

用光栅耦合器测量波导薄膜 参数的一种方法

徐 德 维

(中国科学院长春物理研究所)

提 要

本文研究了用光栅耦合器测量波导薄膜参数的新方法。我们对在 F1 玻璃衬底上真空蒸发制作的硫化锌薄膜和在 K9 玻璃衬底上浸涂法制作的环氧树脂薄膜的参数进行了测量。采用的光栅周期分别为 1200 mm^{-1} 、 1800 mm^{-1} 和 2400 mm^{-1} 。测量结果表明：薄膜波导模式有效折射率观测值 \tilde{N}_m 与计算值 N_m 符合得较好。计算测量有效折射率 \tilde{N}_m 和薄膜折射率 n_f 的精度高于 0.1%，计算测量薄膜厚度的相对精度 $\Delta W/W$ 为 2.8~0.1%。我们认为，在导波光学和半导体工艺中，光栅耦合器和棱镜耦合器一样，是快速而精确地测定波导薄膜参数的有效方法。而且，光栅耦合器尚具有它自己的特点。最后还简要地讨论了带有光栅结构的棱镜耦合器。

一、引 言

集成光学中的光波耦合器包括薄膜光栅耦合器^[1~10]，它不仅是向波导薄膜馈送和取出光能、选择激发波导模式、实现集成光路的重要器件，而且将它用于测量波导薄膜参数也是一种简易可行的新方法。

本实验是采用机刻和复制光栅耦合器，分别对于 F1 和 K9 玻璃衬底上制作的硫化锌和环氧树脂的波导薄膜的参数进行了测量。实验表明，这两种材料薄膜的波导模式有效折射率观测值与计算值符合得较好。与文献 [4] 采用对称棱镜耦合器测量薄膜参数的方法可以相媲美。

二、工作 原 理

我们知道，采用棱镜-薄膜耦合器实现光波耦合的相位匹配条件为

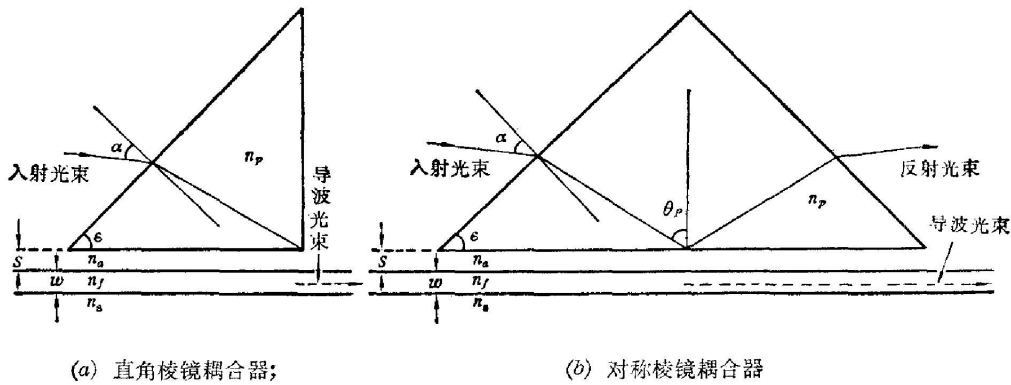
$$kn_p \sin \theta_p = \beta_m = k\tilde{N}_m, \quad (1)$$

式中 θ_p 为激光束在棱镜基面上的入射角， n_p 为棱镜折射率， \tilde{N}_m 为波导模式有效折射率观测值， m 为波导模式阶数， β_m 为波导模式传播常数， $k=2\pi/\lambda$ ， λ 为光学波长。为便于测量和计算，(1) 式又可以写成如下形式：

$$\sin \alpha \cos \varepsilon + (n_p^2 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \sin \varepsilon = \beta_m/k = \tilde{N}_m, \quad (2)$$

