

# 632.8 nm 波长质子交换光波导型偏振器的研究

冯克成<sup>1</sup> 李 凌<sup>2</sup> 焦文韬<sup>1</sup> 王兆民<sup>1</sup>

1, 长春光学精密机械学院光学物理系, 长春 130022

2, 四平教育学院物理系, 四平 136000

**摘 要** 在可见光域(632.8 nm 光波段)研制出钛扩散铌酸锂质子交换光波导偏振器。同时,给出波导偏振器参数测试装置。在理论上,利用物理光学和波导色散理论分析与计算了这种偏振器的消光比,分析了影响器件性能的各种因素。理论计算与实验结果符合良好。

**关键词** 质子交换光波导型偏振器, 波导色散理论, 偏振消光比。

## 1 引 言

随着科学技术的发展,特别是在光通信、光纤陀螺,光纤传感技术领域,各种信息处理的核心部分,即光源部分,大都采用便于调制的偏振光源。波导型偏振器的出现无疑给这方面的工作提供了一种新的选择。特别是它和半导体激光器联合使用具有尺寸小、输出稳定性高、偏振消光比特性好、选模特性好,便于同其它光波导器件集成等优点,已受到国内外普遍重视。但是,目前已报道的这种偏光器件大都用红外域或近红外域<sup>[1,2]</sup>,而对波长为 632.8 nm 或更短波长范围工作的这种器件的研制、测试与理论分析均未见报道。本文作者设计并研制出这种器件,其消光比大于 40 dB。同时,给出特性参数测试装置,并利用物理光学和波导色散理论分析并计算了波导偏振器的消光比。理论计算结果与实验数据符合良好。

## 2 理论分析

### 2.1 波导偏振器的物理解释

铌酸锂晶体本身是一种铁电晶体,自发极化强度的变化对折射率有很大影响。在顺电相时, $\text{Li}^+$  位于氧三角平面内, $\text{Nb}^{5+}$  在氧八面体中心;而在铁电相时, $\text{Li}^+$  和  $\text{Nb}^{5+}$  沿  $C$  轴方向有一微小位移,其位移方向与自发极化强度方向相同。因此, $\text{LiNbO}_3$  晶体总的自发极化强度来源于  $P_s$ 、 $\text{Li}^+$  和  $P_s$ 、 $\text{Nb}^{5+}$  两部分的贡献。对于  $\text{LiNbO}_3$  质子交换波导,红外测量表明:质子交换以后, $\text{H}^+$  并没有被交换到  $\text{Li}^+$  的位置上,而是沿  $C$  轴方向有一定移动。在内电场的作用下,进入靠近  $\text{Li}^+$  的氧三角平面内。显然,每一个  $\text{H}^+$  取代  $\text{Li}^+$  后,会减小  $P_s$ 、 $\text{Li}^+$  对总的自发极化

强度的贡献。如果在波导层中, 缺  $\text{Li}^+$  的浓度为  $\Delta N(x)$  ( $x$  为波导层深度, 浓度系指单位体积原子数), 则总的自发极化强度可表达为

$$\Delta P_s = P \cdot \Delta N(x) \quad (1)$$

式中  $P$  是由于缺一个  $\text{Li}^+$  引起的偶极矩的减小。因此, 通过线性电光效应引起的非寻常光(即  $e$  光) 折射率变化  $\Delta n_e$  可表达为

$$\Delta n_e = -\gamma_{33} \cdot n_e^3 \cdot \Delta N \cdot p / 3\epsilon_0(\epsilon_{33} - 1) \quad (2)$$

