

# Ti 扩散 LiNbO<sub>3</sub> 单模波导参数的测量

林盛强 李玉善 金锋

(中国科学院长春物理所)

**提要:** 对 Ti 扩散 LiNbO<sub>3</sub> 波导分别采用双曲正割和抛物线分布来近似其折射率的高斯分布, 在两个波长下由相应的两种近似本征值方程分别推得了单模波导参数的计算公式, 并在 4880 Å 和 6328 Å 激光波长下利用棱镜耦合器测量了单模波导参数, 对测量结果给出必要的理论分析。

## Parameter measurement of Ti diffused LiNbO<sub>3</sub> single-mode waveguides

Lin Shengqiang, Li Yushan, Jin Feng

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

**Abstract:** For Ti diffused LiNbO<sub>3</sub> guides the Gaussian profile of the guide refractive index has been approximated respectively by hyperbolic-secant and parabolical profile, calculation formulae of single-mode guide parameters have been derived respectively by corresponding approximation eigenvalue equations at two optical wavelengths, and parameters of single-mode guides have been measured with a prism coupler, and necessary theoretical analysis on the measured results are given.

### 一、Ti 扩散 LiNbO<sub>3</sub> 波导的本征值方程

具有高斯型折射率分布的 Ti 扩散 LiNbO<sub>3</sub> 波导的本征值方程可写作<sup>[1]</sup>

$$k \int_0^{x_t} [n^2(x) - N^2]^{1/2} dx = \pi(4\nu + 3)/4, \quad (1)$$

其中波导折射率分布为

$$n(x) = \begin{cases} n_b + \Delta n \exp(-x^2/d^2), & x > 0 \\ 1(\text{空气}) & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)和(2)中,  $k = 2\pi/\lambda$  和  $\lambda$  分别为光在真空中的传播常数和波长;  $x$  为离波导表面

( $x=0$ )的坐标,  $x_t$  为导模的隧道点;  $N$  为导模的有效折射率;  $\Delta n = n_s - n_b$  为波导表面折射率增量,  $n_s$  和  $n_b$  分别为波导表面和衬底的折射率;  $d$  为扩散深度;  $\nu$  为模阶数, 取从零开始的正整数。对于波导折射率的高斯分布, 式(1)不能给出有效折射率的解析表达式。因此我们分别采用波导折射率的两种近似分布, 即双曲正割分布<sup>[2]</sup>

$$n(x) = n_b + \Delta n \operatorname{sech}^2(\alpha x/d), \quad \alpha = 1.04 \quad (3)$$

和抛物线分布<sup>[3]</sup>

$$n(x) = n_b + \Delta n \left[ 1 - \left( \frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (4)$$

收稿日期: 1981年8月4日。

高斯、双曲正割和抛物线型三种归一化折射率分布函数  $f(x) = [n(x) - n_b] / \Delta n$  示于图 1。

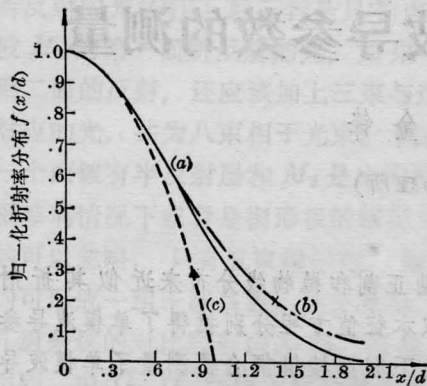


图 1 高斯、双曲正割和抛物线归一化折射率分布函数

$$(a) - \exp\left(-\frac{x^2}{d^2}\right); \quad (b) - \operatorname{sech}^2\left(\alpha \frac{x}{d}\right);$$

