

质子交换的新型集成光学 TM 通偏振器的研究*

黄 晖 胡鸿璋 刘锡久 薛 挺

(天津大学应用物理系, 教育部光电子信息工程开放实验室, 天津 300072)

耿 凡

(航天工业总公司津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘 要 提出了用扩钛和质子交换相结合的方法在 x -切, y -传的 LiNbO_3 衬底上制成 TM 通集成光波导偏振器的新方案, 即在扩钛波导两侧的适当位置引入锯齿形的质子交换区。用二维 BPM 法分析了这类新型偏振器的消光特性, 给出了质子交换区几何形状以及质子交换区与扩钛波导之间的间隙对 TE 波消光比的影响, 给出了数值分析结果, 并得到了优于 23 dB 的实验结果。

关键词 集成光波导偏振器, 质子交换, 钛扩散。

1 引 言

集成光波导偏振器是集成光路的关键部件之一, 在光通讯, 光纤陀螺以及光纤传感技术领域内有着重要的应用。因此, 研究高消光比、低损耗的光波导偏振器有重要的现实意义。

质子交换和钛扩散相结合的方法是制作光波导偏振器的方法之一。在有关的文献报道中, 偏振器的制作可用嵌入法^[1](即在连续的钛扩散波导上嵌入一段质子交换区, 组成一个组合波导)和在钛扩散波导两侧简单地引入两个长条形质子交换区^[2, 3]来完成。前一种方案由于在质子交换区与钛扩散波导之间的折射率分布不同, 存在着模式匹配的问题, 致使 TM 波损失较大; 而后一种方案, Herrmann 已经指出^[4], 由于长条形质子交换区的非常光折射率较周围衬底高, 整个偏振器近似为一个光波导结构, 因此, 从钛扩散波导进入质子交换区的 TE 模会经质子交换区的外界面反射重新回到钛扩散波导中。当反射 TE 波的相位与初始 TE 波的相位匹配时, 钛扩散波导中的 TE 波消光比因耦合会大大降低。本文较系统地分析了这两种方案的偏振器, 从理论上肯定了在 x -切, y -传的 LiNbO_3 晶体上钛扩散波导两侧引入质子交换区的 TM 通偏振器有较优越的偏光特性, 并发现这类器件的偏光特性主要决定于质子交换区的几何形状和它们与钛扩散波导的距离。在 Herrmann 等人制作的偏振器^[4]基础上, 我们找到了这类偏振器的最佳几何形状和尺寸, 并且制成了实际的器件, 实验测量的消光比达

* 国家自然科学基金(19674039)资助项目。

收稿日期: 1998-07-13; 收到修改稿日期: 1998-09-25

到 23 dB 以上。

2 理论分析

2.1 原理和设计制作原则

图 1 是新型质子交换 TM 通偏振器的结构示意图。图中阴影部分是质子交换的区域, 这个区域由两个相同的锯齿形组成。经过质子交换和退火后, 阴影区域的非常光折射率增加, 寻常光折射率减小。当 TE 波进入扩钛波导时, 由于波导两侧质子交换区的非常光折射率比钛扩散波导部分高, 因此, 非常偏振光波(TE 波)被耦合进入质子交换区中; 而寻常偏振光波(TM 波)则被集中在扩钛的波导中, 因为那里有最高的寻常光折射率。

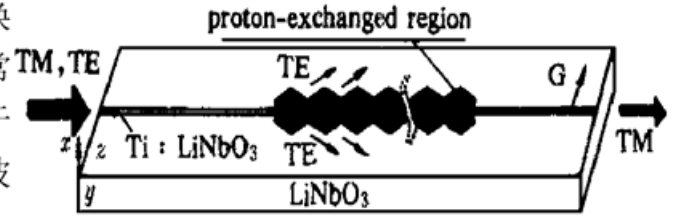


Fig. 1 Configuration of the TM-pass polarizer

在这类偏振器中, 影响 TE 模消光比的主要原因是, TE 光波经质子交换区外界面反射会回到钛扩散波导中来。因此, 有效地减小反射的 TE 波耦合到钛扩散波导的可能性, 或者有效地增加波导中的 TE 波耦合进入质子交换区的透射率, 都能达到增加 TE 模消光比的作用。实际上, 由于质子交换区的 n_e 高于衬底的 n_e , 从钛扩散波导中进入质子交换区的 TE 波不会立刻进入衬底中, 随着传导, 质子交换区域的 TE 模愈来愈强, 这样将大大阻碍钛扩散波导中 TE 模的衰减。从以上分析可以看出, 将质子交换区的外界面做成破坏性界面, 以便增加其中 TE 波向周围衬底的透射率和减小 TE 波的反射率, 能够很好地增大钛扩散波导的 TE 波消光比。因此, 寻找一个合适的破坏性界面和将质子交换区置于钛扩散波导的合适位置, 是设计一个性能优越的偏振器的关键。

