

# 一种全面测定平板波导折射率参数的新方法\*

牟晓东 邵宗书 岳学锋 陈 军

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

**摘 要** 本文通过对耦合棱镜中反射光束强度变化的测量, 给出了平板波导的全部折射率参数, 包括波导表面、波导模以及衬底的折射率, 由此可以精确的得到平板波导的折射率分布, 为波导的设计提供了可靠的参数.

**关键词** 波导, 耦合棱镜, 折射率分布.

## 1 引 言

对倍频用波导而言, 精确的测定波导的折射率参数对波导设计和应用是至关重要的. 虽然利用 WKB 法可以很好地得到波导中的折射率分布, 但由于其利用了折线近似, 由此得到的波导表面折射率同实际的表面折射率存在一定的偏差<sup>[1]</sup>. 最近报道的利用耦合棱镜来精确的测量波导衬底的折射率, 测量精度可以达到  $10^{-4}$ <sup>[2]</sup>. 本文通过实验进一步发现, 对已制作好的波导, 耦合棱镜中的反射光束, 包含了波导衬底折射率的信息, 通过对其强度变化的测量, 不但可以得到各导模的有效折射率, 也可以直接得到波导衬底的折射率. 这种测量方法可避免以往由于衬底和波导分别测量所引入的误差, 大大提高波导层折射率增加量的测量精度, 同时还可大大简化波导的测量过程.

## 2 基本原理

棱镜耦合器是波导光学中的一种重要的耦合手段, 这方面已有比较完善的理论<sup>[3,4]</sup>. 通过光学隧道效应, 可使进入棱镜的光耦合到波导层中. 在棱镜同波导紧密接触的情况下, 棱镜模和波导模的耦合系数可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\eta \propto \int_{-\infty}^{+\infty} [n^2(x) - n_w^2(x)] E_w^* E_p dx \quad (1)$$

式中  $n(x)$  为棱镜-波导耦合系统的折射率分布,  $n_w(x)$  为孤立波导中的折射率分布,  $E_w, E_p$  分别为棱镜模和波导模的场分布. 当输入场的有效折射率  $\beta/k$  大于波导表面折射率  $n_0$  时, 入射光将在棱镜底面产生全反射, 此时反射系数  $R_r = 1$ <sup>[6]</sup>; 在  $\beta/k$  介于表面折射率  $n_0$  和衬底折射率

\* 本课题得到国家“863”计划基金的资助.

收稿日期: 1993年5月20日; 收到修改稿日期: 1993年8月30日

$n_s$  之间的情况下, 当入射光的传播常数等于波导模式的传播常数时, 光波将有效地耦合入波导中, 并产生对应的波导模式, 此时通过棱镜的反射光强将会产生一极小值; 当两者不相等时, (1) 式的积分为零, 入射光仍被全反射出棱镜. 当  $\beta/k$  小于  $n_s$  时, 入射光的一部分将转变成衬底模, 由于波导衬底模的传播常数是可以连续变化的, 在此区间内, 棱镜模和衬底模总可以满足相匹配条件而产生比较有效的耦合, 此时反射光强将急剧下降.

测出上述各点所对应的入射角度, 就可以利用公式(2) 来计算出波导层导模的有效折射率和衬底折射率, 进而拟合出波导表面折射率.

$$n = \sin \alpha \cos \beta + (n_s^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \beta \quad (2)$$

式中  $\beta$  为棱镜的底角,  $\alpha$  为光进入棱镜的入射角,  $n_s$  为棱镜的折射率.

### 3 测量精度

由(2)式可以看出, 折射率的测量精度是同角度的测量精度和棱镜折射率的精度有关的, 下面将分别讨论它们对折射率测量精度的影响. 对(2) 式的角度部分和棱镜折射率分别求偏微分并代入相应的值计算后可得:

$$\Delta n \sim 0.1 \Delta \alpha \quad (3)$$

$$\Delta n \sim \Delta n_s \quad (4)$$

由(3)式可知只要测角精度在  $1'$  内, 折射率的测量精度就可小于  $10^{-4}$ . 本实验中使用的测角仪精度为  $1'$ , 可以满足测量精度的要求. 由(4)式可以看出折射率的测量精度同所使用的棱镜的折射率精度是一个量级的, 棱镜折射率精度将直接影响到波导折射率的测量精度, 是引起测量误差的主要项. 本实验中使用的棱镜折射率精度为  $10^{-4}$ , 可满足一般性的测量要求.

