复杂的材料制作工艺, 需要上千伏的极化电压, 同时这种聚合物材料热稳定性差, 光学损耗大, 化学稳定性低。铌酸锂晶体由于其良好的光学性能和低的生长成本受到了广泛的应用,

已经规模化生产, 其应用也非常活跃, 最近铌酸锂晶体在周期性反转极化后已经被用到了倍频上^[12,13]。常用的铌酸锂电光调制器^[8,14,15]利用马赫-曾德尔干涉仪调制光信号, 采用钛扩散制作出条波导, 并在条波导上镀上复杂的电极结构, 这种调制器制作工艺复杂, 成本也非常高。

本文通过对简单工艺制作出的退火质子交换铌酸锂平面波导的导波特性以及其电光效应的研究, 提出了在这种波导上镀上行波电极制作电光调制器的可行性, 同时分析了影响器件性能的参量。

2 器件模型

在制作好的平面波导上通过半导体工艺镀上两片电极, 棱镜压紧在波导上并紧靠电极边缘。激光二极管发出的光经过准直器 1 射入棱镜 1, 调整入射光的入射角和位置, 使激光耦合进铌酸锂波导并让光线沿两片电极中央空出的路径通过, 激光在波导中传输后又通过棱镜 2 耦合输出, 通过光纤准直器 2 连接到探测器。如图 1 所示。当电极上加上电信号, 由于电光效应使光束在铌酸锂波导传输区域

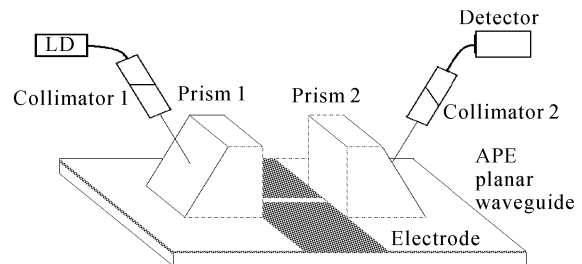


Fig. 1 Configuration of annealed proton-exchanged (APE) planar waveguide modulator

* E-mail: weijunliao@sju.edu.cn

收稿日期: 2002-06-17; 收到修改稿日期: 2002-07-16

内的折射率发生变化,引起波导中导模的变化,进而输出光强也发生变化。这样就实现了电光调制。

3 理论模型

利用质子交换制作波导的技术非常成熟,人们对铌酸锂质子交换波导及其应用也做了许多的研究^[16,17]。在苯甲酸中的 H^+ 和铌酸锂中的 Li^+ 进行交换后,铌酸锂表面的非常光折射率增大从而形成平面波导。由于这种阶跃折射率波导损耗很大,需要对这种波导进行退火。退火后,这种波导的损耗会减小到 0.1 dB/cm 以下,同时,波导深度增加,折射率重新分布,即从表面到基底逐渐下降,呈现渐变折射率波导。选用误差函数可以表征退火质子交换波导的折射率分布,下面是非常光折射率 n_e 随深度 x 变化的函数关系^[18]:

$$n_e(x) = n_e + \frac{\Delta n_e}{2\text{erf}(d_e/d_a)} \left[\text{erf}\left(\frac{d_e+x}{d_a}\right) + \text{erf}\left(\frac{d_e-x}{d_a}\right) \right], \quad (1)$$

其中, n_e 是铌酸锂晶体的非常光折射率, Δn_e 是退火后铌酸锂表面的折射率变化量, d_e 是质子交换后形成的波导深度, d_a 是在质子交换基础上退火后变化的深度,退火后波导的深度为 $d_e + d_a$ 。

在处理这种渐变折射率波导过程中,采用了转移矩阵方法^[18],渐变折射率波导中 TE 模的本征方程由下式给出:

$$\int_0^{x_t} \kappa(x) dx + \phi(s) = m\pi + \arctan(p_0/\kappa_1) + \pi/2$$

$$(m = 0, 1, 2, 3 \dots)$$

其中, x_t 为光线径迹在转折点处的位置,

$$\kappa(x) = \{\kappa_0^2 [n_e(x)]^2 - \beta^2\}^{1/2},$$

$\phi(s)$ 为散射子波的相位贡献,

$$p_0 = (\beta^2 - \kappa_0^2 n_0^2)^{1/2},$$

$$\kappa_1 = \{\kappa_0^2 [n_e(0)]^2 - \beta^2\}^{1/2},$$

$$\beta_0 = \kappa_0 n(x_t),$$

波导的有效折射率 N_{eff} 为导波层在 x_t 点的折射率 $n(x_t)$,传播常量 $\beta = k_0 N_{\text{eff}}$ 。

用 X 切割的铌酸锂晶片 ($1.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$) 在 $190 \text{ }^\circ\text{C}$ 时与纯的苯甲酸溶液交换 2 h,然后在 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气中退火 3 h,选择入射光的偏振方向,使波导模式为 TE 模。当激光波长为 633 nm 时,测得这种波导的基底折射率 $n_e = 2.2027$,退火后表面折射率变化 $\Delta n_e = 0.0361$,质子交换后的波导深度 $d_e = 0.98 \text{ } \mu\text{m}$,退火后变化的深度 $d_a = 3.37 \text{ } \mu\text{m}$ 。然后

就可以通过上面的 TE 模的本征方程算出这种波导的光线转折点位置 x_t ,有效折射率 N_{eff} ,传播常量 β 。

棱镜用于将激光器发出的光波耦合到波导和薄膜中。实验中,把两个棱镜压紧在晶片的两端,一个将激光耦合进波导另一个将光耦合输出到探测器,双棱镜耦合如图 2 所示。

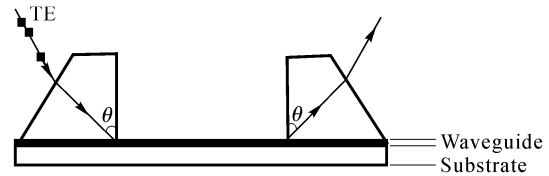


Fig. 2 Two-prism optical coupling

当棱镜中的光线在棱镜底面的入射角 θ 满足 $N_p \sin\theta = N_{\text{eff}}$ 时激光就可以在导波层中形成导模传输并通过另外一只棱镜输出到探测器, N_p 为棱镜的折射率。实验中,棱镜采用高折射率的金红石 (TiO_2),这样更容易激发导模。当 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 时, $N_p = 2.83518$ 。

改变激光的入射方向,就可以扫描输出得到 m 线。由于介质有一定的吸收(折射率虚部),所以 m 线有一定的宽度。吸收越小, m 线越窄。采用复折射率 $n = n_e + i\gamma$ 表示介质的色散和吸收特性,通过理论计算得到 m 线,如图 3 所示,取 $\gamma = 0.002$ 。

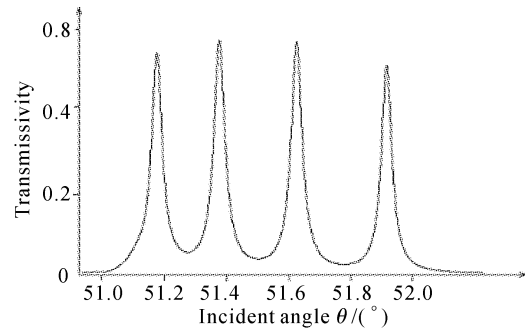


Fig. 3 Simulation of m -lines in APE lithium niobate waveguide

电极结构一般分为集总型和行波型,这里采用行波型电极,把电极镀在导波层表面,中间留出作为光传输路径。运用保角变换^[20]分析了这种电极结构在晶体中形成的电场分布。

因为两片电极间隙相对两片电极的宽度非常小,可以近似地把两片电极看作无限宽。取铌酸锂晶体的晶轴方向为 z 向, z 方向的电场分布为

$$E_z = \frac{U}{\pi} \text{Im} \frac{dW}{ds}, \quad (2)$$

这里, U 为电极上所加的电压,

$$\frac{dW}{ds} = \frac{1}{\sqrt{s^2 - h^2}}, \quad s = z + ix,$$

h 为电极间隙半宽。

另外两个方向的电场通过分析计算发现在实验的条件下均不会改变 e 光的折射率。 z 方向电场引起 e 光折射率的改变由下式给出：

$$\Delta n_e^E(x) = -\frac{1}{2} [n_e(x)]^3 r_{33} E_z, \quad (3)$$

$$\Delta n_e^E(x) = \frac{Ur_{33}}{2\pi h \sqrt{1 + (x/h)^2}} \left\{ n_e + \frac{\Delta n_e}{2\text{erf}(d_e/d_a)} \left[\text{erf}\left(\frac{d_e + x}{d_a}\right) + \text{erf}\left(\frac{d_e - x}{d_a}\right) \right] \right\}^3$$