为了验证上式的正确性, 可以考虑在通常情况下,  $\text{Li}$  与最近的氧平面的距离为  $0.0714 \text{ nm}$ 。晶体内, 单位体积  $\text{Li}$  的原子数约为  $1.89 \times 10^{28} / \text{cm}^3$ , 在室温下, 当工作波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  时, 取  $\gamma_{33} = 32.2 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ,  $\epsilon_{33} = 28$ ,  $\epsilon = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ,  $n_e = 2.2019$ , 代入(1)式和(2)式中可以计算出  $\Delta n_e = 0.11$ 。实验上获得的数据为  $0.12$ , 两者符合良好。Jolivares 等人给出晶体寻常光折射率变化量  $\Delta n_o$  与非寻常光折射率间的经验公式为<sup>[3]</sup>

$$\Delta n_o = 0.007 - 0.4 \Delta n_e \quad (3)$$

由此条件可以得出  $\Delta n_o = -0.04$ 。显然, 经过质子交换后, 非寻常光折射率有明显增加, 而寻常光折射率则有所减小。这就形成了一种特殊波导。然而对于寻常光却只能在波导上表面形成全反射, 而在下表面(即波导与衬底面)则形成泄漏波。这部分光随着光的传输很快就衰减掉了。因此, 这种器件出射的光是偏振光。

## 2.2 器件偏振消光比的计算

偏振消光比是偏振器的一个非常重要的物理参数, 其定义为

$$E = -10 \log(I_{\text{out}}^{\parallel} / I_{\text{out}}^{\perp}) \quad (4)$$

式中  $I_{\text{out}}^{\parallel}$  表示偏振方向平行于入射面的输出光强(即 TM 波, 为寻常光), 而  $I_{\text{out}}^{\perp}$  表示偏振方向垂直于入射面的输出光强(即 TE 波, 为非寻常光)。由于 TE 波在波导中形成导波, 在忽略传输损耗情况下,  $I_{\text{out}}^{\perp} \approx I_{\text{in}}^{\perp}$ 。因此, 计算偏振消光比主要在于计算 TM 波的输出光强。从导波光学可以求出对于 TM 波的平面波导色散方程为<sup>[5]</sup>

$$2n_1 k d \cos \theta_i - \delta_{\parallel}^{(1,2)} - \delta_{\parallel}^{(1,3)} = 2m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

式中  $\delta_{\parallel}^{(1,2)}$  和  $\delta_{\parallel}^{(1,3)}$  分别表示 TM 波在二层介面间反射相位差。对于本文所研制的波导偏振器, 由于 TM 波在 1, 2 介面(即波导-衬底)间形成泄漏波, 因此其相位差可近似取  $\delta_{\parallel}^{(1,2)} = \pi$ , 而对于上表面则有

$$\delta_{\parallel}^{(1,3)} = 2 \text{tg}^{-1} \left[ \frac{(n_1/n_3) \sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_3/n_1)^2}}{\cos \theta_i} \right] \quad (6)$$

代入色散方程(5)中可以得出

$$\begin{aligned} 2n_1 k d \cos \theta_i - \pi - 2 \text{tg}^{-1} \left[ \frac{(n_1/n_3) \sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_3/n_1)^2}}{\cos \theta_i} \right] \\ = 2m\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

从上式可以得出不同  $m$  值, 即不同模阶数对应于不同的  $\theta_i$  角。而 TM 模在下表面每一次反射光振幅与入射光振幅之比为

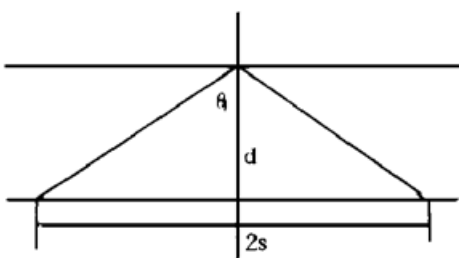


Fig. 1 Propagate light in plane waveguide

$$\zeta_{//} = \frac{n_2 \cos \theta_i - (n_1/n_2) \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_2 \cos \theta_i + (n_1/n_2) \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (8)$$