式中 α 为激光束在棱镜直角面或棱镜斜面上的入角射， ε 为棱镜角(见图 1)。

采用光栅耦合器实现光波耦合的相位匹配条件为



(a) 直角棱镜耦合器;

(b) 对称棱镜耦合器

图 1

$$\beta_\nu = kn_a \sin \theta_a + \nu \frac{2\pi}{\Lambda} = \beta_m, \tag{3}$$

式中 $\nu=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 为衍射波级数, 第 1 项为激光束入射波波矢量的 z 分量。第 2 项为光栅的波矢量, 位于 yz 平面内, 并垂直于沟槽线。只有衍射波沿 z 方向的传播常数 β_ν 等于薄膜波导模式的一个本征值 β_m , 该级衍射波才可以在波导薄膜中传播。为了描述薄膜折射率 n_f 、相位匹配角 α_f^ν 同波导模式有效折射率 \tilde{N}_m 之间的关系, (3) 式又可以写成如下形式:

$$n_a \sin \theta_a + \nu \frac{\lambda}{\Lambda} = n_f \sin \alpha_f^\nu = \tilde{N}_m, \tag{4}$$

式中 θ_a 为激光束在光栅表面上的入射角, n_a 为空气折射率, Λ 为光栅周期(见图 2)。很明显, 比较 (2) 和 (3) 式可以看出: 对给定的光栅周期 Λ 和衍射波的级数 ν , 由 (3) 式只要测定入射角 θ_a 就可以进行计算。然而, 根据 (2) 式, 不仅要测定入射角 α , 而且还要测定棱镜折射率 n_p 和棱镜角 ϵ , 因而给测量和计算工作都带来了不便。此外, 为了测量薄膜参数, 使用棱镜耦合器必须掌握熟练的技巧。如调整耦合光点使其稳定以及调整空气隙使其适宜等, 都需要相当精确, 而又是不易做到的。尤其是, 经过多次测量之后, 波导薄膜和衬底表面因夹具顶丝造成的刻痕也是不可避免的。可是采用光栅耦合器的测量方法, 就可以免除这些问题。

由 (4) 式计算波导模式有效折射率 \tilde{N}_m 之后, 再根据波导模式特征方程

$$kW(n_f^2 - N_m^2)^{1/2} = m\pi + \tan^{-1} \left[\left(\frac{n_f}{n_s} \right)^{2\rho} \left(\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2} \right)^{1/2} \right] + \tan^{-1} \left[\left(\frac{n_f}{n_a} \right)^{2\rho} \left(\frac{N_m^2 - n_a^2}{n_f^2 - N_m^2} \right)^{1/2} \right]. \tag{5}$$

图 2 薄膜光栅耦合器

借助于电子计算机,用叠代法可以求出波导薄膜折射率 n_f 、薄膜厚度 W 以及有效折射率计算值 N_m ^[6], 式中 n_s 为衬底折射率, ρ 表示激光束的偏振态。对 TE 模式, $\rho=0$; 对 TM 模式, $\rho=1$ 。如果采用远离截止的条件,那么(5)式可近似表示为如下形式:

$$kW(n_f^2 - N_m^2)^{1/2} = (m+1)\pi. \quad (6)$$

由(6)式容易导出波导模式有效折射率计算值的近似公式为

$$N_m = n_f - \frac{\pi^2(m+1)^2}{2n_f(kW)^2}, \quad (7)$$

式中 k 用 $2\pi/\lambda$ 代入,则(7)式可改写为如下形式:

$$N_m = n_f - \frac{\lambda^2(m+1)^2}{8n_fW^2}. \quad (8)$$

由(8)式可进一步导出薄膜折射率 n_f 和薄膜厚度 W 的表达式分别为

$$n_f = \frac{(m+1)^2N_i - (i+1)^2N_m}{(m+1)^2 - (i+1)^2} \quad (9)$$

和

$$W = \lambda(m+1)/2\sqrt{2n_f(n_f - N_m)}, \quad (10)$$

式中 i 是低于 m 的模式阶数。由(4)、(9)和(10)式可以计算出测量 \tilde{N}_m 、 n_f 的绝对精度以及测量 W 的相对精度分别为

$$\Delta\tilde{N}_m = \cos\theta_a\Delta\theta_a, \quad (11)$$

$$\Delta n_f = \frac{(m+1)^2}{(m+1)^2 - (i+1)^2} \Delta N_i + \frac{(i+1)^2}{(m+1)^2 - (i+1)^2} \Delta N_m, \quad (12)$$