### 4 实验结果

图 1 是测量装置示意图, 在 He-Ne 激光器前用一半波片来调整光束的偏振方向, 光束经分束镜后入射到金红石棱镜中, 在底面 R 点处反射, 由棱镜的另一面出射, 并由硅光电池  $D_1$  接收, 与分束镜分出的另一束光作差分处理后输入 X-Y 记录仪. 图中  $w$  为待测波导样品, 与金红石棱镜放置在一个精密的转台上并用一精密马达驱动其旋转; 调节它们的位置, 使转台

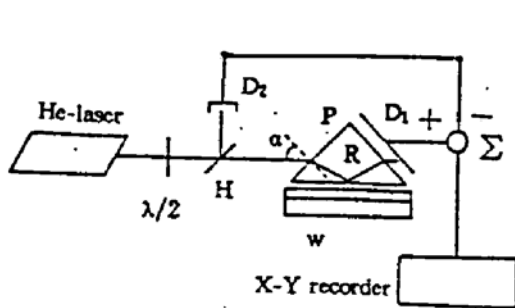


Fig. 1 Schematic of experimental arrangement;  $\lambda/2$ , half-wave plate;  $H$ , half mirror;  $P$ ,  $\text{TiO}_2$  prism;  $W$ , waveguide;  $D_1$ ,  $D_2$ , detector

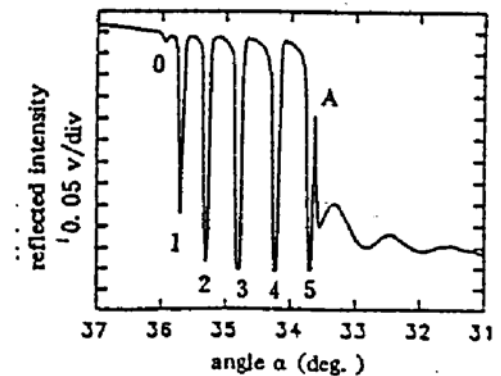


Fig. 2 Measured output light intensity versus incident angle: c-cut PE-LiTaO<sub>3</sub> waveguide, exchanged at 250°C for 96 h and annealed at 320°C for 10 h; TM polarization

转动时反射点 R 不发生移动.

利用该装置对用质子交换法生长的 c-切  $\text{LiTaO}_3$  波导进行了测试, 图 2 记录了通过棱镜后反射光强度的变化曲线, 所测样品是在  $250\text{ }^\circ\text{C}$  苯甲酸中交换 96 hr, 然后在  $320\text{ }^\circ\text{C}$  退火 10 hr. 图中 A 点对应于在波导层和衬底界面处产生全反射时的角度; 标有 0, 1, ..., 5 的各峰值点对应的是波导中 0, 1, ..., 5 阶导模的同步角. 代入(2)式可求得所对应的折射率值, 其结果列在表 1 之中.

Table 1. The measured results

	substrate index	surface index	mode effective indices					
			0	1	2	3	4	5
measured	2.1817	2.2018*	2.2001	2.1980	2.1949	2.1910	2.1866	2.1823
fit		2.2002	2.2002	2.1976	2.1952	2.1911	2.1864	2.1824

\* The value is calculated by using the inverse WKB method.

对其它生长时间下波导衬底折射率的测量结果列在表 2 中. 由表 1 和表 2 的结果可以看出, 该方法对不同生长时间下波导衬底折射率的测量值是相等的, 这说明利用该方法对衬底折射率的测量并不受波导层厚度和波导模的影响. 为了进一步验证该方法的测量精度, 作者利用自准直法对  $\text{LiTaO}_3$  晶体的折射率进行了测量, 其 e 光折射率在  $0.6328\text{ }\mu\text{m}$  时为 2.1815, 显然, 由波导中测出的衬底折射率同这一测量结果符合的非常好.

Table 2. The measured results of substrate index

exchanged time(hr)	mode numbers	effective indices	substrate index
1.5	1	2.1820	2.1817
4	1	2.1827	2.1816
72	2	2.1907 2.1823	2.1817

从图 2 中可以看出, 当  $\beta/k < n_s$  后, 反射光强呈周期性变化, 计算表明, 这主要是因为(1)式中, 棱镜模和波导衬底模场的交叠积分将随入射角度的增加作周期性变化, 从而引起耦合系数的周期性变化造成的.

