

1.5 μm Ti : LiNbO₃光波导 TE₀ 模偏振器

金 锋 祝 光

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

提 要

在 1.523 μm 波长 He-Ne 激光, 对于 Z-切 Ti 扩散 LiNbO₃ 光波导及其带有金属包覆/介质缓冲层的偏振器结构, 理论上计算了单模波导的工艺参数和基模的吸收损耗系数. 文中用 TM₀ 模的共振吸收效应, 在 1.5 μm 波长首次研制成 Ti : LiNbO₃ 光波导 TE₀ 模偏振器, 当器件长度为 2 mm 和 9 mm 时, 其消光比分别为 20 dB 和 25 dB.

关键词 Ti : LiNbO₃ 光波导, 金属包覆波导, 光波导偏振器.

1 引 言

近十年来, 在 Ti 扩散 LiNbO₃ 集成光路中引入各种结构的光波导偏振器, 并在 0.6328 μm 、0.85 μm 、1.3 μm 波长均有研究报道. 其中, 最有发展前途的光波导偏振器是采用一小段带有金属包覆/介质缓冲层的光波导共振吸收结构^[1,2], 或者采用一小段质子交换光波导结构^[3,4]. 这两种光波导偏振器具有明显的优点, 如器件尺寸小, 消光比高, 插入损耗小, 易于单片集成等. 在 1.3 μm 波长, 当器件长度为 2 mm 时, 前一种光波导偏振器的消光比达到 35 dB^[2].

1.5 μm 波长位于石英光纤的零色散区域, 是大容量长距离光纤通信所采用的波长之一. 在此波长, 已研制出 Ti 扩散 LiNbO₃ 光波导器件^[5], 但是尚未见到有关相应光波导偏振器的研究报道. 本文在 He-Ne 激光器 1.523 μm 波长, 对于 Z-切 Ti 扩散 LiNbO₃ 光波导及其带有金属包覆/介质缓冲层的偏振器结构, 理论上计算出单模波导工艺参数和 TM₀ 模共振吸收特性, 在 1.5 μm 波长首次研制出 Ti : LiNbO₃ 光波导 TE₀ 模偏振器, 并对此进行了测量和讨论.

2 单模波导工艺参数

要研制的 1.5 μm Z-切 Ti : LiNbO₃ 光波导偏振器采用单模波导, 必须弄清相应的单模波导工艺参数, 即钛膜厚度 τ 、扩散时间 t 、扩散温度 T (绝对温度)、条波导宽度 w . 精心选择这些单模波导工艺参数, 可以使偏振器的结构优化.

Fouchet 等人在 Z-切 LiNbO₃ 衬底上进行钛扩散, 当表面扩散浓度小于 2% 时, 用逆 WKB 方法证实了高斯型折射率分布及其各向异性^[6].

$$\left. \begin{aligned} n_p(z) &= n_{pb} + \Delta n_p^* \exp(-z^2/d_p^2), z \geq 0 \\ n_p^* &= n_{ps} - n_{pb}, \quad d_p = d_z/a_p^{1/2}, \\ d_z &= 2(D_z t)^{1/2}, \quad D_z = D_{oz} \exp(-E_{oz}/kT), \\ a_{p=0} &= 0.53, \quad a_{p=c} = 0.83, \quad k = 8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}, \\ E_{oz} &= 2.60 \text{eV}, \quad D_{oz} = 5.0 \times 10^9 \mu\text{m}^2/\text{hr} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中脚标 $\rho = o$ 和 e 分别对应于寻常光和非寻常光,脚标 s 和 b 分别对应于波导的表面和衬底, z 为距离表面的深度方向坐标. 在 $0.6 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内, Fouchet 等人通过对实测数据的多项式拟合, 给出钛感应表面折射率增量与波长、波导工艺参数的显函数关系^[6]

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_{\rho}^s &= [B_0^s(\lambda) + B_1^s(\lambda)\tau/d_z](\tau/d_z)^{\alpha_{\rho}}, \\ B_0^s(\lambda) &= 6.53 \times 10^{-2} - 3.15 \times 10^{-2}\lambda + 7.09 \times 10^{-3}\lambda^2, \\ B_1^s(\lambda) &= 0.478 + 0.464\lambda - 0.348\lambda^2; \\ B_0^e(\lambda) &= 0.385 - 0.430\lambda + 0.711\lambda^2, \\ B_1^e(\lambda) &= 9.13 + 3.85\lambda - 2.49\lambda^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $\lambda(\mu\text{m})$ 为真空波长.