如图 1 所示。光线在波导层上下表面往返一次沿轴向前进的长度为  $2s$ ，若波导层厚度为  $d$ ，则  $s = d \operatorname{tg} \theta_i$ 。所以在长度为  $L$  的波导区内，反射次数为  $n = (L/2d \operatorname{tg} \theta_i)$ 。TM 模经过  $n$  次反射后，所剩能量与入射端能量之比，即总反射率为  $R_{//} = r_{//}^n$ 。而输出能量则为  $I_{\text{out}}'' = R_{//} I_{\text{in}}''$ 。这样在相同的 TE 和 TM 入射光强下，可求出消光比为

$$\begin{aligned} E &= -10 \log (I_{\text{out}}''/I_{\text{in}}'') = -10 \log (I_{\text{out}}''/I_{\text{in}}'') = -10 \log R_{//} \\ &= -10 \left[ \frac{L}{2d \operatorname{tg} \theta_i} \right] \log \left[ \frac{n_2 \cos \theta_i - (n_1/n_2) \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_2 \cos \theta_i + (n_1/n_2) \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}} \right]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

从上式可见，波导中传播角越小，消光比越大。实际上，随着  $\theta_i$  的减小，除基模外，其它模式很快就衰减掉了。所以，在质子交换光波导偏振中，只能以基模传输。图 2 是对于  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  波导偏振器消光比理论计算与实验测试值。

质子交换波导层折射率  $n_1$  与衬底折射率  $n_2$  之差  $\Delta n$  是影响偏振器性能的主要因素之一。因此，研究二者的关系是改善器件性能的关键所在。 $\Delta n$  越大，消光比越小。为了提高器件性能，就必须改善质子交换条件使  $\Delta n$  至少不超过 0.05，这样才能很好消除掉  $o$  光。其次，从(9)式可以看出，波导偏振器的长度  $L$  也是决定消光比的主要参数之一。虽然从公式中可知  $E-L$  关系是线性的，但  $L$  不能太长，否则，插入损耗也跟着增大。影响器件性能的第三个因素是波导偏振器的厚度  $d$ 。它与消光比之间的关系比较复杂，必须先求出  $d$  和  $\theta_i$  的关系才能确定  $E-d$  关系。

总之，波导偏振器的消光比正比于器件长度  $L$ 。但选取  $L$  时一定要注意损耗。同时，折射率差  $\Delta n$  越大消光比越小，所以制作时一定要掌握好质子交换时间和退火时间。波导层厚度除了能起到限模作用外，对消光比也有很大影响。然而，在进行器件设计时，不能只考虑消光比一个因素，特别是把偏振器与半导体激光器组合使用构成一个偏振光源时更要注意这一点。

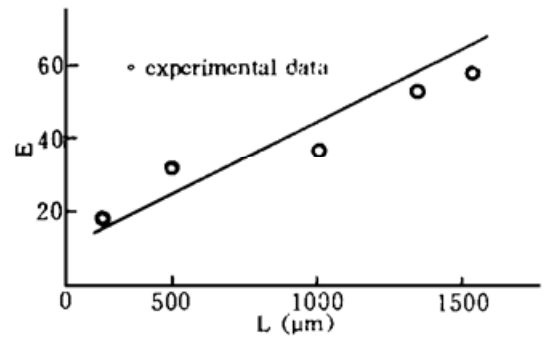


Fig. 2 Relation curve with proton exchange length  $L$  and polarization-extinction rate  $E$  for  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$

### 3 器件的制备与测试

#### 3.1 器件的制备

器件采用  $X$  向切割， $Y$  向传输  $\text{LiNbO}_3$  条形波导结构。工作波长为  $632.8 \text{ nm}$ 。其基本结构如图 3 所示。在条形波导结构上，采用断开条形波导并加入一段质子交换波导区的组合结构。这样，由钛扩散波导区和质子交换区构成组合式光波导型偏振器。为了保证完成工艺制作，钛扩散条形波导区宽度选取  $9 \mu\text{m}$ ，质子交换光波导区宽度为  $10 \mu\text{m}$ ，长度约为  $2 \text{ mm}$ 。

经过精细抛光和清洗的铌酸锂晶体用高频溅射和剥离技术作出间断条形 Ti 膜。在流动的湿氩气和  $1050^\circ\text{C}$  高温下，扩散 9 h 后，在氧气中降温至  $600^\circ\text{C}$ ，制成  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  单模波