2.2 特性分析

1) 光波场的数学模型

为了分析偏振器的 TE 模的消光特性, 需用光束传播法(BPM)^[5]来计算 TE 模在偏振器中的场分布。在弱渐变折射率条型波导中存在两种模——准 TE 模和准 TM 模, 由于 LiNbO₃ 晶体的介电张量是对称垂直的, 所以准 TE 模和准 TM 模之间没有耦合。因此, 这两个偏振光可用变形的亥姆霍兹方程求解^[6]:

$$\left[\alpha_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \alpha_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_0 n_i^2(x, y, z) \right] \psi = 0, \quad (1)$$

式中 k_0 表示真空中波数; 对如图 1 所示的 LiNbO₃ 晶体, 其它各量可表示成:

$$\begin{aligned} \text{TE: } \psi &= E_z, & n_i &= n_e, & \alpha_x &= 1, & \alpha_z &= n_e/n_o; \\ \text{TM: } \psi &= H_z, & n_i &= n_o, & \alpha_x &= \alpha_z &= 1. \end{aligned}$$

2) 折射率改变量的数学模型

关于非常光(e 光)和寻常光(o 光)的折射率分布可表示为

$$n_i(x, y, z) = \begin{cases} n_{i,s} + \Delta n_{i,l}(x, y, z) + \Delta n_{i,e}(x, y, z) & x < 0, \\ 1, & x > 0, \end{cases} \quad i = o, e, \quad (2)$$

式中 $n_{i,s}$ 是衬底折射率; $\Delta n_{i,l}$, $\Delta n_{i,e}$ 分别表示因钛扩散和质子交换而引起的折射率的变化, 可分别按文献[7]和[8]给出的方法计算得出。关于非常光折射率的改变量的分布, 在质子交

换区为阶跃型，在钛扩散波导区域为渐变型。非常光总的折射率变化截面如图 2 所示。

3) 质子交换区的几何形状对消光比的影响

有效地减小钛扩散波导中出来的 TE 模强度是需要考虑的。分析了三种不同几何形状的质子交换偏振器，并用光束传播法分别计算了它们各自的消光比，在运用光束传播法时，将 $45 \times 10 \mu\text{m}$ 的横截面分成 256×256 个点，步长取 $2 \mu\text{m}$ ，计算结果如图 3~ 图 5 所示。

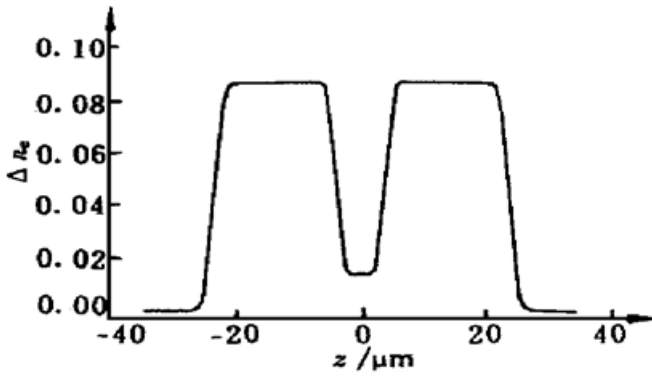


Fig. 2 The profile of the extraordinary refractive index changing

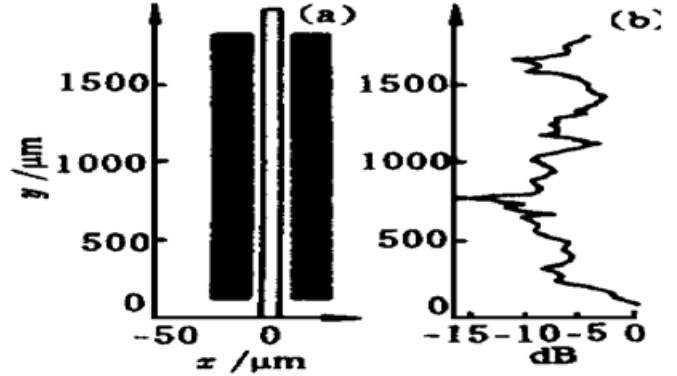


Fig. 3 The rectangular shaped polarizer (a) and its TE-extinction ratio (b)