最后的折射率分布为

$$n_e^E(x) = n_e(x) + \Delta n_e^E(x),$$

施加电场后，折射率发生改变，导模也产生变化，输出的 m 线也随着所加电场大小漂移。如果选取上升沿中间位置作为工作点，固定激光的入射角 θ ，加上电场输出光强就会发生变化，实现对信号的调制。图 4 是电极间隙 $100 \mu\text{m}$ 时在 TE_1 模上进行的电光调制。

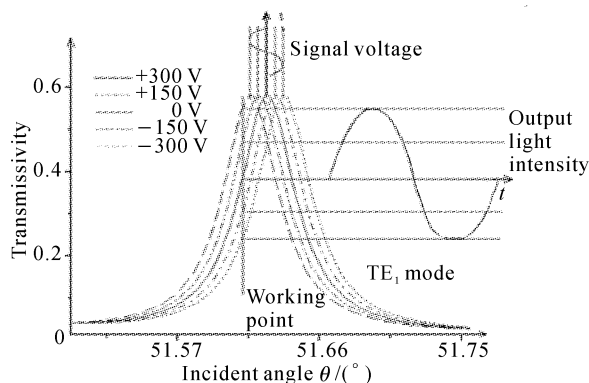


Fig. 4 Realization of electrooptic modulation on m-line shift driven by signal voltage

这里为了获得更强的输出信号，所加的电压比较大，达到 300 V 。如果输出信号小一些，这个电压值可以降到几十伏以内。但电压太小会引起信噪比下降，从而影响光信号的输出质量。

4 讨论和总结

除了上面提到的输出信号强弱影响到调制电压以外，更实际有效地降低调制电压的方法是改变电极宽度和降低吸收系数。

从加上电场后铌酸锂波导折射率改变的关系式可以看出，电极间隙越窄，调制电压越低，图 5 是 γ 取 0.002 时，信号电压与电极间隙的关系曲线。

r_{33} 为铌酸锂的二阶非线性系数， $r_{33} = 30.9 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。

从前面的分析看出，电场是深度的函数，同时折射率也是深度的函数，那么折射率的改变将也是深度的函数，把(1)式和(2)式代入(3)式，同时考虑激光是从两片电极的对称中心进入，得到下面的表达式

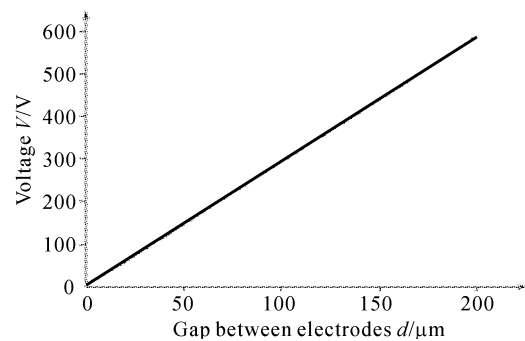


Fig. 5 Signal voltage value versus gap between electrodes

可以看出，调制电压与电极间隙有着线性变化关系。如果在条波导上制作电极则可以有效降低电极间隙，同时很大程度地降低调制电压。但是在电极间隙非常小时这种线性关系并不适用，如在 $d = 1 \mu\text{m}$ 时， $u = 9 \text{ V}$ ， $d = 2 \mu\text{m}$ 时， $u = 11 \text{ V}$ 。

影响调制电压的另外一个因素是介质的吸收。 γ 越小， m 线越窄，上升沿越陡。从图 4 可以看出，这时需要的调制电压也就越小。下面是当电极间隙 $d = 100 \mu\text{m}$ 时 γ 从 0.0001 到 0.02 所需要调制电压变化曲线，见图 6。