和

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2} \{ [n_f^{-1} + (n_f - N_m)^{-1}] \Delta n_f + (n_f - N_m)^{-1} \Delta N_m \}. \quad (13)$$

此外,我们结合文献[6]导出的近似公式对测量薄膜参数的精度进行了计算。

三、测 量

本实验采用机刻和复制光栅耦合器^[9,10],其光栅周期分别为 1200 mm^{-1} 、 1800 mm^{-1} 和 2400 mm^{-1} 。光源是 6328 \AA He-Ne 激光器。将激光束通过偏振片之后入射在薄膜光栅上,如图 2 所示,并将观测的样品放在带有可调的 $x-y$ 轨道的底座上,底座固定在可转动的测角圆盘上。通过 $x-y$ 向旋钮的调节,把样品放在合适的位置上。在转动圆盘时,为了消除因耦合点移动而引进的测量误差,耦合光点必须与圆盘轴心精确地重合。我们采用的圆盘分辨率为 $1'$ 。对透射光栅耦合器来说,激光束既可以从空气区入射,又可以从衬底区入射。对于 K9 玻璃衬底($n_s=1.51370$)上,以浸涂法制作的环氧树脂薄膜和 F1 玻璃衬底($n_s=1.59977$)上以真空蒸发制作的硫化锌薄膜的参数进行了测量。四个样品测量的结果列于表 1 和表 2 中。

由表 1~2 可见,采用光栅耦合器的测量方法,在 $10^{-4}\sim 10^{-5}$ 范围内,波导模式有效折射率测量值 \tilde{N}_m 与计算值 N_m 符合得较好。测量薄膜折射率的精度高于 0.1% ,测量薄膜厚度的相对精度为 $2.8\sim 0.1\%$ 。显然,这种方法是一种比较精确的测量方法。

表 1 复制光栅耦合器对波导薄膜参数的测量

波导材料为环氧树脂, $n_s=1.51370\pm 5\times 10^{-5}$ 。样品 1 和样品 2 的折射率、厚度和测量薄膜厚度相对精度分别为 $n_f=1.5725\pm 6\times 10^{-4}$, $1.5634\pm 7\times 10^{-4}$; $W=2.67\mu\text{m}$, $6.15\mu\text{m}$; $\Delta W/W=2.0\%$, 2.8%

光栅耦合器	波导模式阶数 m	相位匹配角 α_f'	波导模式有效折射率		$\Delta\bar{N}_m=N_m-\tilde{N}_m$
			观测值 \tilde{N}_m	计算值 N_m^*	
样品 1 (1800 mm ⁻¹)	0	86°16'	$1.5685\pm 5.2\times 10^{-4}$	1.56889	+0.00039
	1	82°26'	$1.5581\pm 5.2\times 10^{-4}$	1.55827	+0.00017
	2	78°37'	$1.5410\pm 5.4\times 10^{-4}$	1.54078	-0.00024
	3	74°50'	$1.5171\pm 5.4\times 10^{-4}$	1.51772	+0.00066
样品 2 (2400 mm ⁻¹)	0	88°15'	$1.5626\pm 5.8\times 10^{-4}$	1.5626	0
	1	86°25'	$1.5603\pm 5.8\times 10^{-4}$	1.56032	0.00002
	2	84°38'	$1.5565\pm 5.8\times 10^{-4}$	1.55652	0.00002
	3	82°52'	$1.5512\pm 5.8\times 10^{-4}$	1.55119	-0.00001