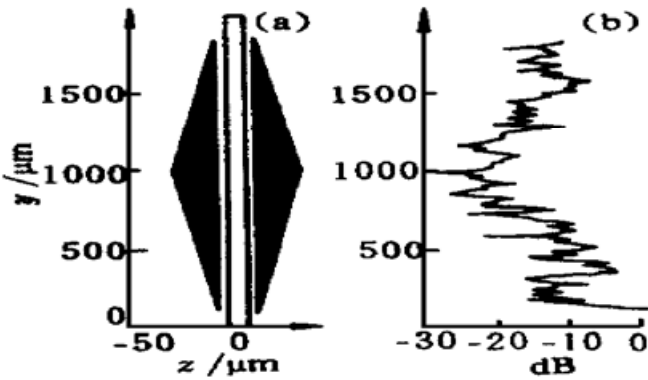


Fig. 4 The triangular shaped polarizer (a) and its TE-extinction ratio (b)

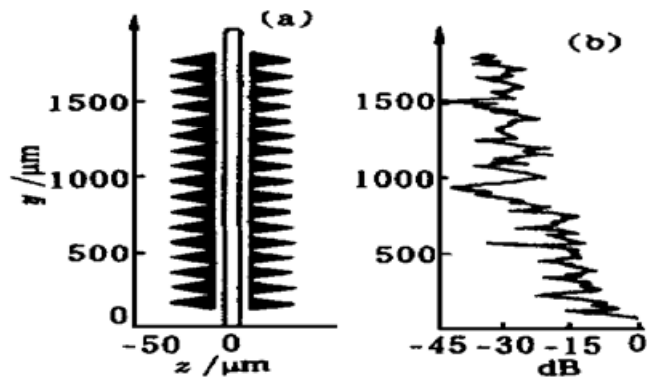


Fig. 5 The zig-zag shaped polarizer (a) and its TE-extinction ratio (b)

第一种偏振器的质子交换区域为长条形^[2, 3]，相当于一个很好的条形波导。经其外表面反射进入钛扩散波导的 TE 波的波矢量方向没有变，与原扩钛波导中的 TE 波只存在相位的差别，二者容易耦合而增强钛扩散波导中 TE 模的强度，致使光波导偏振器的 TE 波消光比较低。针对这个缺陷，第二种模型的质子交换区的外界面有了一定的破坏性，从图 4(b) 可以看出 TE 模消光比第一种明显增大，且在传播方向上基本呈对称分布。这主要是由于反射 TE 波波矢量发生对称性变化，引起耦合光强也发生对称性变化的结果。从这可以看出改变质子交换区外表面的几何形状能极大地增大 TE 波的消光比。为了克服三角形偏振器后半部分消光效率低的情况，在第三种模型中，即在锯齿形偏振器中，它的质子交换区采用了更具破坏性的锯齿形反射界面。这可以更有效地增加质子交换区外表面处的透射光强和抑制 TE 波的

反射耦合，因此这种偏振器有更好的消光性能，如图 5 所示。对于这类偏振器模型，本文作者在参数优选的基础上，得到了如图 6 所示的最佳的设计尺寸，并以此制作了样品，进行了实验测定。

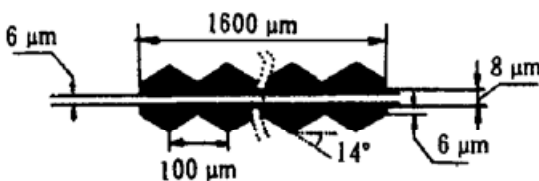


Fig. 6 Detailed design of the TM-pass polarizer

偏振器与其它光学器件集成在一起时，无论其长或宽都要求非常精确的小尺寸。计算发现，当质子交换区

的宽度(即图 6 中在波导垂直方向上两对称锯齿的顶点间的距离)超过 $30 \mu\text{m}$ 时, 它的变化对 TE 模消光比影响不大。偏振器的长度也不是越长越好, 它对消光比的影响呈波动性变化。为了集成的需要, 一般设计在 2 mm 以内, 因此, 本文作者的设计完全符合应用要求。

