低损耗 Ti 扩散 LiNbO_3 光波导

李玉善 刘洪举 任秉复 于荣金

(中国科学院长春物理研究所)

LiNbO_3 是集成光学领域中已经广泛研究的材料。它可以制作良好的光波导以及优质的各种元件(除光源和探测器外)。1974 年 Schmidt 和 Kaminow^[1] 对 Ti 扩散 LiNbO_3 光波导进行了大量的研究,主要是想获得低损耗的单模光波导。

钛内扩散一般是在流动 Ar 、 N_2 、空气或真空中进行^[2]。但在高的扩散温度下,钛内扩散到 LiNbO_3 中去的同时,整个表面存在着 Li_2O 的外扩散,从而使片子表面偏离晶体的化学计量,增加了非寻常折射率。结果,除形成的 Ti 内扩散波导外,还存在由 Li_2O 外扩散形成的平面波导。外扩散波导也能束缚在 y 切的 LiNbO_3 片子上沿 x 轴传播的 TE 偏振波,导致信道之间的干扰。外扩散引起的晶格空位,还会增加波导的散射损耗。已有一些人报道了克服 Li_2O 外扩散问题的一些方法^[3-7]。

一、Ti 扩散 LiNbO_3 光波导的制备

本文用高频溅射的方法,在仔细抛光的 y -切 LiNbO_3 衬底上淀积一层钛(纯度 99.99%)膜。制备的膜厚范围为 192—920 Å,对大多数样品的扩散处理为 1000°C 下 8 小时。

为抑制 Li_2O 的外扩散,我们采用如图 1 所示的闭管扩散系统。密闭长方形 (77 × 23 × 21mm³) 白刚玉舟内放有与样品衬底相同化学配比的 LiNbO_3 粉和溅射过 Ti 的 LiNbO_3 片子,每次放 LiNbO_3 粉的量 0.5—1 克。

图 1 用于 Ti 内扩散的装置

表 1 制作波导的条件

样 品	Ti 膜厚度(Å)	扩散温度(°C)	扩散时间(小时)	LiNbO_3 粉	导模数 (6328 Å)
2	192	1000	8	没有计量	单 (TE, TM)
6	256	1000	8	新放 0.5 克	单 (TE, TM) 双 (TE, TM) 4416 Å
8	690	1000	8	新放 0.5 克	双 (TE, TM)
11	920	1000	13	新放 1 克	叁 (TE, TM) * 未扩尽
12	460	1000	8	新放 0.5 克	单 (TE, TM)
14	690	1100	8	新放 0.5 克	双 (TE, TM)

本文 1979 年 11 月 9 日收到。

为了检查有无 Li_2O 外扩散, 制备了 12 号样品。样品的一半有 Ti 扩散膜, 而另一半没有 Ti 扩散膜。用两个金红石棱镜作光耦合输入-输出实验^[3]。结果证明样品表面 Li_2O 外扩散确实得到了抑制。在温度为 1000°C 、时间为 8 小时的扩散条件下发现: Ti 膜厚度在 $192\text{--}460\text{ \AA}$ 范围内, 可获得单模波导 ($6328\text{ \AA}$)。

二、光波导损耗测量

损耗测量是把输出棱镜放在离输入棱镜(输入棱镜固定不变)不同的距离上做的。用光电倍增管接收输出讯号, 并作为输出棱镜位置的函数加以记录。光源为 He-Ne 激光器 ($6328\text{ \AA}$)。输出棱镜的空气间隙每次尽量一致, 并对几个样品反复测量。光波导的损耗为 1 dB/cm 左右。这些结果与观察到的宏观现象一致。片子从外表上看, 是透明的。用金红石棱镜把 He-Ne 激光耦合进波导时, 波导产生的散射极少, 并且双模波导的输出 m 线都是单个出现的。就波导的制作过程来说, 高温扩散以及缓慢降温过程, 相当于退火处理。而且, 退火又是在放有 LiNbO_3 粉的密闭小舟中进行的, 片子表面没有被舟外杂质所沾污。由表面积比 LiNbO_3 片更大的 LiNbO_3 粉产生的 Li_2O 蒸气压, 足以与 Ti- LiNbO_3 片子保持平衡, 扩散过程有利于减少 Li 空位。上述这些因素会使晶体完整性明显增加, 从而减少光的散射。波导样品表面的扫描电镜照片也证实了这一点。样品表面很光滑, 表面没有位错线。

三、光波导其它参数的测量

光在扩散波导中的传播, 可用下列模色散方程表示:

$$\Sigma \phi_i + 2\phi_1 + 2\phi_2 = 2m\pi, \quad (1)$$

对余误差函数、高斯和指数分布的所有扩散波导, 上面的方程可近似地表示成^[6]

$$V \int_0^{x_i} (f(x) - b_m)^{1/2} dx = \left(m + \frac{3}{4}\right)\pi, \quad (2)$$