在 Z -切 $\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$ 平面波导中, TE 模遇到寻常光折射率 $n_o(z)$, TM 模遇到由非寻常光折射率 $n_e(z)$ 和寻常光折射率 $n_o(z)$ 所决定的折射率, 但是当表面折射率增量很小时可近似视作只遇到 $n_o(z)$. 于是用各向同性介质波导的 WKB 方法, TE 模和 TM 模的模方程可统一写成^[7,8]

$$\begin{aligned} (2\pi/\lambda) \int_0^{Z_m} [n_{\rho}^2(z) - N_m^2]^{1/2} dz &= (m + 1/4)\pi + \varphi_{\rho}, \\ \varphi_{\rho} &= \tan^{-1}(n_{\rho s}/n_c)^{2\alpha} [(N_m^2 - n_c^2)/(n_{\rho s}^2 - N_m^2)]^{1/2}; \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\rho = o$ 和 e , $\alpha = 0$ 和 1 , 分别对应于 TE 模和 TM 模; N_m 为模折射率, $m = 0, 1, 2, \dots$ 为模阶数; n_c 为各向同性包层的折射率; Z_m 为模深度, 由关系 $N_m = n_{\rho}(Z_m)$ 确定. 将截止条件 $N_m = n_{\rho b}$ 和 (1) 式代入 (3) 式, 用截止时的近似 $\varphi \approx (\pi/2)$, 推得截止方程

$$m = 2(d_{\rho}/\lambda)(\pi n_{\rho b} \Delta n_{\rho}^s)^{1/2} - (3/4). \quad (4)$$

设最高阶模的模阶数为 M , 则波导所能维持的模式数量为 $\nu = M + 1$. 由 (2) 式和 (4) 式推得模式数量与波长、波导工艺参数的显函数关系

$$\nu_{\rho}(\lambda, \tau, T, t) = \frac{2d_z}{\lambda} \left\{ \frac{\pi n_{\rho b}}{a_{\rho}} [B_0^s(\lambda) + B_1^s(\lambda) \frac{\tau}{d_z}] (\frac{\tau}{d_z})^{\alpha_{\rho}} \right\}^{1/2} + \frac{1}{4}. \quad (5)$$

由 (5) 式, 单模波导工艺条件可写成

$$1 < \nu_{\rho}(\lambda, T, \tau, t) < 2. \quad (6)$$

在 $\lambda = 1.532 \mu\text{m}$, 用 (5) 式计算出以 τ 为参变量的 $\nu_{\rho} \sim d_z$ 曲线和 $\nu_{\rho} \sim d_z$ 曲线及以 T 为参变量的 $d_z \sim t$ 曲线, 分别示于图 1、图 2 和图 3. 在图 1 和图 2 中, 同 $\nu_{\rho} = 1$ 直线和 $\nu_{\rho} = 2$ 直线及以 $(\tau/d_z) = 0.03$ 为参变量的 $\nu_{\rho} \sim d_z$ 曲线所包围的区域, 就是可供选择单模波导工艺参数的范围.

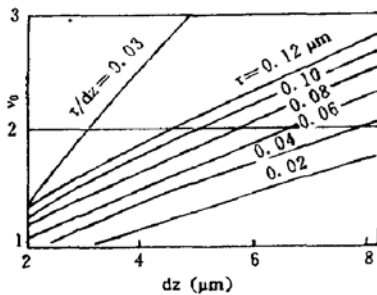


Fig. 1 $\nu_{\rho} \sim d_z$ curves (TE mode, $\lambda = 1.523 \mu\text{m}$, $n_{\rho b} = 2.2125$ ^[6])

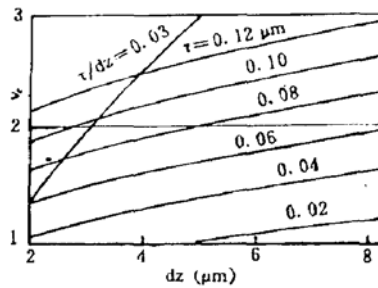


Fig. 2 $\nu_{\rho} \sim d_z$ curves (TM mode, $\lambda = 1.523 \mu\text{m}$, $n_{\rho b} = 2.1383$ ^[6])