## 5 波导层折射率分布

对多模波导, 根据各导模的有效折射率可利用 WKB 方法绘出其折射率的分布, 如图 3 中的黑点所示, 可以看出其折射率分布是一种典型的费米分布, 由于采用了折线近似, 这种方法得到的折射率分布, 高阶模部分同实际的折射率分布将符合得非常好, 但表面折射率要比实际的表面折射率高<sup>[1]</sup>. 为了得到准确的折射率分布和表面折射率数据, 作者先用 WKB 法计算出波导层的折射率分布, 去除表面和低阶模的计算点, 然后

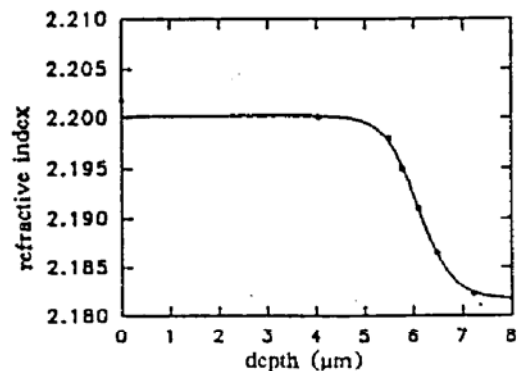


Fig. 3 Refractive index profiles measured at  $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ ; The dots are inverse WKB estimates, the solid line is the fitting curve

对高阶模计算点利用费米分布函数(5)式进行拟合,这样就可以得到比较精确的折射率分布曲线和表面折射率值,如图3中的实线所示.

$$n(x) = n_s + (n_0 - n_s) / \{1 + \exp [(x - d)/a]\} \quad (5)$$

式中  $n_s = 2.1817$  为实际测量的衬底折射率,  $n_0 = 2.2002$  为拟合得到的波导表面折射率,  $d = 6.1135 \mu\text{m}$  为拟合出的波导层厚度,  $a = 0.3450 \mu\text{m}$  为拟合参数. 在表1中还给出了各点的拟合值,可以看出,实测值和拟合值符合得非常好,只是在小数点后第四位上稍有偏差,这说明由(5)式得到的折射率分布以及表面折射率的拟合值是可信的,具有比较高的精度.

**总 结** 本文通过测量波导耦合棱镜中反射光的强度变化,得到了用质子交换法制作的  $\text{LiTaO}_3$  波导的全部折射率参数,同时给出了精确的折射率分布图. 该方法对波导折射率的增量有比较高的测量精度,使用准确的棱镜折射率和提高测角的精度可以进一步提高该方法的测量精度,满足波导设计中的要求. 该方法为波导的测试提供了一种方便实用的测试手段.

### 参 考 文 献

- [1] J. M. White, P. F. Heidrich, Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices; a simple analysis. *Appl. Opt.*, 1976, 15(1): 151~155
- [2] 翁心光, 郭转运, 吴仲康等 铌酸锂集成光学基片折射率的测量. *中国激光*, 1993, A20(3): 170~174
- [3] P. K. Tien, R. Ulrich, Theory of prism-film coupler and thin-film light guides. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, 60(10): 1325~1337
- [4] R. Ulrich, Theory of the prism-film coupler by plane-wave analysis. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, 60(10): 1337~1350
- [5] 金 锋, 范俊清, 集成光学(中册). 北京:国防工业出版社, 1982
- [6] H. Onodera, I. Awai, J. Ikenoue, Refractive-index measurement of bulk materials: prism coupling method. *Appl. Opt.*, 1983, 22(8): 1194~1197

## A Novel Method for Refractive Indices Measurement of Optical Waveguides

Mu Xiaodong      Shao Zhongshu      Yue Xuefeng      Chen Jun

(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 20 May 1993; revised 30 August 1993)

**Abstract** In prism-waveguide coupling experiment we found that the reflected light through the prism carried all information of waveguide refractive indices. According to the intensity variation of the reflected light, the refractive indices of optical waveguide, including effective indices of waveguide modes and substrate index, can be measured precisely. Then the refractive indices at different depths can be determined by curve fitting.

**Key words** waveguide, prism coupler, refractive index profile.