导。然后,在衬底表面蒸镀一层  $0.2\ \mu\text{m}$  铝膜。在此铝膜上对准钛扩散区波导间断处套刻出光子交换波导图形,再经过腐蚀去掉质子交换区的铝掩膜,进行质子交换。这是制作工艺中比较关键的一步。将样品置于  $30\ \text{cm}$  高的玻璃管中并灌入苯酸粉末至管  $1/3$  高度,将管口密封后置于恒温  $210^\circ\text{C}$  的交换炉中  $25\ \text{min}$ ,取出样品在空气中退火  $2.5\ \text{h}$  制成光波导型偏振器芯片。退火的目的在于改变器件表面折射率分布,同时也可降低波导损耗,增加扩散深度。最后,对器件两端面进行清洗、抛光,并同  $632.8\ \text{nm}$  光纤进行耦合粘接,将其封装盒内,制成完整的  $632.8\ \text{nm}$  质子交换铌酸锂光波导  $\text{TE}_0$  模偏振器。整体器件长度约  $2.3\ \text{cm}$ ,宽度约  $1\ \text{cm}$ 。

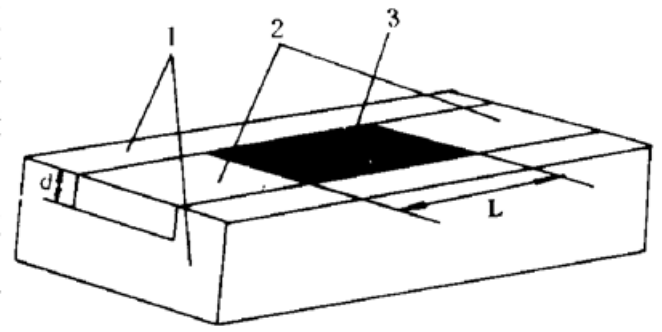


Fig. 3 Structure figure of  $\text{LiNbO}_3$  proton exchange optical waveguide polarizers  
1:  $\text{LiNbO}_3$  substrate; 2: Ti-diffuse region; 3: photon exchange region; L: exchange region length; d: exchange region thickness

### 3.2 器件的测试

测试偏振消光比特性参数的装置如图 4 所示。测试原理如下:从 He-Ne 激光器出射的波长为  $632.8\ \text{nm}$  的随机偏振光经过起偏器、 $\lambda/4$  波片后成为圆偏振光,经过格兰棱镜变成振幅恒定但振动方向可调的线偏振光,再经由扩束器,短焦透镜耦合进光纤输入端。再经波导偏振器、单模光纤输出端与探测器探头耦合,由 P-W 功率计进行功率测量。通过改变格兰棱镜取向就可测出入射光偏振方向与波导偏振器消光比间关系曲线。

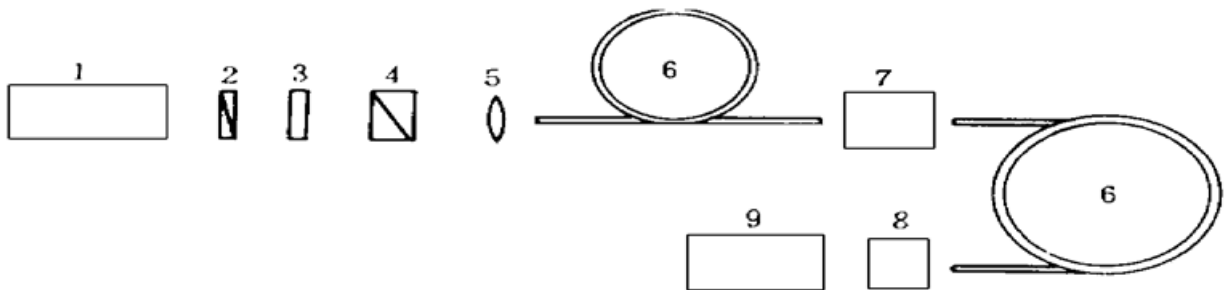


Fig. 4 Experimental setup of measured polarization-extinction ratio

1: He-Ne laser; 2: polarizers; 3:  $\lambda/4$  wave-plane; 4: prism; 5: lens; 6: single mode fiber; 7: waveguide polarizers; 8: detector; 9: dynamometer