其中, m 是模式数 ($m = 0, 1, 2, \dots, M$)。

$$f(x) = \begin{cases} \exp(-x^2) & (\text{高斯函数}), \\ \text{erfc}(x) & (\text{余误差函数}), \\ \exp(-x) & (\text{指数函数}), \end{cases}$$

$$f(x_i) = b_m, \quad x = \frac{y}{d},$$

$$V = k_0 d (n_s^2 - n_b^2)^{1/2} \quad (\text{归一化扩散深度}), \quad (3)$$

$$b_m = \frac{N_m^2 - n_b^2}{n_s^2 - n_b^2} \quad (\text{归一化模折射率}). \quad (4)$$

n_s 、 n_b 和 N_m 分别是波导表面折射率、衬底折射率和模折射率。 k_0 是自由空间波数 ($k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$)。

$$d = 2\sqrt{Dt}. \quad (5)$$

对于 Ti 扩散 LiNbO_3 波导, 因为溅射在 LiNbO_3 表面的量是有限的 (一般厚度为几百埃), 特别当扩散的时间对 Ti 离子完全进入晶体来说是足足有余的时候, 浓度分布应接近高斯函数, 这已由电子微探针测量所证实^[9]。对于低阶模, 可用抛物线分布来近似描述高斯分布, 即:

$$f(x) = e^{-x^2} = 1 + (-x^2) + \frac{(-x^2)^2}{2!} + \dots \cong 1 - x^2.$$

因此方程(2)变成

$$V \int_0^{x_s} [1 - x^2 - b_m]^{1/2} dx = \frac{V\pi(1 - b_m)}{4} = \left(m + \frac{3}{4}\right)\pi, b_m = 1 - \frac{(4m + 3)}{V}, \quad (6)$$

$$N_m^2 = n_s^2 - (4m + 3)(n_s^2 - n_b^2)^{1/2}/k_0 d = n_s^2 - \frac{(4m + 3)\sqrt{n_s^2 - n_b^2} \cdot \lambda}{2\pi d}. \quad (7)$$

N_m 可以利用下列方程求出

$$N_m = \cos \varepsilon \cdot \sin \theta_m + \sin \varepsilon (n_p^2 - \sin^2 \theta_m)^{1/2}, \quad (8)$$

其中, ε 是棱镜角, n_p 是棱镜折射率, θ_m 是第 m 阶模式的同步入射角. 实验上测出 θ_m 角, 就能算出模折射率 N_m . 表 2 列出了我们实验中算出的数值. 为了比较, 在括号中列出了采用双曲线正割分布^[10](未微扰的)求得的波导参数. 抛物线分布和双曲线正割分布都是对高斯分布的一种近似. 二种近似的 n_s 、 Δn_s 值差别极小, 而 d 和 D 值差别较大, 可能是抛物线分布偏离高斯分布较大的缘故.

表 2 光波导参数

样品	N_m				n_s	Δn_s	$d(\mu\text{m})$	$D(\text{cm}^2/\text{小时})$
	TE_0	TE_1	TM_0	TM_1				
8	2.225	2.216			2.231 (2.232)	0.031 (0.032)	3.9 (3.3)	4.8×10^{-9} (3.3×10^{-9})
			2.296	2.290	2.300 (2.301)	0.014 (0.015)	4.1 (3.0)	5.2×10^{-9} (2.8×10^{-9})
14	2.218	2.213			2.221 (2.222)	0.021 (0.022)	6.3 (5.6)	1.2×10^{-8} (9.9×10^{-9})
			2.293	2.290	2.295 (2.296)	0.009 (0.010)	5.9 (4.8)	1.1×10^{-8} (7.2×10^{-9})

四、结 论

我们得到了低损耗 Ti 扩散 LiNbO_3 光波导. 发现: 采用我们实验中闭管扩散的工艺条件时, 波导的制作十分简单, 重复性好, 既可抑制 Li_2O 外扩散, 又可获得低损耗波导. 因此这种工艺是合理的. 这对研究和批量生产 Ti 扩散 LiNbO_3 光波导的各种器件也有实际意义.

致谢: 刘跃宗同志做了样品的扫描电镜测量, 杜淑琴同志帮助淀积金膜, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Schmidt, R. V. & Kaminow, I. P., *Appl. Phys. Lett.*, **25** (1974), 458.
- [2] Pan'kin, V. G., Petukhova, S. N., Pchelkin, V. Yu., Shashkin, V. V. & Shvarts, N. L., *Sov. J. Quantum Electron.*, **8** (1978), 177.
- [3] Ranganath, T. R. & Wang, S., *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977), 376.
- [4] Chen, B.-U. & Pastor, A. C., *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977), 570.
- [5] Miyazawa, S., Guglielmi, R. & Carencio, A., *Appl. Phys. Lett.*, **31** (1977), 742.
- [6] Esdaile, R. J., *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1978), 733.
- [7] Noda, J., Fukuma, M. & Saito, S., *J. Appl. Phys.*, **49** (1978), 3150.
- [8] Hocker, G. B. & Burns, W. K., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11** (1975), 270.
- [9] Sugii, K., Fukuma, M. & Iwasaki, H., *J. Mater. Sci.*, **13** (1978), 523.
- [10] Kumar, A. & Khular, E., *Optics Communications*, **27** (1978), 349.