

# 观察波导模式及测量薄膜参数用的 对称棱镜光波耦合器

徐 德 维

(中国科学院长春物理所)

## A symmetric prism optical coupler for observing waveguide modes and measuring parameters of thin film

Xu Dewei

(Changchen Institute of Physics, Academia Sinica)

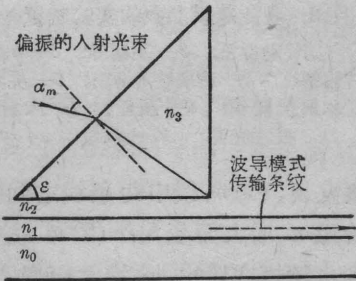
The parameters for waveguide thin film of BaK<sub>2</sub> glass prepared on a substrate of 10×75×2mm<sup>3</sup> K<sub>9</sub> glass were measured. The observed values  $\tilde{N}_m$  are in good agreement with the theoretical ones.

棱镜光波耦合器是向波导薄膜馈送和取出光能、选择激发波导模式、精确测量薄膜参数的重要器件<sup>[1~8]</sup>。

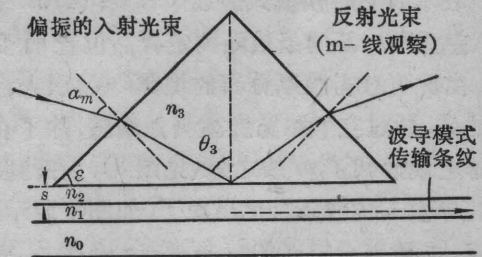
图 1 为直角和对称棱镜光波耦合器的略图。 $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  分别表示衬底、薄膜、空气和棱镜的折射率， $S$  为空气隙宽度。根据全反射和相干加强条件以及 Snell 定律，可导出波导模式特征方程及有效折射率为：

$$\begin{aligned}
 & KW(n_1^2 - N_m^2) \\
 &= m\pi + \tan^{-1} \left[ \left( \frac{n_1}{n_0} \right)^{2\rho} \left( \frac{N_m^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_m^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &+ \tan^{-1} \left[ \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^{2\rho} \left( \frac{N_m^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_m^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1) \\
 \tilde{N}_m &= \beta_m / K \\
 &= \sin \alpha_m \cos \varepsilon + (n_3^2 - \sin^2 \alpha_m)^{\frac{1}{2}} \sin \varepsilon \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中  $m$  表示模式阶数， $\rho$  表示激光束的偏振态。对 TE 模式， $\rho=0$ ；对 TM 模式， $\rho=1$ 。 $\beta_m$  为波导模式传播常数， $\varepsilon$  为棱镜角， $\alpha_m$  为



(a)



(b)

图 1

(a) 直角棱镜光波耦合器；(b) 对称棱镜光波耦合器

收稿日期：1978年8月23日。

$m$  阶模式的同步角。(2) 式中除了  $n_1$ 、 $W$  之外, 其它参数都是可以分别测量的。因为(2)式是超越方程, 所以不可能解析求解, 只有通过迭代公式才能近似求解<sup>[9]</sup>。

图 2 示出用于观测薄膜参数的实验装置。采用分辨率为 6' 的测角圆盘。经过偏振片和透镜的 He-Ne 激光束投射在对称棱镜直角面上, 使激光束束腰与棱镜基部中心相重合。把带有棱镜光波耦合器的夹具装在可调的  $X$ - $Y$  轨道的底座上。通过调节  $X$ - $Y$  向移动旋扭, 把耦合器移动到适当位置上, 以便在改变入射激光束方向时耦合光点保持稳定。为了观察方便, 用毛玻璃制作的屏幕做观察屏。

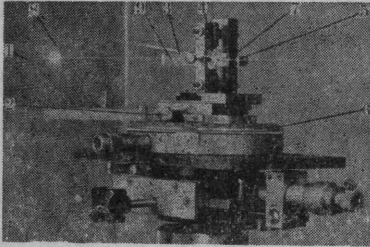


图 2 观测薄膜参数的实验装置

- 1— $X$  方向移动旋扭; 2—观察屏; 3— $m$  线;  
4—传输条纹; 5—玻璃波导薄膜; 6—夹具;  
7—对称耦合棱镜; 8—顶丝; 9—入射偏振激光束; 10—圆盘

