

# 1.5 $\mu\text{m}$ 质子交换铌酸锂光波导 $\text{TE}_0$ 模偏振器\*

高福斌 金 锋 邢汝冰

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

冯克诚

(长春光学精密机械学院光学物理系, 长春 130022)

**摘 要** 在 1.5  $\mu\text{m}$  光波长, 首次研制出质子交换铌酸锂光波导  $\text{TE}_0$  模偏振器。器件由嵌在 Ti 扩散波导之间的一段质子交换波导构成, 器件长度为 2 mm。实验测得, 偏振器的消光比和带尾纤插入损耗分别为 42 dB 和 4.3 dB。

**关键词** 质子交换, 铌酸锂光波导, 光波导偏振器。

## 1 引 言

在光纤通讯和光纤陀螺回路系统中使用的集成光路都必须在单一偏振态工作。因此, 精确控制光波导中光波的偏振态是系统正常工作的首要条件。利用质子交换波导的偏振选择特性工作的质子交换铌酸锂光波导偏振器, 因其尺寸小, 偏振消光特性好, 并且便于与其它光波导器件集成而日益受到重视。目前已经报导了工作在 0.85  $\mu\text{m}$  和 1.3  $\mu\text{m}$  波长的质子交换铌酸锂光波导偏振器<sup>[1,2]</sup>, 器件消光比分别大于 50 dB 和 40 dB, 但是在 1.5  $\mu\text{m}$  波长工作的同类器件未见报导。为适应相干光通讯系统的需要, 本文首次设计并研制出 1.5  $\mu\text{m}$  质子交换铌酸锂光波导偏振器。

## 2 寻常光损耗系数

实验表明, 在质子交换铌酸锂光波导中, 非寻常光折射率增大, 而寻常光折射率减小, 折射率分布为准阶跃分布<sup>[3]</sup>。因此, 其寻常光模式的损耗可由图 1 所示的单侧漏波导结构描述, 其中  $n_1$ 、 $n_2$  和  $n_3$  分别为薄膜、衬底和空气的折射率, 且  $n_2 > n_1 > n_3$ ,  $d$  为薄膜厚度,  $\theta$  为光线在薄膜界面的入射角。薄膜中的寻常光在上表面发生全反射, 而在下表面发生折反射, 形成单侧漏模。

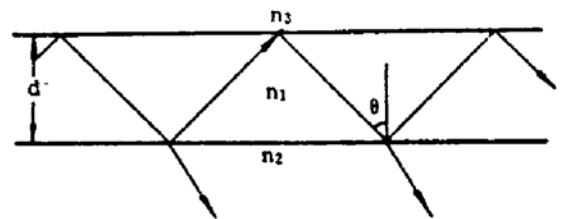


Fig. 1 One side leaky-waveguide

寻常光在薄膜中沿纵向传输, 其所携带的功率

\* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1994 年 5 月 23 日

可写成<sup>[4]</sup>

$$P = 2|S|d \sin \theta, \quad (1)$$

式中  $S$  为玻印廷矢量。寻常光在薄膜下界面发生折反射, 产生功率损耗, 每单位长度内的功率损耗可表示为

$$\Delta P = |S| \cos \theta (1 - R), \quad (2)$$

式中  $R$  为薄膜下界面的反射率, 可写成

$$R = [(a'\kappa - \rho)/(a'\kappa + \rho)]^2, \quad (3)$$

$$a = n_2/n_1, \quad \kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}, \quad \rho = \sqrt{n_2^2 k_0^2 - \beta^2},$$

式中,  $J$  取 0 或 2 分别对应于 TE 模和 TM 模,  $\beta = k_0 N$  为漏模的纵向传播常数,  $N$  为漏模的有效折射率,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空传播常数,  $\lambda$  为光波长。

由(1)、(2)和(3)式可得寻常光的功率损耗系数为

$$2\alpha = \frac{\Delta P}{P} = \frac{2 a' \kappa^2 \rho}{(a' \kappa + \rho)^2 d \beta}. \quad (4)$$

在薄膜中, 寻常光的单侧共振漏模的模方程可表示为<sup>[5]</sup>

$$k_0 d \sqrt{n_1^2 - N^2} = m\pi + \frac{\pi}{2} + \arctg \left[ \left( \frac{n_1}{n_3} \right)^J \left( \frac{N^2 - n_3^2}{n_1^2 - N^2} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

式中  $m = 0, 1, 2, \dots$  为模阶数。因此, 寻常光功率损耗系数  $2\alpha$  由  $m, n_1, n_2, n_3, J, d$  和  $\lambda$  七个参数决定。

### 3 器件设计

器件采用 X-切 Y-传铌酸锂条形波导结构, 工作波长为 1.5 μm。器件由嵌在 Ti 扩散波导之间的一段质子交换波导组成。Ti 扩散波导宽度为 9 μm, 考虑到质子交换过程中横向扩散程度较 Ti 扩散为大, 因此质子交换波导宽度设计为 9.5 μm。器件结构如图 2 所示, 其中, TM 模为寻常光, 在质子交换波导中泄漏功率而损失掉; TE 模为非寻常光, 在质子交换波导中继续传播。于是, 器件构成 TE<sub>0</sub> 模偏振器。