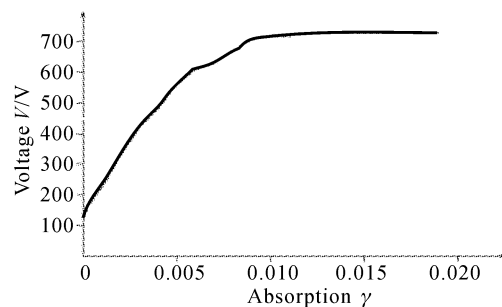


Fig. 6 Signal voltage versus the absorption of the material

通过改进波导制作工艺，如采用气体质子交换技术可以降低吸收系数，吸收变小后，需要的调制电压可以得到很大程度的降低。同时发现，吸收减小

后,调制电压虽然降低,但是光强透过率却减少了。所以,这就要平衡二者的关系,选取一个合适的工作参量。

综合电极间隙和吸收对调制电压的影响,给出实用调制电压下的一组参量, $h = 5 \mu\text{m}$, $\gamma = 0.001$,图7是信号调制图,需要的调制电压只有15 V。

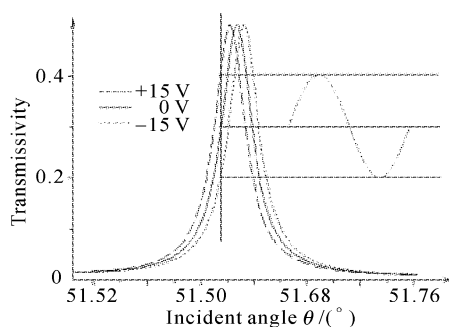


Fig. 7 EO modulation diagram with $h = 5 \mu\text{m}$, $\gamma = 0.001$

由于微波和光波存在速度失配,调制器存在一定的带宽。铌酸锂平面波导调制器的带宽长度积约等于 $9 \text{ GHz} \cdot \text{cm}$,电极长度选取为 1 cm 时,可以达到 9 GHz 的带宽。由于这种调制器并不需要很长的作用距离,当把电极长度选为 2 mm 时,理论上可以达到 45 GHz 的带宽。

总结 本文基于双棱镜耦合技术和 m 线技术分析了退火质子波导的导波特性和电光调制特性,研究了铌酸锂平面波导调制器的可行性。与其它调制器相比,它具有更简单容易的制作工艺和简洁的电极结构。同时,由于这种调制器采用行波电极结构,它比传统的集总型平面波导调制器具有更高的工作带宽。

参 考 文 献

- Downie J D, Hine B P, Reid M B. Effects and correction of magneto-optic spatial light modulator phase errors in an optical correlator. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(5):636~643
- Tsai C S, Lin Y S, Su J *et al.*. High efficiency guided-wave magneto-optic Bragg cell modulator using nonuniform bias magnetic field. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(25):3715~3717
- Layer H P. Acousto-optic modulator intensity servo. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(17):2947~2949
- Nosu K, Taylor H F, Rashleigh S C *et al.*. Acousto-optic phase modulator for single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(16):605~607
- Boyd J R, Young E H, Yao S K. Design procedure for wide bandwidth acousto-optic modulator. *Opt. Engng.*, 1977, **16**(5):452~454
- Sincerbox G T, Goedon J C. Small fast large-aperture light-modulator using attenuated total reflection. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(8):1491~1494
- Yang Yi, Cao Zhuangqi, Shen Qishun. Low voltage electro-optic polymer light modulator using attenuated total internal reflection. *Opt. and Laser Technol.*, 2001, **33**(6):417~420
- Noguchi K, Miyazawa H, Mitomi O. Frequency-dependent propagation characteristics of coplanar waveguide electrode on 100 GHz Ti:LiNbO₃ optical modulator. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(7):661~663
- Suna D, Lua Xuejun, Ana D *et al.*. High-performance unidirectional electro-optic modulator based on polymeric highly multi-mode waveguides. *Opt. and Laser Technol.*, 1998, **30**(8):481~489
- Donval A, Toussaere E, Hierle R *et al.*. Polymer based polarization insensitive amplitude modulator: conception, technology and demonstration. *Synthetic Metals*, 2000, **115**(1~3):21~27
- Wang Wenshen, Shi Yongqiang, Olson D J *et al.*. Push-pull poled polymer Mach-Zehnder modulators with a single microstrip line electrode. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):51~53
- Chen Yuping, Chen Xianfeng, Zeng Xianglong *et al.*. 18 mW CW green light generation by first-order quasi-phase-matched frequency-doubling in bulk periodically poled LiNbO₃. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4):399~401 (in Chinese)
- Mazzotti D, De Natale P, Giustreidi G *et al.*. Difference-frequency generation in PPLN at $4.25 \mu\text{m}$: an analysis of sensitivity limits for DFG spectrometers. *Appl. Phys. (B)*, 2000, **70**(6):747~750
- Izutsu M, Yamane Y, Sueta T. Broadband traveling-wave modulator using a LiNbO₃ optical waveguide. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, **13**(4):287~290
- Chung H Y, Chang W S C, Adler E L. Modeling and optimization of traveling wave LiNbO₃ interferometric modulators. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(3):608~617
- Cao Xia, Xia Yuxing, Yang Yi *et al.*. Characterization of annealed proton exchanged optical waveguides in Z-cut LiNbO₃. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(11):1549~1503 (in Chinese)
- Chen Xianfeng, Chen Yuping, Xie Shengwu *et al.*. Experimental study of Cerenkov type second harmonic generation in proton-exchanged Lithium niobate waveguide. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):774~777 (in Chinese)
- Chen Xianfeng, Xie Shengwu, Xia Yuxing *et al.*. Analytical study of the annealing process in Z-cut proton-exchanged lithium niobate planar waveguide. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(7):612~615 (in Chinese)
- Cao Zhuangqi. *Transfer Matrix Method in Guiding Wave Optics* (导波光学中的转移矩阵方法). Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2001. 67~93 (in Chinese)
- Chen Fushen. *Integrated Electro-optic Modulation Theory and Technology* (集成电光调制理论与技术). Beijing: National Defense Industry Press, 1995. 69~85 (in Chinese)