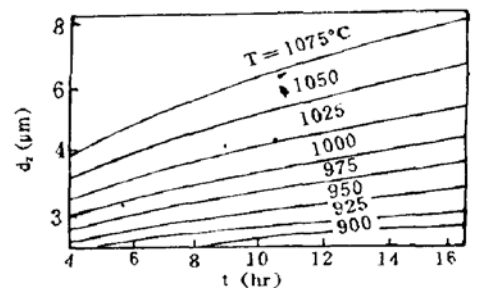


Fig. 3 $d_z \sim t$ curves

先由图 1 和图 2 确定 τ 和 d_z , 再由图 3 确定 T 和 t . $(\tau/d_z) = 0.03$ 对应表面钛扩散浓度 2.3% ^[6]. (5) 式和 (6) 式, 图 1、图 2 和图 3, 虽然由平面波导模型推得, 但是可适用于宽条波导.

为了条形波导与单模光纤的有效耦合,不仅要选取 $v_p \approx 2$ 以使基模处于远离截止,其绝大部分光功率被限制在波导芯区,而且要求条形波导尺寸与光纤芯径相匹配. 兼顾这些要求,据(5)式、(6)式和图 1、图 2、图 3, $1.5 \mu\text{m}$ Z-切 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 单模波导的工艺参数选取为

$$\tau = 80 \text{ nm}, t = 7.86 \text{ hr}, T = 1050^\circ\text{C}, w = 9 \mu\text{m}, \quad (7)$$

相应的单模波导参数为

$$\left. \begin{aligned} v_o &= 1.73, & v_c &= 1.95, & \Delta n_o^* &= 4.783 \times 10^{-3}, \\ \Delta n_c^* &= 1.025 \times 10^{-2} \\ d_z &= 4.50 \mu\text{m}, & d_o &= 6.18 \mu\text{m}, \\ d_e &= 4.94 \mu\text{m}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对于 TE_0 模偏振器, $v_o = 1.73$ 保证 TE_0 模处于远离截止,且其波导尺寸 $d_o = 6.18 \mu\text{m}$ 和 $w = 9 \mu\text{m}$ 基本上同 $1.5 \mu\text{m}$ 单模光纤芯径 $8 \mu\text{m}$ 相匹配.

3 偏振器的吸收损耗

光波导偏振器是在 Z-切 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 单模波导表面沉积一小段金属包覆/介质缓冲层而制成的. 据(1)式和图 4 所示的坐标系,偏振器的折射率分布可写成

$$n^2(\zeta) = \begin{cases} n_m^2, & \zeta < -\delta, \\ n_c^2, & -\delta < \zeta < 0, \\ n_{\rho b}^2 + 2n_{\rho b}\Delta n_{\rho}^* \exp(-\zeta^2), & 0 < \zeta, \end{cases} \quad (9)$$

$$\zeta = z/d_{\rho}, \quad \delta = h/d_{\rho}, \quad n_m = n_m' - in_m''$$

式中 n_c 和 h 分别为介质缓冲的折射率和厚度, n_m 为金属包覆的复数折射率.

关于带有金属包覆的渐变折射率波导的损耗计算, WKB 方法给出较粗的近似^[9], 本文采用波动方程^[9,10]

$$\left. \begin{aligned} d^2\varphi/d\zeta^2 + \{u^2[n^2(\zeta) - N_m^2] - F(\zeta)\}\varphi &= 0, \\ F(\zeta) &= \begin{cases} 0, & \text{TE 模} \\ \frac{3}{4} \left[\frac{1}{n^2(\zeta)} \frac{dn^2(\zeta)}{d\zeta} \right]^2 - \frac{1}{2n^2(\zeta)} \frac{d^2n^2(\zeta)}{d\zeta^2}, & \text{TM 模} \end{cases} \\ \varphi(\zeta) &= \begin{cases} E_y(\zeta), & \text{TE 模} \\ H_y(\zeta)/n(\zeta), & \text{TM 模} \end{cases} \\ u &= (2\pi/\lambda)d_{\rho}, \quad N_m = N_m' - iN_m'' \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $E_y(\zeta)$ 和 $H_y(\zeta)$ 分别为横电场分量和横磁场分量, 模折射率 N_m 变成复数. 为了方便, 将(10)式变成一阶微分方程^[9]

$$\left. \begin{aligned} dG/d\zeta &= -G^2 - u^2[n^2(\zeta) - N_m^2] + F(\zeta), \\ G &= [d\varphi(\zeta)/d\zeta]/\varphi(\zeta) = G_r - iG_i. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