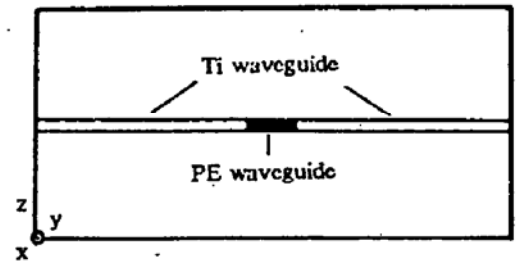


Fig. 2 Schematic drawing of the polarizers

质子交换波导长度取决于其寻常光传输损耗。虽然实际器件为条形渐变波导结构, 但采用如图 1 所示的平板漏波导模型对其寻常光的损耗进行理论估计, 对于器件长度的确定仍具有指导意义。质子交换铌酸锂波导中的非寻常光和寻常光表面折射率增量在退火前分别为  $\Delta n_o = 0.12$  和  $\Delta n_e = -0.04$ <sup>[3]</sup>, 而退火后,  $\Delta n_o$  将下降 25%<sup>[7]</sup>, 即  $\Delta n_o \approx 0.10$ , 根据公式<sup>[8]</sup>

$$\Delta n_o = 0.007 - 0.40\Delta n_e, \quad (6)$$

得退火质子交换波导的寻常光表面折射率增量  $\Delta n_o = -0.033$ 。在 1.5 μm 工作波长, 对应于寻常光, 有  $J = 2, n_o = 2.2125$ <sup>[6]</sup>。假设退火质子交换波导与 Ti 扩散波导的模场处于理想匹配状态, 其折射率分布可由高斯函数描述。因此, 有理由取折射率降为表面折射率的  $1/e$  处的折射率值和有效深度值作为平板漏波导模型的薄膜折射率和厚度, 即  $n_1 = n_o + \Delta n_o/e = 2.2015, d = 6 \mu\text{m}$ 。漏波导模型的其它参数分别取为  $n_2 = n_o = 2.2125, n_3 = 1.0$ 。

对于如图 1 所示的平板漏波导, 根据公式(4)和(5)计算表明, 其零阶模 ( $m = 0$ ) 传输损

耗最小,因此取零阶模传输损耗作为质子交换波导寻常光(即  $TM_0$  模)的传输损耗。根据以上参数由公式(4)和(5)求出质子交换波导  $TM_0$  模的传输损耗系数  $2\alpha = 42.8 \text{ dB/mm}$ 。

考虑到实际器件制作过程中各种工艺条件对器件传输损耗的影响,确定质子交换波导长度为  $2 \text{ mm}$ 。若忽略  $TE$  模的传输损耗,则器件消光比的理论值为  $85.6 \text{ dB}$ 。

## 4 器件制备和测试

在经过精细抛光和清洗的 X-切 Y-传  $\text{LiNbO}_3$  衬底表面,用高频溅射和光刻剥离技术制作出间断的条形 Ti 膜, Ti 膜的条宽和厚度分别为  $9 \mu\text{m}$  和  $0.09 \mu\text{m}$ 。在流动的湿氩气氛和  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  高温下扩散  $9 \text{ h}$ ,在干氧气氛中降温至  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,制成  $1.5 \mu\text{m}$   $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  单模波导。

在衬底表面蒸镀一层  $0.2 \mu\text{m}$  的铝膜,在铝膜上对准钛扩散波导间断处套刻出质子交换波导图形。经过腐蚀,去掉质子交换区域的铝掩膜,将样品置于长为  $30 \text{ cm}$  的玻璃管中并灌入苯甲酸粉末至玻璃管的三分之一高度,玻璃管封口后置于恒温  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  的交换炉中交换  $25 \text{ min}$ 。取出样品在空气中  $360 \text{ }^\circ\text{C}$  下退火  $2.5 \text{ h}$ ,制成偏振器芯片。对器件芯片两端面精细抛光后,与  $1.5 \mu\text{m}$  单模光纤进行耦合粘接,最后将器件封装于铜制封装盒内,制成完整的  $1.5 \mu\text{m}$  质子交换铌酸锂光波导  $TE_0$  模偏振器。

偏振器测量装置如图 3 所示。由  $1.523 \mu\text{m}$  He-Ne 激光器发出的激光束经过格兰棱镜  $P_1$  和  $\lambda/4$  波片  $W_p$  输出圆偏振光。因此,旋转格兰棱镜  $P_2$  即可获得相等功率的任意方向偏振的线偏振光,此线偏振光经由短焦距透镜  $O_o$  耦合进入偏振器输入光纤入端,器件输出光经