3 器件制作与实验测量

TM 通偏振器的实际制作过程如下: 1) 在经过彻底清洗的 x -切, y -传的 LiNbO_3 基片上用剥离工艺溅射上若干厚度为 65 nm 、宽度为 $6 \mu\text{m}$ 的钛条, 然后在 1050°C 高温中扩散 5.5 小时, 得到性能良好的单模扩钛条形波导; 2) 在基片上溅射厚度为 200 nm 的铝膜, 并用剥离工艺在光波导两侧产生锯齿形窗口, 以便进行质子交换; 3) 采用掺 $1 \text{ mol}\%$ 苯甲酸锂的苯甲酸做质子交换源, 交换温度为 250°C , 交换时间 15.5 小时; 4) 将交换后的样品用乙醇洗净后, 在充氧条件下, 在 330°C 的温度下退火 3.5 小时; 5) 用磷酸将铝膜除去, 并将两端面抛光, 就制成了 TM 通偏振器。

为消除光源功率波动的影响, 采用了双光路法检测光波导偏振器的消光比, 如图 7 所示。

其中, 波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的激光用作对准光路的辅助光源(测量时关闭此激光器)。波长为 $1.152 \mu\text{m}$ 的激光经 40 倍物镜聚焦后, 被分成两束。其中一束作为参考光路直接被探测器接收, 用于对光功率进行监控; 另一束作为样品光路, 耦合进入光波导, 输出端用一根单模光纤将光耦合并送到光功率计的探头中进行测量。先让线偏振光的电场方向沿波导的消光方向, 即输入光波为 TE 波, 由探测器 M 探测到光功率 P , 探测器 N 测得参考光功率 P_1 ; 然后将样品旋转 90° , 使输入光波为 TM 波, 用探测器 M 和 N 分别测得通光方向输出光功率 P_0 和参考光功率 P_2 , TE 波消光比可由 $10 \lg(\frac{P}{P_0} \cdot \frac{P_2}{P_1})$ 计算。当 $P_1 = P_2$ 时, 消光比由 $10 \lg(\frac{P}{P_0})$ 给出。在每次测量时, 都要仔细调节, 以便使耦合达到最佳状态, 使输出光功率达到最大值。在同一片样品上, 制作了多条光波导, 从中选择两条, 按图 6 的设计方案制成 TM 通偏振器, 经测量, 它们的消光比分别为 -23.5 dB 、 -23.1 dB 。

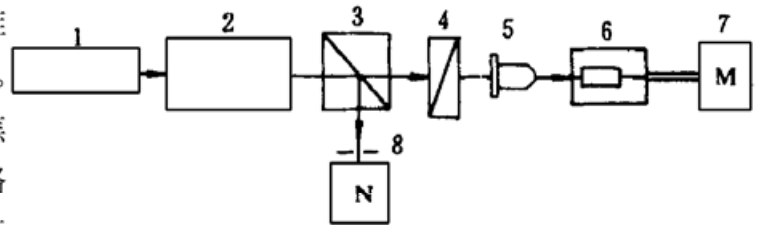


Fig. 7 Experimental setup measured polarization-extinction ratio. 1: He-Ne laser ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$), 2: He-Ne laser ($\lambda = 1.1523 \mu\text{m}$), 3: beam splitter, 4: Glan-Thompson polarizer, 5: micro-objective ($40\times$), 6: waveguide polarizer, 7: monomode fiber, 8: diaphragm, N, M: detectors

将样品旋转 90° , 使输入光波为 TM 波, 用探测器 M 和 N 分别测得通光方向输出光功率 P_0 和参考光功率 P_2 , TE 波消光比可由 $10 \lg(\frac{P}{P_0} \cdot \frac{P_2}{P_1})$ 计算。当 $P_1 = P_2$ 时, 消光比由 $10 \lg(\frac{P}{P_0})$ 给出。在每次测量时, 都要仔细调节, 以便使耦合达到最佳状态, 使输出光功率达到最大值。在同一片样品上, 制作了多条光波导, 从中选择两条, 按图 6 的设计方案制成 TM 通偏振器, 经测量, 它们的消光比分别为 -23.5 dB 、 -23.1 dB 。