复数方程(11)式可分解为实数微分方程组^[9]

$$\left. \begin{aligned} dG_r/d\zeta &= -G_r^2 + G_i^2 - u^2[n^2(\zeta) - N_m^2 + N_m''^2] + F(s), \\ dG_i/d\zeta &= -2(G_r G_i - u^2 N_m' N_m''). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当 $n_{\rho b} > n_c$ 时, 导模在金属包覆和介质缓冲层中的场分布形式为

$$\varphi(\zeta) = \begin{cases} C \exp(\theta_m \zeta), & \zeta < -\delta, \\ A \exp(\theta_c \zeta) + B \exp(-\theta_c \zeta), & -\delta < \zeta < 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$\theta_m = u(N_m^2 - n_m^2)^{1/2}, \quad \theta_c = u(N_m^2 - n_c^2)^{1/2}.$$

据(13)式,由 E_y 和 $dE_y/d\zeta$ 及 H_x 和 $(dH_x/d\zeta)/n^2(\zeta)$ 在 $\zeta = -\delta$ 和 $\zeta = 0$ 的连续条件,得到 $\zeta = 0_+$ 处的 φ , 以此推得 $\zeta = 0_+$ 处的 G . 于是, G 在 $\zeta = 0_+$ 的边界条件为

$$G(\zeta = 0_+) = \left(\frac{n_{ps}}{n_c}\right)^{2\alpha} \theta_m \left[\frac{1 + (\theta_c/\theta_m)(n_m/n_c)^{2\alpha} \tanh\theta_c \delta}{\tanh\theta_c \delta + (\theta_c/\theta_m)(n_m/n_c)^{2\alpha}} \right] = G_r(\zeta = 0_+) - iG_i(\zeta = 0_+). \quad (14)$$

当 $\zeta \rightarrow \infty$ 时, φ 趋于 $\exp[-u(N_m^2 - n_{pb}^2)^{1/2}\zeta]$, 以此得到 G 在 $\zeta \rightarrow \infty$ 的边界条件

$$G(\zeta \rightarrow \infty) = -u(N_m^2 - n_{pb}^2)^{1/2} = G_r(\zeta \rightarrow \infty) - iG_i(\zeta \rightarrow \infty). \quad (15)$$

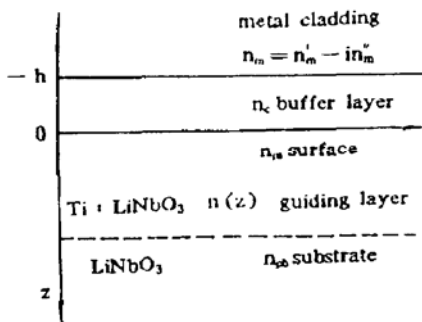


Fig. 4 The coordinate system of the optical waveguide polarizer

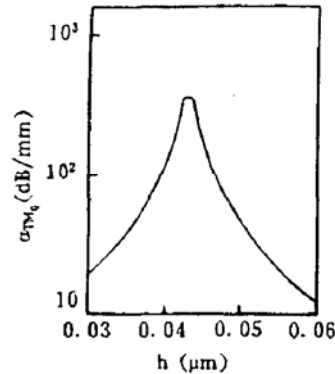


Fig. 5 $\alpha_{TM_0} \sim h$ absorption resonant curves

N_m 和 N_m^* 的计算步骤如下. 先给定一组 N_m 和 N_m^* , 由(14)式计算出 $G_r(\zeta = 0_+)$ 和 $G_i(\zeta = 0_+)$. 然后用这些初始值求解微分方程组(12)式, 由此得到 ζ 很大时的 G . 反复调整 N_m 和 N_m^* , 直到在要求的精度内满足边界条件(15)式为止. 一旦求得 N_m 和 N_m^* , 则导模的吸收损耗系数可表示为

$$\alpha_m(\text{dB/unit length}) = 8.624 N_m^* (2\pi/\lambda), \quad (16)$$

(16)式损耗系数的理论公式, 虽然由平面波导模型推得, 但是同样地适用于宽条波导.

