

利用棱镜耦合器测量光波导衬底的折射率

赵孝祥

(湖北孝感师范专科学校, 432100)

许政权

(上海交通大学应用物理系, 200030)

提要: 本文提出了测量 LiNbO_3 衬底折射率的新方法, 用棱镜耦合方法并测量光的强度在棱镜底面处全内反射恰遭到破坏的角度计算折射率。该方法可以用于分析待测铌酸锂基片是否可以用作衬底。

关键词: 棱镜耦合器, 衬底折射率

Measurement of refractive index of substrate materials of optical waveguides with a prism coupler

Zhao Xiaoxiang

(Xiaogan Teachers College, Xiaogan)

Xu Zhengquan

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

Abstract: In this paper we present a new method for measurement of refractive index of LiNbO_3 optical waveguides, i. e. we can calculate the refractive index of the substrate by the angle, at which the light intensity reflected from the bottom face of the coupling prism is falling down abruptly due to the destruction of total internal reflection. This method can be used to check the usage feasibility of LiNbO_3 substrate.

Key words: prism coupler, refractive-index of substrate

用棱镜耦合器测量波导参数是集成光学重要测试手段之一, 它不仅可以准确测量波导参数, 还可以用来测量光波导衬底材料的折射率。

通常用于测定折射率的最小偏向角方法, 不能用于测定已加工好的衬底的折射率。

我们发现棱镜耦合器可以用于研究靠近衬底表面的折射率。监控棱镜与衬底间界面的反射光, 并使之发生全内反射, 测定全内反射显示陡削破坏的角度, 由此角度可以测量衬底折射率。

测量原理

测试原理示于图 1, 光轴平行于棱边的 TiO_2 棱镜压在待测的铌酸锂衬底上, 该材料是各

向异性的, 其介电常数为 $\epsilon_s = \begin{bmatrix} n_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{bmatrix}$ 为对角张量。在棱镜的底部与衬底的表面之间, 有

一很窄的空气间隙,厚度为 d 。 n_p 和 n_g 分别为棱镜和空气隙的折射率。从激光器射来的光束入

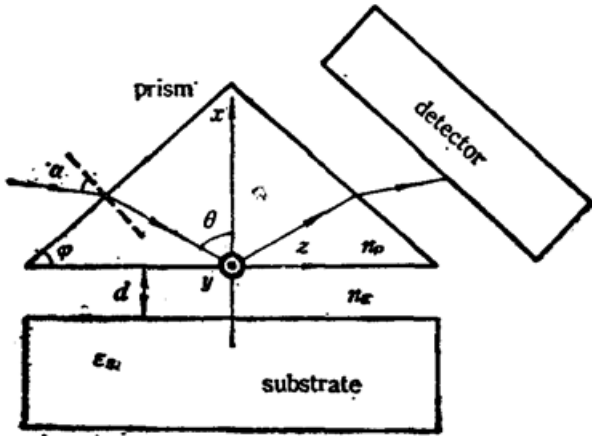


Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

射棱镜后,由于光学隧道效应,可使入射光耦合进衬底。当棱镜底面的入射角 θ 或其对应的侧面入射角 α 变化时,棱镜-衬底界面反射光强随之发生改变。利用菲涅耳公式不难推得^[1],对 TE 偏振^[2]有

$$\text{当 } n_g \leq \frac{\beta}{K_0}$$

$$R_p = 1 \tag{1}$$

$$\text{当 } n_g \leq \frac{\beta}{K_0} \leq n_p$$

$$R_p = \frac{g_e^2 (P_e - S_e)^2 + (g_e^2 + P_e S_e)^2 \text{th}^2 g_e d}{g_e^2 (P_e + S_e)^2 + (g_e^2 - P_e S_e)^2 \text{th}^2 g_e d} \tag{2}$$

其中

$$\beta = n_p K_0 \sin \theta \tag{3}$$

$$p_e = (n_p^2 K_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

$$g_e = (\beta^2 - n_g^2 K_0^2)^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$$S_e = (n_g^2 K_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

