

单模波导参数的双偏振测量

金 锋 李 玉 善

(中国科学院长春物理研究所)

提 要

本文提出了单模波导参数(薄膜的折射率和厚度)的双偏振测量方法,给出了单模波导参数及其测量误差的计算公式,并测量了单模玻璃波导参数。测量结果表明,这个方法比单模波导参数的多波长测量简单,其测量精度接近波导参数的多模测量方法。

一、引 言

棱镜耦合器不仅成为导波光学中常用的实验手段,而且为薄膜工艺提供了测量薄膜参数的重要工具。关于棱镜耦合器和用它测量薄膜参数已有许多报导^[1~9]。利用棱镜耦合器测量薄膜波导参数,一般要求波导具有两个或两个以上的同一种偏振态的导模,并将这些导模的有效折射率测量值代入联立的模方程(即本征值方程)以求薄膜的折射率和厚度^[3~4]。这样的方法简称双模或多模测量方法。

集成光路所需的介质波导多半是单模波导,因此单模波导的参数测量是一件十分重要的事情。目前,利用棱镜耦合器测量单模波导参数可归纳成三种方法。第一种方法要求薄膜的折射率和厚度中的任一参数是已知的,或者可由干涉仪和椭圆仪等其他仪器测得,并将一个导模的有效折射率测量值代入单一模方程,以求另一薄膜参数^[4];第二种方法是改变薄膜波导的包层折射率(如使用折射率匹配液)^[4];第三种方法是改变测量用的光波长而使用双波长或多波长,简称双波长或多波长测量方法^[5,6]。后两种方法,使“原先”的单模波导变成“新”的单模或多模波导,并将“原先”和“新”波导模的有效折射率测量值代入联立的模方程,便可以同时求得薄膜的折射率和厚度。前两种方法的测量精度不高,第三种方法则需要薄膜和衬底材料的色散数据,其折射率色散由外推或内插法求得,因此测量精度同样受到影响。

我们提出了单模波导参数的双偏振测量方法,给出了与此有关的单模波导参数及其测量误差的计算公式,并测量了单模玻璃波导参数。这种方法要求薄膜波导同时具有单一TE导模和单一TM导模,且利用棱镜耦合器测量这两个导模的有效折射率,并将测量值代入联立的模方程以求单模波导参数。单模波导参数的双偏振测量方法至今未见报导,它比前三种方法简单而实用,但是,实验表明其测量精度超过双波长测量方法,并接近多模测量方法。这种方法的特点是,既不需要以薄膜参数的其他测量方法为辅助手段,也不需要改变包层折射率和光波长等测量条件。

二、单模平板波导参数

平板波导的剖面示于图 1, d 为薄膜厚度, n_1 、 n_2 和 n_3 分别为薄膜、衬底和包层折射率,

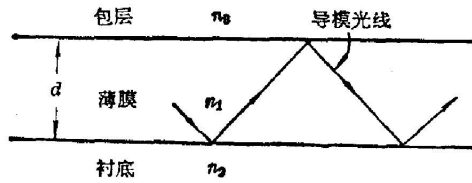


图 1 平板波导的剖面图

且假定 $n_1 > n_2 > n_3$ 。平板波导模应满足如下模方程^[1~3]

$$(n_1^2 - N_\nu^2)^{1/2} kd = \nu\pi + \phi_{12} + \phi_{13}, \quad (1)$$

式中

$$\phi_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{2\alpha} \left(\frac{N_\nu^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_\nu^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$\phi_{13} = \tan^{-1} \left(\frac{n_1}{n_3} \right)^{2\alpha} \left(\frac{N_\nu^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_\nu^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$k = 2\pi/\lambda$, λ 为真空中光的波长; ν 为模阶数, 取从零开始的有限个正整数; N_ν 为 ν 阶导模的有效折射率; $\alpha = 0$ 和 1 分别对应于 TE 和 TM 导模。所谓单模波导指只具有基模 ($\nu = 0$) 的波导。

ν 阶导模在 $N_\nu = n_2$ 时处于截止, 则由 (1) 式得到 ν 阶导模的截止方程

$$(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} kd = \nu\pi + G, \quad (4)$$

式中

$$G = \tan^{-1} \left(\frac{n_1}{n_3} \right)^{2\alpha} \left(\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

由 $\nu = 0$ 和 1 阶导模的截止方程不难得到薄膜波导具有单一 TE 导模的条件

$$G_e/\pi < 2(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} d/\lambda < 1 + G_e/\pi \quad (6)$$

和具有单一 TM 导模的条件

$$G_m/\pi < 2(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} d/\lambda < 1 + G_m/\pi, \quad (7)$$

式中

$$G_e = \tan^{-1} \left(\frac{n_1}{n_3} \right)^2 \left(\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$G_m = \tan^{-1} \left(\frac{n_1}{n_3} \right)^2 \left(\frac{n_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - n_2^2} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

注意到 $G_m > G_e$, 由 (6) 式和 (7) 式容易得到薄膜波导同时具有单一 TE 导模和单一 TM 导模的条件为

$$G_m/\pi < 2(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} d/\lambda < 1 + G_e/\pi. \quad (10)$$