将铝膜和 SiO₂ 膜分别用作金属包覆和介质缓冲层, 在 $\lambda = 1.523 \mu\text{m}$ 其折射率为

$$n_m = 1.415 - i15.65^{[11]}, \quad n_c = 1.460. \quad (17)$$

用(8)式和(17)式中的偏振器结构参数, 由(12)式、(14)~(16)式, 计算出偏振器的吸收损耗系数. 计算表明, TM₀ 模的损耗系数随缓冲层厚度的变化呈现一个共振峰, 如图 5 所示, 相应的共振吸收厚度为 $h_r = 41 \text{ nm}$. 对此缓冲层厚度, TE₀ 模和 TM₀ 模的损耗系数分别为 $\alpha_{TE_0} = 5.98 \times 10^{-3} \text{ dB/mm}$, $\alpha_{TM_0} = 3.62 \times 10^2 \text{ dB/mm}$. 这就说明, 在几 mm 的器件长度内, TM₀ 模的损耗达到几百到上千 dB, 而 TE₀ 模的损耗小到可以忽略不计的程度, 故能实现 TE₀ 模偏振器的高消光比和低插入损耗.

4 制备、测量和讨论

4.1 光波导偏振器的研制

据以上两节中提出的单模波导的工艺参数和偏振器的结构参数, 研制 1.5 μm Z-切 LiNbO₃ 光波导 TE₀ 模偏振器.

在经过抛光和清洗的 Z-切 x-传 LiNbO₃ 衬底上, 用高频溅射和光刻剥离工艺, 制作出十个

条形钛膜,其宽度为 $9\ \mu\text{m}$,厚度为 $80\ \text{nm}$,钛条间距为 $50\ \mu\text{m}$. 在 1050°C 的湿氩氛中扩散 $7.86\ \text{h}$,并在干氧气氛中冷却,形成一组 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 条形波导. 经过端面抛光和通光实验,选择质量好的光波导样品.

在光波导表面,溅射一层 SiO_2 薄膜,并在 500°C 退火 $1\ \text{hr}$,其厚度为 $40\ \text{nm}$. 在 SiO_2 薄膜上面,蒸镀一层 $300\ \text{nm}$ 厚的铝膜,并用光刻工艺在每个条形波导上面蚀刻出不同长度的金属包覆,制成一组光波导偏振器,其长度为从 $1\ \text{mm}$ 变化到 $9\ \text{mm}$,两个相邻偏振器之间相差 $1\ \text{mm}$. 在十个条形波导中,留一个不带金属包覆的光波导,以备插入损耗测试使用.

4.2 测量装置

光波导偏振器的测量装置,如图 6 所示. 其中, $1.523\ \mu\text{m}$ He-Ne 激光器的输出功率为 $0.5\ \text{mW}$, $1.5\ \mu\text{m}$ 光纤极化器的消光比为 $35\ \text{dB}$,微光功率计的探测灵敏度为 pW . 激光束经过短焦距透镜和光纤极化器,耦合入偏振器的输入波导,经偏振器及其输出波导的光,又通过 $1.5\ \mu\text{m}$ 单模光纤被微光功率计检测. 精心调整三维调节架,实现汇集光束与光纤极化器尾纤之间,光纤极化器尾纤与偏振器输入波导之间以及偏振器输出波导与单模光纤之间的最佳耦合.

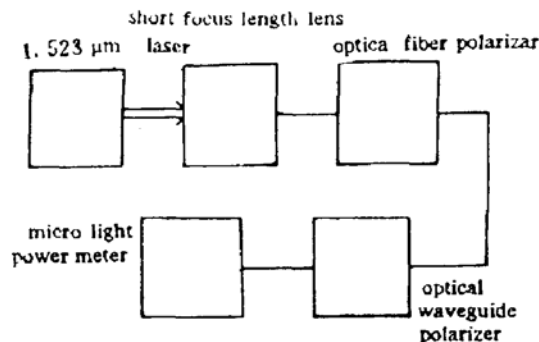


Fig. 6 The measurement apparatus of the optical waveguide polarizer

对于每一个光波导偏振器,用光纤极化器改变输入光的偏振态,分别激励 TE_0 模和 TM_0 模,使其输入光强相同. 于是,这两个偏振模式所对应的微光功率计输出之比就是偏振器的消光比. 从理论上讲,消光比随器件长度的增加而增加. 但是,由于退偏振效应,消光比随器件长度的增加出现饱和现象^[2]. 测量表明,消光比从器件长度 $1\ \text{mm}$ 开始趋于饱和,当器件长度为 $2\ \text{mm}$ 和 $9\ \text{mm}$ 时,消光比分别为 $20\ \text{dB}$ 和 $25\ \text{dB}$. 作为 TE_0 模偏振器. 偏振器的插入损耗可由 TE_0 模在不带金属包覆的光波导和光波导偏振器之间的微光功率计输出之比来确定,其测量值为 $0.6\ \text{dB}$.