变换入射角 α ,从而使传播常数 β 发生改变,若 $\frac{\beta}{K_0}$ 略小于 n_p ,则 R_p 可近似表示为

$$R_p \approx 1 - \frac{4S_e}{P_e} \left(\frac{1 - \text{th}^2 g_e d}{1 + \frac{g_e^2}{P_e^2} \text{th}^2 g_e d} \right) \tag{7}$$

监视反射光强的变化。在临界角处,有关系式 $\beta/K_0 = n_g$ 成立,此时从棱镜-衬底反射的光强急剧下降,把衬底表面折射率与反射光强的破坏联系起来的方程^[3]为

$$n_g = \sin \alpha \cos \varphi + (n_p^2 - \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \sin \varphi \tag{8}$$

对于 TM 偏振^[2],用同样的方法有

$$\text{当 } n_x \leq \frac{\beta}{K_0}$$

$$R_p = 1 \tag{9}$$

$$\text{当 } n_g \leq \frac{\beta}{K_0} \leq n_x$$

$$R_p = \frac{n_g^4 g_m^2 (n_p^2 P_m - n_g^2 S_m)^2 + (n_p^2 n_g^2 g_m^2 + n_g^4 P_m S_m)^2 \text{th}^2 g_m d}{n_g^4 g_m^2 (n_p^2 P_m + n_g^2 S_m)^2 + (n_p^2 n_g^2 g_m^2 - n_g^4 P_m S_m)^2 \text{th}^2 g_m d} \tag{10}$$

其中

$$P_m = (n_p^2 K_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} \tag{11}$$

$$g_m = (\beta^2 - n_g^2 K_0^2)^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

$$S_m = \frac{n_z}{n_e} (n_x^2 K_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} \tag{13}$$

如果 β/K_0 略小于 n_x , 则 R_p 仍可近似表示为

$$R_p \approx 1 - \frac{4n_p^2 S_m}{n_z^2 P_m} \left(\frac{1 - \text{th}^2 g_m d}{1 + \frac{n_p^4 g_m^2}{n_z^4 P_m^2} \text{th}^2 g_m d} \right) \tag{14}$$

结合(8)式就可测出 TM 偏振状态下的衬底折射率。

衬底折射率的测量

测量用的棱镜是棱角 $\varphi=45^\circ$ 的对称棱镜, 待测衬底样品的底面抛光和清洁处理, 由于平面性衬底极易附着于棱镜底部, 间隙是光波长的几分之一, 这给出了良好的耦合。将该系统安装在最小刻度为 $2''$ 的测角仪转盘中央的夹具上, 该转动台由马达驱动, 可以正反旋转。测量装置的图解如图 2 所示。光源是 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 和直径 1mm 的 He-Ne 激光器。调整样品位置, 使激光束入射到棱镜底部中央, 用自准法测定棱镜面的法线, 作为测量中的“零位”。探测器为硅光电池, 其输出端与双笔函数仪相连, 一笔记录反射光强 R_p 随其入射角 α 变化的关系曲线; 另一笔与旋转台上的测角分度盘处的光敏电阻相连, 并记录 α 角度。从而就测定了全内反射显示陡削破坏的角度。