$$(c) - 1 - \frac{x^2}{d^2}$$

对于双曲正割分布, TE 模的有效折射率为<sup>[2]</sup>

$$N_v^2 = n_b^2 + (\alpha/kd)^2 (2\nu + 2H - 1)^2, \quad (5)$$

式中

$$H = [(8k^2 n_b \Delta n d^2 / \alpha^2 + 1)^{1/2} - 1] / 4$$

零阶 TE 模的电场表达式为<sup>[3]</sup>

$$E(x) = E_0 \sin h(\alpha x/d) \operatorname{sech}^2(\alpha x/d). \quad (6)$$

式中  $E_0$  为任意比例常数,  $\alpha$  为修正因子。

对于抛物线分布, TE 模的有效折射率为<sup>[3]</sup>

$$N_v^2 = n_s^2 - (4\nu + 3) [n_s^2 - n_b^2]^{1/2} / kd \quad (7)$$

零阶 TE 模的电场表达式为<sup>[3]</sup>

$$E(x) = E_0 (x/d) \exp[-k\sqrt{\Delta n^2 x^2 / 2d}]^*, \quad (8)$$

对于高斯、双曲正割和抛物线型折射率分布, 分别由式(1)、(5)和(7)计算出归一化传播常数  $b_\nu = (N_\nu^2 - n_b^2) / (n_s^2 - n_b^2)$  与归一化扩散深度  $V = (n_s^2 - n_b^2)^{1/2} kd$  的关系, 并把  $\nu=0$  和 1 阶模的  $b \sim V$  曲线示于图 2。

## 二、单模波导参数测量

对于两个激光波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 设与此相对应的单模波导有效折射率分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 衬底折射率分别为  $n_{b1}$  和  $n_{b2}$ , 波导表面折射率分别为  $n_{s1}$  和  $n_{s2}$ 。在已知衬底折射率  $n_{b1}$  和  $n_{b2}$  的条件下, 只要利用棱镜耦合器测得  $N_1$  和  $N_2$ , 并利用衬底折射率色散  $n_{b1} - n_{b2}$  代替波导表面折射率色散  $n_{s1} - n_{s2}$ , 则式(1)、(5)和(7)均可以用来求得单模波导参数  $\Delta n$  和  $d$ 。若想利用式(1)求得  $\Delta n$  和  $d$ , 只能采用电子计算机求数值解, 但式(5)和(7)却均能给出单模波导参数的简单计算公式。

对于双曲正割分布, 在式(5)中令  $\nu=0$  并由对应于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两个方程不难推得  $\Delta n$  的迭代公式

$$\Delta n = \left[ A^2 + (D - C^2) \left( \frac{3A + \sqrt{A^2 + 8B}}{3C + \sqrt{C^2 + 8D}} \right) \right] \times \alpha^2 / 8k_1^2 n_{b1}, \quad (9)$$

和  $d$  的显式

$$d = \frac{3A + \sqrt{A^2 + 8B}}{B - A^2} = \frac{3C + \sqrt{C^2 + 8D}}{D - C^2}, \quad (10)$$

\* 文献[3]中把  $\sqrt{\Delta n^2}$  误为  $\Delta n$ , 作者在此更正。

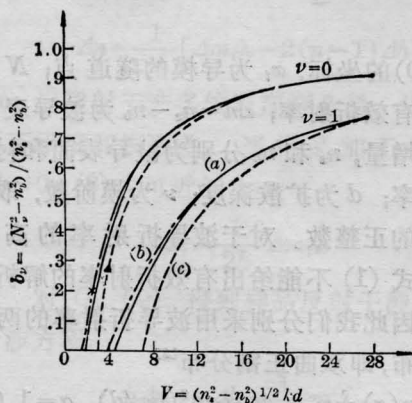


图 2 高斯、双曲正割和抛物线分布的归一化传播常数与归一化扩散深度的关系曲线

$$(a) - \exp\left(-\frac{x^2}{d^2}\right); \quad (b) - \operatorname{sech}^2\left(\alpha \frac{x}{d}\right);$$

$$(c) - 1 - \frac{x^2}{d^2}$$

式中

$$A = \frac{2k_1}{\alpha} \sqrt{N_1^2 - n_{b1}^2}; \quad B = \frac{8k_1^2}{\alpha^2} n_{b1} \Delta n,$$