* 按方程(5)用二分法计算得到的。

表 2 机刻光栅耦合器对波导薄膜参数的测量

波导材料为硫化锌, $n_s=1.59977\pm 3\times 10^{-5}$ 。样品 3 和样品 4 的折射率、厚度和测量薄膜厚度的相对精度分别为 $n_f=2.3486\pm 5\times 10^{-4}$, $2.3442\pm 4\times 10^{-4}$; $W=0.82\mu\text{m}$, $1.70\mu\text{m}$; $\Delta W/W=0.1\%$, 0.1%

光栅耦合器	波导模式阶数 m	相位匹配角 α_f'	波导模式有效折射率		$\Delta\bar{N}=N_m-\tilde{N}_m$
			观测值 \tilde{N}_m	计算值 N_m^*	
样品 3 (1200 mm ⁻¹)	0	81°38'	$2.3236\pm 3.5\times 10^{-4}$	2.32335	-0.00025
	1	73°3'	$2.2465\pm 4.0\times 10^{-4}$	2.24621	-0.00029
	2	64°8'	$2.1133\pm 4.7\times 10^{-4}$	2.11311	-0.00019
	3	54°47'	$1.9185\pm 5.3\times 10^{-4}$	1.91860	+0.0001
样品 4 (2400 mm ⁻¹)	0	85°41'	$2.3379\pm 3.2\times 10^{-4}$	2.33760	-0.0003
	1	81°21'	$2.3179\pm 3.6\times 10^{-4}$	2.31788	-0.00002
	2	77°1'	$2.2846\pm 3.8\times 10^{-4}$	2.28463	+0.00003
	3	72°39'	$2.2379\pm 4.0\times 10^{-4}$	2.23729	-0.00061

* 按方程(5)用二分法计算得到的。

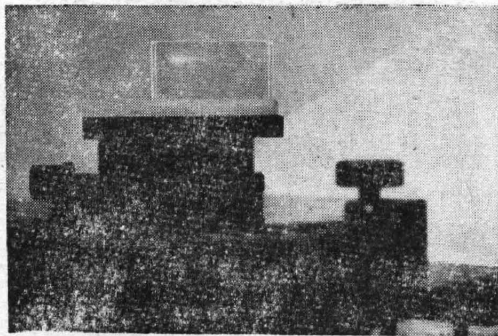


图 3 用机刻光栅耦合器激发硫化锌薄膜波导模式传输条纹照片
采用的光栅周期为 2400 mm^{-1} 的机刻光栅耦合器

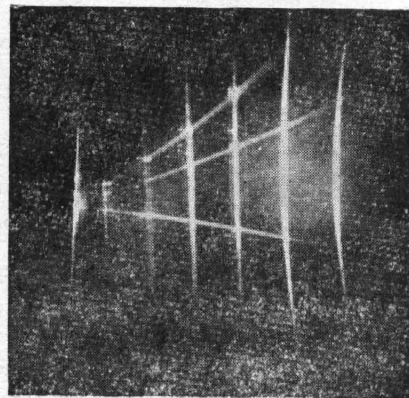


图 4 相应于图 3 所示硫化锌薄膜波导模式传输条纹, 在观察屏上同时显示的 m -线照片
薄膜厚度 $W=1.70\mu\text{m}$, 薄膜折射率 $n_f=2.3442$

在图 3~4 中分别示出用光栅耦合器观测的硫化锌薄膜波导模式传输条纹和观察屏上显示的 m -线。因为硫化锌薄膜波导损耗比较大,所以导波模式传播距离不长,约两厘米左右。图 4 照片中的 m -线显示出六个波导模式,由右向左数,前面三根线比较直,后面的线条变得越来越弯曲。由 m -线的形貌可以反映出沉积的薄膜质量和衬底表面加工的情况。图 5 和图 6 系用扫描电子显微镜对机刻光栅线槽的形貌拍下来的照片。光栅的刻槽连续相接,即刻槽宽度等于光栅周期,同时显示出光栅线槽是比较均匀和平整的。