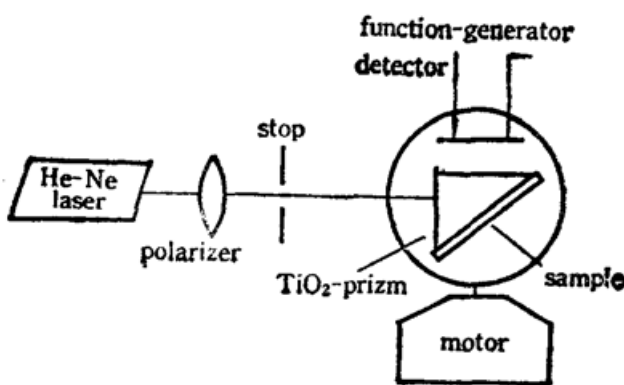


Fig. 2 The measuring apparatus

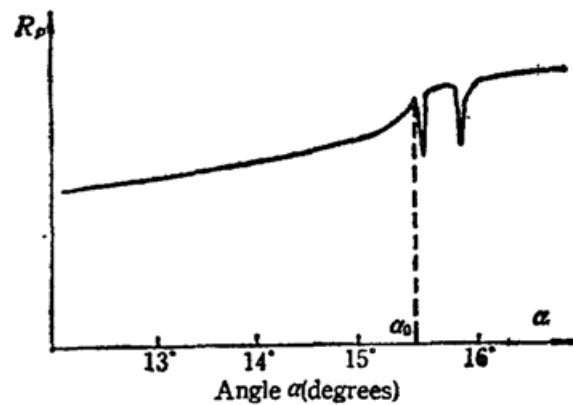


Fig. 3 Variation of power reflection coefficient R_p vs incident angles α for TE polarization

我们只测了 TE 偏振状态下衬底的折射率 n_y , 实验测得反射光强 R_p 与入射角 α 的关系曲线如图 3 所示。从图中看出, 临界角在约 $\alpha_0=15^\circ$ 处, 在 $\alpha>\alpha_0$ 时, 反射光强曲线位于全反射区域, 在 $\alpha\leq\alpha_0$ 时, 反射光强陡削地下降。此时, 方程(8)中 n_p 为 TE 偏振光感受的棱镜折射率, 其值为 2.865。测量结果示于下表中。

Mode	\bar{n}_y	$\Delta\bar{n}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_{y_i} - \bar{n}_y $	$\bar{n}_y \pm \Delta\bar{n}_y$
TE ₀	2.2082		

由上表看出, 衬底材料折射率的测量精度可满足使用的精度要求。

空气隙厚度 d 的大小是测量中值得重视的选择参数, 它影响着 $R_p-\alpha$ 曲线在临界角处陡

削程度。实验发现: d 小, 强度破坏大, 曲线陡削; d 大, 强度破坏小, 曲线较圆滑。因此, 反复调整好空气隙的厚度, 使棱镜与样品形成良好的耦合是关键所在。一般以 $d=0.05\mu\text{m}$ 为佳, 为了获得满意的效果, 可在棱镜与样品之间填充匹配液。

测 量 精 度

由(8)式衬底折射率的误差传递公式是:

$$\frac{\Delta n_y}{n_y} = \text{ctg } \alpha - \text{tg } \varphi + \frac{\Delta n_p}{n_p^2 - \sin^2 \alpha} + \left| \frac{\cos \alpha \Delta \alpha}{n_p^2 - \sin^2 \alpha} \right| + \text{ctg } \varphi \quad (15)$$

因此衬底材料的折射率的误差 Δn_y 由 α 的误差 $\Delta \alpha$ 和 n_p 的误差 Δn_p 决定。而误差 Δn_p 与棱镜材料及入射光偏振态有关, 对误差 Δn_y 贡献较大的是入射角 α 的测定。要使 α 的测定达到一定的精度, 入射光束采用高斯光束, 且直径以 1 mm 为宜, 并且均匀照射到棱镜上, 这样可以避免衍射带来的影响; 另外, 将空气隙的厚度控制在 $0.05\mu\text{m}$ 以内, 使之良好耦合, 使 $R_p - \alpha$ 曲线在临界角处陡削下降, 且强度破坏最大, 从而准确测出对应的 α 角。一般直径 1 mm 的高斯光束它将只影响所测折射率到第四位小数。当然, 曲线的陡削程度还与材料的不均匀性有关, 材料不均匀时, 曲线较圆滑, 强度破坏小, 这种影响是不能忽视的。

综上所述, 用全内反射可有效地测量光波导衬底材料的折射率。这种测量方法有许多优点: 操作简便, 计算公式简单, 测量精度较高, 可作非破坏测量。因此, 这种方法可供生产厂家和用户广泛使用, 也可供集成光学波导参数测量和工程实验参考。

参 考 文 献

- 1 M. 玻恩, E. 沃耳夫, 光学原理, 上册, 科学出版社, 1978 年, § 1.5, § 1.6
- 2 H. Gnodera, I. Awai *et al.*, *Appl. Opt.*, 22 (2), 1194 (1983)
- 3 R. Ulrich, R. Torrye, *Appl. Opt.*, 12 (12), 2901 (1973)