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1};$$

$$C = \frac{2k_2}{\alpha} \sqrt{N_2^2 - n_{b2}^2}; \quad D = \frac{8k_2^2}{\alpha^2} n_{b2} \Delta n,$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}.$$

对于抛物线分布, 在式(7)中令  $\nu=0$  并对应于  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两个方程容易推得  $\Delta n$  的迭代公式

$$\Delta n = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^2 (2n_{b2} + \Delta n) \times \left[ \frac{(n_{b1} + \Delta n)^2 - N_1^2}{(n_{b2} + \Delta n)^2 - N_2^2} \right] - 2n_{b1}, \quad (11)$$

和  $d$  的显式

$$d = \frac{3(n_{s1}^2 - n_{b1}^2)^{1/2}}{k_1(n_{s1}^2 - N_1^2)} = \frac{3(n_{s2}^2 - n_{b2}^2)^{1/2}}{k_2(n_{s2}^2 - N_2^2)}. \quad (12)$$

待测单模波导样品是在 Y-切 LiNbO<sub>3</sub> 衬底上扩散 Ti 制成的<sup>[4]</sup>。在  $\lambda_1=4880 \text{ \AA}$  和  $\lambda_2=6328 \text{ \AA}$  的激光波长下, 利用棱镜耦合器把 TE 偏振光耦合入单模波导, 使之沿着  $x$  轴传播, 并测得相应的有效折射率  $N_1$  和  $N_2$ <sup>[5]</sup>, 记入表 1。在这两个波长下 TE 模所遇到的衬底折射率  $n_{b1}=2.2515$  和  $n_{b2}=2.203$ , 可根据文献[6]由牛顿插值法求得。

表 1 单模波导 TE 模有效折射率的测量值

波长(Å)	$\lambda_1=4880$	$\lambda_2=6328$
有效折射率	$N_1=2.2770$	$N_2=2.2185$

将上述单模波导有效折射率的测量值和衬底折射率代入(9)~(12)求得单模波导的参数, 并记入表 2。

表 2 单模波导参数( $\lambda=6228 \text{ \AA}$ )

折射率分布	表面折射率增量 $\Delta n$	扩散深度 $d$ (微米)
双曲正割	0.0770	0.475
抛物线	0.0574	0.815

### 三、讨 论

由表 2 看出, 双曲正割分布和抛物线分布所给出的单模波导参数有明显的差别, 这一事实可以从如下两个方面加以解释。

首先, 从射线光学角度看, 光线传播区域从  $x=0$  到  $x=x_t$ , 而光学隧道点的波导折射率等于有效折射率, 即  $n(x_t)=N$ 。对于双曲正割和抛物线分布, 利用表 2 中的单模波导参数分别计算出各自的  $x_t$  和与此相对应的归一化折射率  $f(x_t) = \frac{N - n_b}{\Delta n}$ , 并记入表 3。

图 1 中的归一化折射率分布曲线上的“×”和“▲”点分别表示样品在双曲正割和抛物线分布下所对应的隧道点。由此可见, 双曲正割分布所对应的光线传播区域较窄, 在此范围内折射率分布较接近高斯分布; 但抛物线分布所对应的光线区域较宽, 在此范围内其折射率分布明显偏离高斯分布。因此, 双曲正割分布与抛物线分布相比, 前者能够给出较准确的单模波导参数。

表 3 单模波导隧道点及其归一化折射率( $\lambda=6328 \text{ \AA}$ )

折射率分布	$x_t$ (微米)	$f(x_t)$
双曲正割分布	0.653	0.201
抛物线分布	0.698	0.268

其次, 根据表 3 的单模波导参数计算出双曲正割和抛物线分布所对应的归一化传播常数和归一化扩散深度, 示于表 4。这两个工作点分别由“×”和“▲”点表示在图 2 中各自的  $b \sim V$  曲线上。很明显, 双曲正割分布所对应的工作点比较接近高斯分布的  $b \sim V$  曲线, 而抛物线分布对应的工作点明显偏离高斯分布的  $b \sim V$  曲线。又从图 2 中可以看到, 高斯分布对应的单模工作范围为  $1.679 < V < 4.384$ , 双曲正割分布对应的  $V=2.771$  落入这一单模工作区域, 但抛物线分