测试条件为, He-Ne 激光器输出功率为  $3\ \text{mW}$ ,测试温度为  $21.6^\circ\text{C}$ ,测试结果如表 1 所示。这种测试方法的主要优点是测试结果明显,对激光功率要求不高,受外界影响甚小。这是因为从波导偏振器出射的光是直接由尾纤耦合进探测器探头,所以背景光几乎进不到探头的缘故。但是,探测方法要求探测元件必须保持严格的同轴性,否则将严重影响测试精度。

Table 1 Measured data of polarization-extinction ratio

	output power					mean value
	1	2	3	4	5	
TE (nW)	24.08	16.64	19.51	19.42	23.80	
TM (pW)	2.25	1.56	1.68	1.34	2.37	
extinction (dB)	40.29	40.28	40.43	40.50	40.01	40.54

结 论 利用波导光学理论可以对质子交换波导偏振器进行理论分析并对影响偏振消光比的

各因素进行数字模拟计算并指导器件优化设计,从而提高器件的性能。由于质子交换法制作波导具有光损耗小、传输损耗低、制作简单,且器件经过退火处理后可降低损耗,增大质子扩散深度并便于波导区模式匹配等优点。因此大都采用这种方法研制器件。利用这种方法,制备参数选择是至关重要的。如质子交换温度、交换时间、退火时间,退火温度,器件波导区的长度、厚度、折射率差等都对器件的通光效率,损耗,消光比等产生重大影响。而在参数测试方面,光源的不稳定性、背景光,各测试元件的同轴性都直接影响测试精度。如何提高器件性能和寻求更精确的测试方法是开展这方面工作的重要课题。同时,对 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 质子交换光波导偏振器研制中所取得的经验也为其它类型波导偏振器如金属包覆光波导偏振器的研制提供理论和测试依据。今后,随着它在光信息科学等领域中应用不断扩大,波导偏振器一定会有更大发展。

### 参 考 文 献

- [1] Suchski P G, Findakly T K, Lindakly F J. Low-loss high extinction polarizers fabricated in LiNbO<sub>3</sub> by proton exchange. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(2): 170~ 174
- [2] Veselka J J, Bogert G A. Low-loss TM-pass polariser fabricated by proton exchange for Z-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguides. *Election. Lett.*, 1987, **23**(1): 29~ 31
- [3] Jolivares, Diaz-Gabrera M A. Direct measurement of ordinary refractive index of proton exchanged LiNbO<sub>3</sub> waveguide. *Opt. Commun.*, 1992, **92**(1, 2, 3): 40~ 44
- [4] 高富斌, 金峰, 邢汝冰等, 1.5 μm 质子交换铌酸锂光波导 TE<sub>0</sub> 模偏振器。光学学报, 1995, **15**(8): 1102 ~ 1105
- [5] 徐森禄, 凌世德, Loulefrgue, 光波导及其应用, 浙江大学出版社, 1990: 46~ 53

## Study of Proton Exchange Optical Waveguide Polarizers at 632.8 nm

Feng Kecheng<sup>1</sup> Li Ling<sup>2</sup> Jioa Wentao<sup>1</sup> Wang Zhaomin<sup>1</sup>

1. Department of Optical Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022

2. Department of Physics, Siping Educational College, Siping 136000

(Received 17 August 1996; revised 22 December 1996)

**Abstract** Optical waveguide polarizers in visible light region — 632.8 nm have been fabricated in LiNbO<sub>3</sub> by proton exchange technology. Measuring setup are introduced. The polarization-extinction ratio are calculated and analysed with physical optics and waveguide optics. The experimental results coincide well with theoretically calculated data.

**Key words** proton exchange optical waveguide polarizers, waveguide dispersion theory, polarization-extinction ratio.