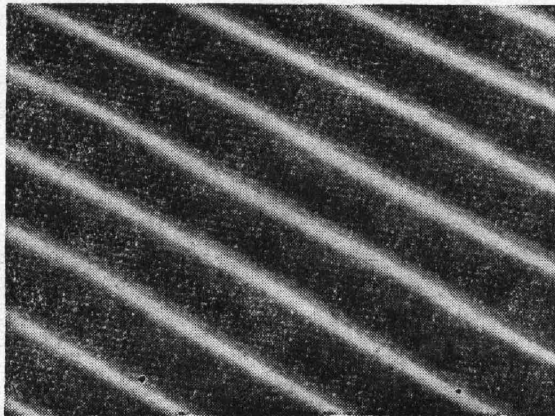


图 5 在 F1 玻璃衬底上机刻光栅的线槽照片
光栅周期为 $0.83 \mu\text{m}$ (1200mm^{-1}), 放大 10000 倍。

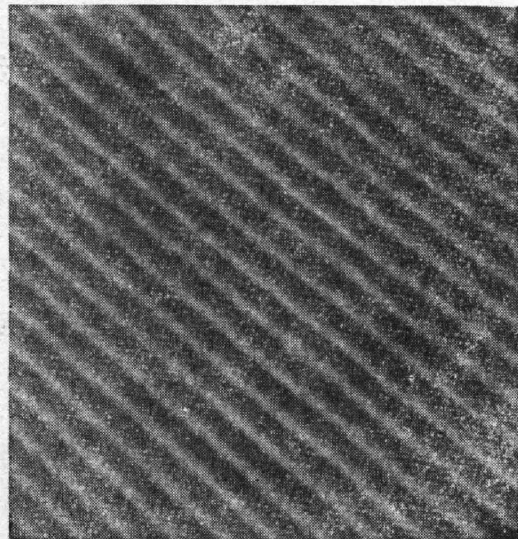


图 6 在 F1 玻璃衬底上机刻光栅的线槽照片
光栅周期为 $0.42 \mu\text{m}$ (2400mm^{-1}), 放大 10000 倍。

四、讨 论

用棱镜-薄膜耦合器和光栅耦合器测量薄膜参数的这两种方法^[4,10],实际上是带有光栅结构的棱镜耦合器(见图 7)的两个特殊情况。因为对后者来说,满足光波耦合的相位匹配条件可以写作为

$$kn_p \sin \theta_p + \nu \frac{2\pi}{\Lambda} = \beta_m = k\tilde{N}_m \quad (14)$$

在棱镜-薄膜耦合器中,方程(14)中的第二项为零,(14)式化为(1)式;在光栅耦合器中,方程(14)的第一项中的 n_p 、 θ_p 分别为 n_a 和 θ_a 所代替,(14)式化为(3)式。因此,方程(14)是满足光波耦合的相位匹配条件的一般表达式。

棱镜-薄膜耦合器的测量方法有许多特点^[4],但有其局限性。光学玻璃棱镜只适用于具有较低的折射率波导薄膜参数的测量,因为可用的光学玻璃,折射率最高不能超过 2。要想获得具有高折射率和优质的砷化镓单晶棱镜材料和金红石(TiO_2 晶体)棱镜材料,在国内是比较困难的。基于上述情况,我们研制了光栅耦合器和复合棱镜-光栅耦合器。前者不仅