4.3 讨 论

器件的消光比不高,有多方面原因:1) 器件设计采用平面波导理论模型,故所设计的结构参数偏离实际条形波导偏振器的优化结构;2) 光波导的边界和折射率分布的不规则性引起 $\text{TE}\rightarrow\text{TM}$ 偏振转换和导模 \rightarrow 衬底模转换,从而导致偏振效应;3) 光折变效应在波导中光功率密度达到一定程度时必将起作用,也引起 $\text{TE}\rightarrow\text{TM}$ 偏振转换;4) 在波导制备过程中,不能精确控制工艺参数,使它们偏离优化的工艺参数.

改进的方法是,器件设计采用条形波导理论模型,严格控制器件的工艺参数,选用高质量的掺镁 LiNbO_3 晶体,并对衬底表面精心抛光等. 此外,若使金属包覆在偏振器两端形成楔形,实现 TE_0 模在偏振器与其输入、输出波导之间的缓变过渡,则能显著降低器件的插入损耗.

综上所述,在 1.5 μm 波长首次研制出 Ti : LiNbO₃ 光波导 TE₀ 模偏振器,当器件长度为 2 mm 和 9 mm 时,其消光比分别为 20 dB 和 25 dB. 文中的理论分析,可供相应器件的设计和制备作参考.

参 考 文 献

- [1] L. L. Buhl, Optical Losses in metal/SiO₂-clad Ti : LiNbO₃ waveguide. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(17):659~660
- [2] J. Ctyroky H. -J. Henning, Thin-film polariser for Ti : LiNbO₃ waveguide at $\lambda=1.3 \mu\text{m}$. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(14):756~758
- [3] J. J. Veselka, G. A. Bogert, Low-Loss TM-pass polarizer fabricated by proton exchange for Z-cut Ti : LiNbO₃ waveguides. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(1):29~30
- [4] P. G. Suchoski, T. K. Findakly, F. J. Leonberger, Low-Loss high-extinction polarizers fabricated in LiNbO₃ by proton exchange. *Electron. Lett.*, 1988, **13**(2):172~179.
- [5] R. C. Alferness, L. L. Buhl, M. D. Divino *et al.*, Low-loss, broadband Ti : LiNbO₃ waveguide phase modulators for coherent systems. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(6):309~310
- [6] S. Fouchet, A. Carencu, C. Daguet *et al.*, Wavelength dispersion of Ti induced refractive index change in LiNbO₃ as a function of diffusion parameters. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(5):700~708
- [7] 金锋, C-切 LiNbO₃ 扩散波导 TM 模的本征值方程, 光学学报, 1984, **4**(5):430~436
- [8] 金锋, 范俊清, 集成光学上册. 北京:国防工业出版社, 1981:34~44
- [9] K. Thyagarajan, A. N. Kaul, S. I. Hosain, Attenuation characteristics of single-mode metal-clad graded-index waveguides with a dielectric buffer; a simple and accurate numerical method. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(7):479~481
- [10] M. S. Sodha, A. K. Ghatak, *Inhomogeneous optical waveguides*, New York: Plenum press, 1977:31~53
- [11] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell *et al.*, Optical properties of the infrared and for infrared. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(7):1099~1119

TE₀ mode polarizer of Ti : LiNbO₃ optical waveguides at 1.5 μm wavelength

JIN Feng ZHU Guang

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

(Received 20 April 1992)

Abstract

For Ti diffused Z-cut LiNbO₃ optical waveguides and its polarizer structures with metal cladding/ dielectric buffer layer, technological parameters of the single-mode waveguide and absorption losses of the fundamental mode are theoretically analysed at 1.523 μm wavelength of the He-Ne laser. Moreover, TE₀ mode polarizers of Ti : LiNbO₃ optical waveguides are developed using the resonant absorption effect of TM₀ modes for the first time at 1.5 μm wavelength. When the polarizer lengths are 2 mm and 9 mm, its extinction ratios are 20 dB and 25 dB, respectively.

Key words Ti : LiNbO₃ optical waveguide, metal-clad waveguide, optical waveguide polarizer.