(下转第 390 页)



免热透镜效应。实验证明在工厂震动十分严重的环境下,仍然是稳定不变,无需经常调整,图1所示为我们器件的结构照片。

### ② 关于增益介质量子效率的问题

为了防止增益介质的劣化甚至破坏,在我们的钽玻璃激光器中,用0.5%重铬酸钾去离子水溶液循环冷却,以防紫外辐射使玻璃着色并减小了光泵辐照过热效应,从而增益介质的量子效率稳定和使用寿命增长。在我们的器件中,玻璃棒被激发振荡工作100万次左右仍不见劣化。

### ③ 提高光泵转换效率的稳定性

我们采取了氙灯预电离措施,但是预电离电流不宜过大,以免电极过热和溅射。我们使用的S系列 $\phi 18 \times 250$ /毫米脉冲氙灯,预燃电流不大于80~100毫安。

(上接第370页)

$N$ 太大( $\alpha_A \gg \omega_A$ ),则光栅腔会丧失对不同波长谱线的选择性,然而 $N$ 太小也会引起腔内损失太大,从而使激光功率降低。

## 参 考 文 献

- [1] G. W. Stoke; Proceedings of 3rd Quantum Electronics Conference, 1963.  
 [2] G. Toraldo Difrancia; Proceedings of the Symposium on Optical Masers, 1963, p. 157.

(上接第393页)

表4 单模波导的归一化参数

折射率分布	归一化传播常数 ( $b$ )	归一化扩散深度 ( $V$ )
双曲正割分布	2.771	0.1985
抛物线折射率分布	4.1	0.2675

布所对应的 $V \approx 4.1$ ,落在单模区域的边缘。这就说明,与抛物线分布相比,双曲正割分布近似所对应的本征值方程能够给出较合理的单模波导参数。

综上所述,我们研究了Ti扩散LiNbO<sub>3</sub>单模波导参数的双波长测量,并对波导折

率的高斯分布采用了双曲正割和抛物线分布近似。折射率的这两种近似分布给出了明显有差异的单模波导参数。理论分析表明,采用双曲正割分布能够给出较准确的单模波导参数,而抛物线分布则给出偏离实际的结果。

## 参 考 文 献

- [1] 固体激光导论编写组;《固体激光导论》,上海人民出版社,1975年。  
 [2] 水金城,罗毅;《激光》,1978,5, No. 5~6, 89.  
 [3] 赫光生,雷仕溇编;《激光器设计基础》,上海科技出版社,1979年。  
 [4] 水金城等;《西北大学学报》(自然科学版),1978 No. 3.  
 [5] H. Kogelnik, T. Li; *Appl. Opt.*, 1966, 5, 1550.  
 [6] A. G. Fox, T. Li; *Proc. IEEE*, 1963, 51, 80.  
 [7] R. L. Sanderson, W. Streifer; *Appl. Opt.*, 1969, 8, No. 11, 2241.  
 [8] H. Ogura, Y. Yoshida; *J. Phys. Soc. Japan.*, 1965, 20, No. 4, 598.  
 [9] G. K. Born; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1969, QE-5, No. 2, 67.  
 [10] H. K. Бергер и др.; *Опн. и спекр.*, 1977, 43, 306.  
 [11] T. Li; *BSTJ*, 1965, 44, 917.

## 参 考 文 献

- [1] 金铎,范俊清;《集成光学》上册,国防工业出版社(1981),p. 34.  
 [2] T. Tamir; *Integrated Optics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York(1975), pp. 55~57.  
 [3] I. Savatinova et al.; *Appl. Phys.*, 1975, 8, 245.  
 [4] 李玉善等;《科学通报》,1980,25, No 15, 685.  
 [5] R. Ulrich et al.; *Appl. Opt.*, 1973, 12, 2901.  
 [6] Lithium Niobate; AD704556, 4, pp. 91~124.