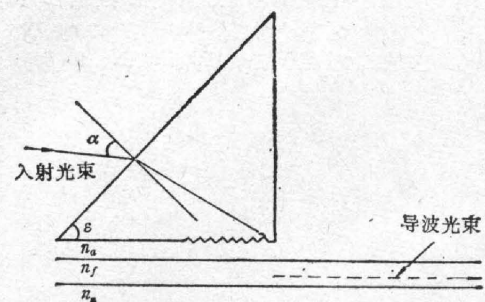


图 7 复合棱镜-光栅耦合器

可以克服棱镜耦合器的弱点,而且按方程(3)设计光栅周期和制作薄膜光栅耦合器,用于测量高折射率波导薄膜参数将是有效的。对于带有光栅结构的棱镜耦合器,尽管还存在一些棱镜-薄膜耦合器的问题,但是它具有新的特点,因为我们按方程(14)设计和制作复合棱镜-光栅耦合器时,不仅在材料上可以放宽对棱镜折射率的要求,而且在工艺上也可以放宽对制作短周期光栅的条件。因而,二者折衷地结合,不仅对于中等折射率波导薄膜参数的测量是可行的,而且对于高折射率砷化镓波导薄膜参数的测量也将是方便而有效的。

五、结 论

综上所述,用光栅耦合器测量薄膜参数方法的主要特点有:(1)对给定的光栅参数,只需要测量入射角,就可以快速给出精确结果;(2)测量技术简便,容易掌握使用;(3)测量过程中,样品表面不受接触外力的影响,因而是一种比较好的非破坏性测量方法;(4)带有光栅结构的衬底可重复使用。薄膜参数测量过后,可以洗掉旧膜,换上新膜,包括不同材料的波导薄膜;(5)当薄膜波导模式被激发时,可以同时出现传输条纹和 m -线,这在模式特性和参数测量的研究方面都是颇有意义的。

在真空镀膜、光栅线槽拍摄和光栅制作中,本所刘时惕、赵国璋、马仁祥同志和中国科学院长春光学精密机械研究所张庆英、张治国、张秀兰、李春启和刘亚琴同志曾给予热情的协助,在此表示致谢。

参 考 文 献

- [1] P. K. Tien, R. Ulrich *et al.*; *A. P. L.*, 1969, **14**, No. 9 (1 May), 291.
- [2] R. Ulrich; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 10 (Oct), 1337.
- [3] P. K. Tien, R. J. Martin *et al.*; *A. P. L.*, 1971, **18**, No. 9 (1 May), 393.
- [4] 徐德维;《科学通报》,1979, **24**, No. 16 (30 Aug), 731.
- [5] 徐德维;《激光》,1979, **6**, No. 9 (Sep), 43.
- [6] R. Ulrich, R. Torge *et al.*; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 12 (Dec), 2901.
- [7] M. L. Dakss *et al.*; *A. P. L.* 1970, **16**, No. 12 (15 Jun), 523.
- [8] D. G. Dalgoutte *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 12 (Dec), 2983.
- [9] 徐德维;《吉林大学自然科学学报》,1980, No. 1, 66.
- [10] 徐德维,《物理学报》, 1980, **29**, No. 9 (Sep), 1135.

A method for measuring the waveguide film parameters by grating couplers

XU DEWEI

(Changchen Institute of Physics, Academia Sinica)

(Received 25 August 1980)

Abstract

A method for measuring the film parameters of waveguide by using grating couplers is studied. The parameters for waveguide thin film of zinc sulfide prepared on a substrate of F1 glass by the vacuum evaporation and epoxy resin prepared on a substrate of K9 glass by a dip-coating were measured. The grating periods used were 1200mm^{-1} , 1800mm^{-1} and 2400mm^{-1} respectively. The measurement results indicate: the observed values of effective index of thin film waveguide modes are in good agreement with the calculated ones. The accuracies of the calculated values from measured values of waveguide mode effective index N_m and thin film refractive index n_f are better than measured values of thin film thickness are $2.8\sim 0.1\%$. We believe that the grating coupler can be used as an effective equipment for rapid and accurate determination of waveguide thin film parameters in the field of guided wave optics and semiconductor technology. It is just as effective as the prism coupler and has its own features. The prism couplers with grating structure are also discussed briefly.