观察发现: (1)  $m$  线中每条线之间的距离随模式阶数  $m$  增大而变大; (2)  $m$  线中每条线的宽度也随模式阶数  $m$  增大而变宽; (3) 与反射点相交的、表示激发的主模式线条较亮, 表示其它转换模式的线条较弱; (4)  $m$  线的位置和  $m$  线的条数随测定样品位置而变化, 由此可获得膜厚分布的规律; (5) 引人注目的是, 通过空气隙宽度适当地调整, 除了在屏幕上观察到了  $m$  线之外(见图 3), 在薄膜中波导模式传输条纹也出现了, 如图 4 所示。相应  $m$  阶波导模式的特征耦合长度  $L_m = D_m^{-1} e^{2k\sqrt{N_m^2 - n_1^2} \cdot s}$  随  $S$  增大而以指数增长。例如选  $S$  为  $\frac{\lambda}{10}$ , 零阶模式特征耦合长度  $L_0$  约为 0.18 毫米; 当  $S$  接近波长  $\lambda$  时,  $L_0$  达到了 90

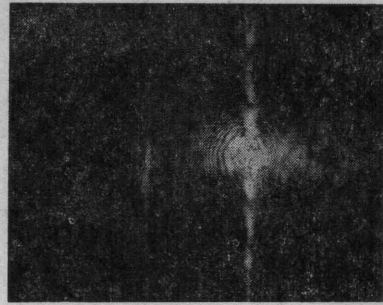
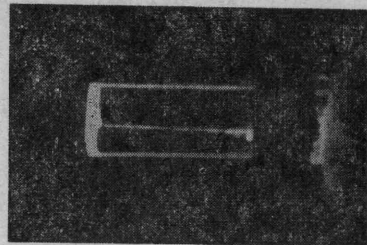
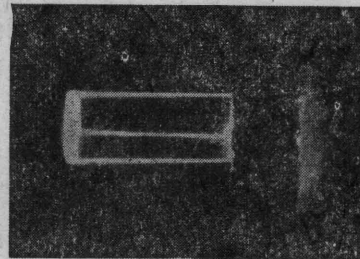


图 3 由高频溅射法制作的  $\text{BaK}_2$  玻璃薄膜的  $m$  线

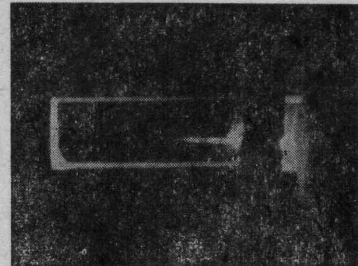
用  $m$  标记模式阶数, 激发的主模式阶数为  $m=2$ 。共呈现三个波导模式



(a)



(b)



(c)

图 4 用对称棱镜光波耦合器激发的  $\text{BaK}_2$  玻璃薄膜的波导模式传输条纹

- (a)  $m=0$  模式的传输条纹;  
(b)  $m=1$  模式的传输条纹;  
(c)  $m=2$  模式的传输条纹

表1 用TE偏振He-Ne激光束对BaK<sub>2</sub>玻璃薄膜波导模式的同步角、传播常数的测量

样 品 1						
模式阶数 <i>m</i>	同步角 $\alpha_m$	$\tilde{N}_m = \beta_m/K$	$N_m = \beta_m/K$	薄膜折射率 $n_1$	薄膜厚度 $W$ (微米)	测量膜厚 相对精度
		观测值	理论值			
0	29°4'	1.5347 ± 4.7 × 10 <sup>-4</sup>	1.53471	1.5367 ± 5.9 × 10 <sup>-4</sup>	3.570	0.036
1	28°18'	1.5288 ± 4.8 × 10 <sup>-4</sup>	1.52878			
2	27°6'	1.5193 ± 4.9 × 10 <sup>-4</sup>	1.51932			

多米。因此，在弱耦合条件下， $L_0$  变得很长。显然，出现波导模式传输条纹，并不取决于棱镜的几何形状与薄膜相连接的方式，而取决于空气隙宽度  $S$  的大小。