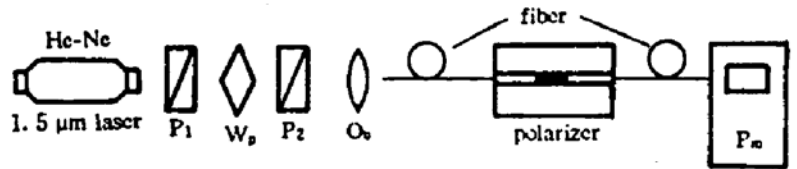


Fig. 3 Setup for characterizing the polarizers

$P_1, P_2$ : Glan-Thompson polarizers,  $W_p$ :  $\lambda/4$  wave plate,  $O_o$ : Objective,  $P_m$ : Power meter

过输出光纤被长波长微光功率计  $P_m$  探测和接收。调节格兰棱镜  $P_2$  分别激励光波导偏振器中相等功率的  $TE_0$  模和  $TM_0$  模(分别对应于输出光强最大和输出光强最小),两偏振光的输出功率之比即为器件的消光比。实验测得器件消光比不低于  $42 \text{ dB}$ 。

器件插入损耗测试采用“剪断法”。首先旋转格兰棱镜  $P_2$ ,激励光波导中的  $TE_0$  模式(对应于输出光强最大),光功率计  $P_m$  接收到的光强显示记作  $I_o$ 。剪断偏振器输入尾纤,去掉偏振器,通过光纤耦合头直接接入功率计,显示记作  $I_i$ 。插入损耗可表示为  $Loss = 10 \times \lg(I_o/I_i)$ 。实验测得带尾纤器件插入损耗为  $4.3 \text{ dB}$ 。

## 5 讨 论

在器件消光比的测量过程中,由于激光源不稳定、背景光和对准机构精度不够等因素直接影响着消光比测量系统的测量极限。若进一步完善测量系统以提高其测量精度,器件消光比测量值将会有所提高。

器件插入损耗取决于光纤-Ti 波导-质子交换波导之间的模场匹配、界面散射以及波导散射等诸多因素,其中, Ti 扩散波导与质子交换波导之间的模场匹配是影响器件插入损耗的关键。可以认为,器件通光效率偏低是由于质子交换波导的制备参数的选择还不尽理想。因此,优化选择质子交换波导的制备参数,即交换温度、交换时间、退火温度和退火时间,将能使

器件通光效率得到明显改善。今后将进一步开展这方面的研究工作。

总之, 本文研制出质子交换铌酸锂光波导  $\text{TE}_0$  偏振器。作为分立器件, 它可用于各种要求单一偏振态工作的光学系统。尤其应用本文的设计和工艺参数, 可将偏振器集成于各种铌酸锂集成光路(例如光纤陀螺用集成光路组件)之中, 从而使集成光路的性能进一步完善。

### 参 考 文 献

- [1] P. G. Suchoski, T. K. Findakly, F. J. Leonberger, Low-loss high-extinction polarizers fabricated in  $\text{LiNbO}_3$  by proton exchange. *Opt. Lett.*, 1988, 13(2): 172~174
- [2] J. J. Veselka, G. A. Bogert, Low-loss TM-pass polariser fabricated by proton exchange for Z-cut  $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$  waveguides. *Electron. Lett.*, 1987, 23(1): 29~31
- [3] J. L. Jackel, C. E. Rice, J. J. Veselka, Proton-exchange for high index waveguides in  $\text{LiNbO}_3$ . *Appl. Phys. Lett.*, 1982, 41(7): 607~609
- [4] D. 马库塞著, 刘弘度译, 介质光波导理论. 北京: 人民邮电出版社, 1982: 34
- [5] 高福斌, 李丽娜, 金锋, 测量液体和气体折射率的集成光学技术单侧和双侧漏模法. *光学学报*, 1989, 9(9): 823~829
- [6] S. Fouchet, A. Carencu, C. Dagué *et al.*, Wavelength dispersion of induced refractive index change in  $\text{LiNbO}_3$  as a function of diffusion parameters. *J. Lightwave Tech.*, 1987, LT-5(5): 700~708
- [7] M. De Micheli, J. Botineau, S. Neveu *et al.*, Independent control of index and profiles in proton-exchanged lithium niobate guides. *Opt. Lett.*, 1983, 8(2): 114~115
- [8] Jolivares, M. A. Diaz-Garcia, J. M. Cabrera, Direct measurement of ordinary refractive index of proton exchanged  $\text{LiNbO}_3$  waveguides. *Opt. Commun.*, 1992, 92(1,2,3): 40~44

## 1.5 $\mu\text{m}$ $\text{TE}_0$ -Pass Optical Waveguide Polarizers Fabricated in $\text{LiNbO}_3$ by Proton Exchange

Gao Fubin      Jin Feng      Xing Rubing

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun 130021)

Feng Kecheng

(Department of Optical Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

(Received 23 May 1994)

**Abstract** At 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength,  $\text{TE}_0$  optical waveguide polarizers have been fabricated in  $\text{LiNbO}_3$  by proton exchange for the first time. The polarizer consists of a short proton exchanged waveguide segment between the segments of a discontinuous Ti-indiffused waveguide. The length of the polarizers is 2 mm. The measured polarization-extinction ratio and fibre-coupled insert loss of the polarizers are 42 dB and 4.3 dB, respectively.

**Key words** proton exchange (PE), lithium niobate optical waveguide, optical waveguide polarizer.