Analytical Study of Electrooptic Modulator Using Annealed Proton Exchanged Planar Waveguide

Liao Weijun Chen Xianfeng Zeng Xianglong Li Qu Chen Yingli
*(Institute of Optics & Photonics, Department of Physics,
 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)*
 (Received 17 June 2002; revised 16 July 2002)

Abstract: A new type of electrooptic modulator using annealed proton exchanged (APE) planar lithium niobate waveguide is proposed. Two-prism coupling method is used to implement the electrooptic modulation is proposed by changing the angle of the m-lines before and after the voltage applied on the electrodes. This type of the modulator is easily fabricated and can be operated at more than 40 GHz bandwidth.

Key words: applied physics; proton exchanged waveguide; electrooptic modulator; two-prism coupling; m-lines

LASERS-16 Shanghai '2003 第 16 届全国激光学术会议 征 文 通 知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十六届全国激光学术会议,定于 2003 年 10 月在上海举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、交流新技术的讲台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名两院院士和著名专家到会作特邀报告,同时各分会将安排高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。

上海是全国著名的经济文化中心,拥有众多激光研究、应用、开发的研究所、高校和企业。近年来涌现许多著名的现代景观,如东方明珠电视塔、金茂大厦、亚太地区经济合作会议(APEC)会址、世界首列运营性磁悬浮列车等。热情欢迎激光领域研究与开发的专家学者光临会议。

会议主办单位:中国电子学会 中国光学学会

会议承办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所

会议协办单位:华北光电技术研究所激光技术实验室
 华中科技大学激光技术国家重点实验室

会议地点时间:上海,2003 年 10 月中下旬

名誉主席:王大珩

主 席:范滇元 周寿桓

副 主 席:朱健强 梅遂生 姚建铨 许祖彦 王益德

秘 书 长:田守云

征稿范围:

- 1) 激光物理
- 2) 超短脉冲激光与非线性光学
- 3) 全固态激光器与非线性光学
- 4) 光通信有源及无源器件
- 5) 工业激光及其应用
- 6) 医用激光及激光与生物组织的相互作用
- 7) 光束传输、控制及光束质量
- 8) 激光光学材料、薄膜及元器件
- 9) 其它相关领域

征文要求:

需提交 500 字摘要和 300 字提要各一份,分别用于审稿和出版会议指南。摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括目的、方法、结果、结论等内容。请用第三人称叙述,不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文。论文截稿期为 2003 年 6 月 30 日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编,电话,E-mail 等)、关键词 3~6 个。用宋体小四号字按 word 格式编排,以 E-mail 附件方式发送至 laser2003@siom.ac.cn,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件,如发送 E-mail 确有困难者,可书面邮寄至上海 800-211 信箱《中国激光》编辑部收,邮编 201800,请在信封上标明“会议投稿”及所属征文范围第几类,联系电话:021-69918016。网址:www.siom.ac.cn;www.china-laser.org。经审稿录用的论文,将由《中国激光》以增刊形式出版。