本文对于尺寸为  $10 \times 75 \times 2$  毫米<sup>3</sup>  $K_9$  玻璃衬底上制作的 BaK<sub>2</sub> 玻璃波导薄膜的参数进行了测量。由观测可知，对于本实验所测得的数据，实现了观测值  $\tilde{N}_m$  与理论值  $N_m$  比较好的符合(见表1)。

要精确测量  $n_1$  和  $W$ ，主要取决于测量  $\tilde{N}_m$  和  $n_0$  的精度。而要测定  $\tilde{N}_m$ ，由(2)式可见，必须对  $n_3$ 、 $\varepsilon$  和  $\alpha_m$  进行精确的测量。由(2)式可给出  $\tilde{N}_m$  的绝对误差为

$$\Delta \tilde{N}_m = \frac{\partial \tilde{N}_m}{\partial n_3} \Delta n_3 + \frac{\partial \tilde{N}_m}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{\partial \tilde{N}_m}{\partial \alpha_m} \Delta \alpha_m \quad (3)$$

在计算中，采用测量  $n_3$  和  $\varepsilon$  的仪器精度为  $\Delta n_3 = 5 \times 10^{-5}$  和  $\Delta \varepsilon = (4.1 \times 10^{-3})^\circ$ 。因此，从整个测量结果来看，同步角  $\alpha_m$  的测量显然是引入误差的主要来源。为提高测量同步角的精度，对于每阶模式的同步角都进行了多次测量，采用均方误差作为测量  $\alpha_m$  精度的标准 ( $\Delta \alpha_m = 3'$ )。由  $N_m$  的近似公式

$$N_m = n_1 - \frac{\pi^2(m+1)^2}{2n_1(KW)^2} \quad (4)$$

可导出薄膜折射率  $n_1$  的表达式为

$$n_1 = \frac{(m+1)^2 N_i - (i+1)^2 N_m}{(m+1)^2 - (i+1)^2} \quad (5)$$

式中  $i$  是低于  $m$  的模式阶数。为求得测量  $n_1$  的精度，计算  $n_1$  的绝对误差  $\Delta n_1$  为

$$\Delta n_1 = \left| \frac{\partial n_1}{\partial N_i} \right| \Delta N_i + \left| \frac{\partial n_1}{\partial N_m} \right| \Delta N_m \quad (6)$$

对于TE模式，由(1)式可导出  $W$  和  $\Delta W/W$  分别为

$$W = \left[ m\pi + \tan^{-1} \left( \frac{N_m^2 - n_0^2}{n_1^2 - N_m^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \tan^{-1} \left( \frac{N_m^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_m^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] / K (n_1^2 - N_m^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\Delta W/W = \left( \left| \frac{\partial W}{\partial n_1} \right| \Delta n_1 + \left| \frac{\partial W}{\partial N_m} \right| \Delta N_m \right) / W \quad (8)$$

由(3)、(6)式计算测量  $N_m$ 、 $n_1$  的精度高于千分之一，用(8)式计算测量  $W$  的相对精度  $\Delta W/W$  为 0.036。

综上所述，本测量方法的主要特点是：快速方便、结构简单、精确可靠，而且是一种非破坏性测量方法。因此，棱镜光波耦合器很适用于光学薄膜的测量。其测量精度高于阿贝折射仪，可与其它干涉法相媲美。可把它用于外延薄膜、介质薄膜、多种液态薄膜或薄层等方面的特性研究上。

### 参 考 文 献

- [1] P. K. Tien et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**, 291.
- [2] E. Miller; *Bell. System. Tech. J.*, 1969, **48**, 2059.
- [3] P. K. Tien et al.; *JOSA*, 1970, **60**, 1325.
- [4] P. K. Tien; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 2395.
- [5] R. Ulrich; *JOSA*, 1970, **60**, 1337.
- [6] T. E. Midmirter; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, **QE-6**, 583.
- [7] J. Harris; *JOSA*, 1970, **60**, 1007.
- [8] R. Ulrich; *JOSA*, 1971, **61**, 1467.
- [9] R. Ulrich et al.; *Appl. Opt.*, 1973, **10**, 2901.