实验结果与理论结果比较, 消光比低了 5 dB 。考虑器件的设计和制作过程, 可将这些误差归结于两个来源: 1) 图 6 中的质子交换区是在做完光波导后再套刻的。在套刻时, 不容易做到完全对称, 光波导两侧的间隙很可能不相等。经光束传播法计算, 当光波导两侧的间隙相差 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 时, 就会使 TE 波消光比降低约 3 dB 。2) 计算中所用的折射率分布的模型毕竟是近似的。考虑到这些因素, 实验结果与理论值还是符合的。

实验结果与理论结果比较, 消光比低了 5 dB 。考虑器件的设计和制作过程, 可将这些误差归结于两个来源: 1) 图 6 中的质子交换区是在做完光波导后再套刻的。在套刻时, 不容易做到完全对称, 光波导两侧的间隙很可能不相等。经光束传播法计算, 当光波导两侧的间隙相差 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 时, 就会使 TE 波消光比降低约 3 dB 。2) 计算中所用的折射率分布的模型毕竟是近似的。考虑到这些因素, 实验结果与理论值还是符合的。

结 论 较系统地分析了用扩钛和质子交换结合制作 TM 通集成光波导偏振器的设计原则, 而且给出了一种新型的光波导偏振器设计, 其实验结果与理论值基本符合, 同理, 也可在 z -切、 y -传的 LiNbO_3 上制作具有同样优越偏光性能的 TE 通偏振器。

参 考 文 献

- [1] 冯克成, 李 凌. 632.8 nm 波长质子交换光波导型偏振器的研究. 光学学报, 1997, **17**(7) : 941~ 945
- [2] Papuchon M, Vatoux S. Integrated optical polarizer on LiNbO₃ ·Ti channel waveguides using proton exchange. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(7) : 612~ 613
- [3] 季家裕, 冯 莹. 集成光学 TM 模偏振器的制作. 光学学报, 1997, **17**(3) : 373~ 375
- [4] Herrmann H, Muller-Reich P, Reimann V. Integrated optical, TE- and Tm-pass, acoustically tunable double-stage wavelength filters in LiNbO₃. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(7) : 642~ 644
- [5] Feit M D, Fleck J A. Calculations of dispersion in graded-index multimode fibers by a propagating beam-method. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(2) : 2843~ 2851
- [6] Strake E, Bava G P, Montrosset I. Guided mode of Ti ·LiNbO₃ channel waveguide. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6) : 1126~ 1134
- [7] Mc Wright M, Howerton, Burns W K *et al.*. Dependence of refractive index on hydrogen concentration in proton exchanged LiNbO₃. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **27**(3) : 593~ 601
- [8] Charczenko W, Januar I, Mickelson A R. Modelling of proton-exchanged and annealed channel waveguides and directional couplers. *J. Appl. Phys.*, 1992, **73**(1) : 39~ 40

Study on A Novel Integrated Optical Proton Exchanged TM-Pass Polarizers in LiNbO₃

Huang Hui Hu Hongzhang Liu Xijiu Xue Ting

(Department of Applied Physics, Tianjin University,
Open Laboratory of Photoelectronics and Information Engineering,
National Ministry of Education, Tianjin 300072)

Geng Fan

(China Spaceflight Industry Corporation, Jinhang Technical Physics Institute, Tianjin 300192)

(Received 13 July 1998; revised 25 September 1998)

Abstract A new method to fabricate TM-pass polarizers by introducing zig-zag shaped proton-exchanged regions adjacent to a Ti-diffusion waveguide on X-cut, Y-propagation lithium niobate is presented. A two-dimension BPM (Beam Propagation Method) has been used to analyse this new kind of polarizer. The performance of the device is shown to depend strongly on the geometrical shapes of the proton exchange regions and their distances to channel waveguide. Through optimizing the parameters, a perfect device have been realized, and a TE-extinction of 23 dB has been obtained experimentally.

Key words integrated optical polarizer, proton exchange, Ti-diffusion.