在满足 (10) 式的条件下, 单模波导的模方程可写作

$$(n_1^2 - N_e^2)^{1/2} kd = \phi_e(n_1, N_e), \quad \text{TE 模}, \quad (11)$$

$$(n_1^2 - N_m^2)^{1/2} kd = \phi_m(n_1, N_m), \quad \text{TM 模}, \quad (12)$$

式中

$$\phi_e(n_1, N_e) = \tan^{-1} X(n_1, N_e) + \tan^{-1} Y(n_1, N_e), \quad (13)$$

$$\phi_m(n_1, N_m) = \tan^{-1} V(n_1, N_m) + \tan^{-1} W(n_1, N_m), \quad (14)$$

$$X(n_1, N_e) = \left(\frac{N_e^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_e^2} \right)^{1/2}, \quad Y(n_1, N_e) = \left(\frac{N_e^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_e^2} \right)^{1/2}, \quad (15)$$

$$V(n_1, N_m) = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(\frac{N_m^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2}, \quad W(n_1, N_m) = \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 \left(\frac{N_m^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_m^2}\right)^{1/2}, \quad (16)$$

N_e 和 N_m 分别为 TE 和 TM 基模的有效折射率。当已知 n_2 、 n_3 和 λ 时, 只要利用棱镜耦合器测得 N_e 和 N_m , 并将其测量值代入(11)式和(12)式的联立方程, 便可以同时求得薄膜折射率 n_1 和薄膜厚度 d 。

在方程(11)式和(12)式中消去 d , 得到以薄膜折射率为未知数的超越方程

$$n_1^2 = f(n_1, N_e, N_m), \quad (17)$$

式中

$$f(n_1, N_e, N_m) = \frac{N_e^2 \phi_m^2 - N_m^2 \phi_e^2}{\phi_m^2 - \phi_e^2}. \quad (18)$$

将 N_e 和 N_m 的测量值代入(17)式, 利用迭代法可以求得薄膜折射率。又将 N_e 的测量值和由(17)式得到的 n_1 代入(11)式可以求得薄膜厚度

$$d = D(n_1, N_e), \quad (19)$$

式中

$$D(n_1, N_e) = \phi_e / (n_1^2 - N_e^2)^{1/2} k_0. \quad (20)$$

三、波导参数的测量误差

波导参数的测量误差直接取决于有效折射率的测量误差。

由(17)式知道, n_1 是 N_e 和 N_m 的隐函数, 且其测量误差可表作

$$\Delta n_1 = \left| \frac{\partial n_1}{\partial N_e} \Delta N_e \right| + \left| \frac{\partial n_1}{\partial N_m} \Delta N_m \right|, \quad (21)$$

式中 ΔN_e 和 ΔN_m 分别为 N_e 和 N_m 的测量误差。在(17)式的两边, 分别对 N_e 和 N_m 求偏微商, 并利用微商关系式

$$\frac{d}{dx} F(x, y(x)) = \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} \frac{dy}{dx}, \quad (22)$$

不难得到

$$\frac{\partial n_1}{\partial N_e} = \frac{\partial f}{\partial N_e} / \left(2n_1 - \frac{\partial f}{\partial n_1} \right), \quad (23)$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial N_m} = \frac{\partial f}{\partial N_m} / \left(2n_1 - \frac{\partial f}{\partial n_1} \right). \quad (24)$$

将(23)式和(24)式代入(21)式得到

$$\Delta n_1 = \left(\left| \frac{\partial f}{\partial N_e} \Delta N_e \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial N_m} \Delta N_m \right| \right) / \left| 2n_1 - \frac{\partial f}{\partial n_1} \right|, \quad (25)$$

由(18)式偏微商, 并将其结果代入(25)式得到薄膜折射率测量误差的具体表达式

$$\Delta n_1 = \left| \frac{A}{C} \Delta N_e \right| + \left| \frac{B}{C} \Delta N_m \right|, \quad (26)$$

式中

$$A = \phi_m^2 \left[N_e (\phi_m^2 - \phi_e^2) + (N_e^2 - N_m^2) \phi_e \frac{\partial \phi_e}{\partial N_e} \right], \quad (27)$$

$$B = \phi_e^2 \left[N_m (\phi_m^2 - \phi_e^2) + (N_e^2 - N_m^2) \phi_m \frac{\partial \phi_m}{\partial N_m} \right], \quad (28)$$

$$C = n_1(\phi_m^2 - \phi_e^2)^2 + \phi_e \phi_m (N_e^2 - N_m^2) \left(\phi_e \frac{\partial \phi_m}{\partial n_1} - \phi_m \frac{\partial \phi_e}{\partial n_1} \right). \quad (29)$$

由(17)式和(26)式分别求得 n_1 和 Δn_1 之后, d 可由(19)式表示为 N_e 和 n_1 的显函数, 且其测量误差可写作

$$\Delta d = \left| \frac{\partial d}{\partial N_e} \Delta N_e \right| + \left| \frac{\partial d}{\partial n_1} \Delta n_1 \right|. \quad (30)$$

在(19)式两边作平方之后分别对 N_e 和 n_1 求偏微商, 并代入(30)式得到

$$\Delta d = \left(\left| \frac{\partial D^2}{\partial N_e} \Delta N_e \right| + \left| \frac{\partial D^2}{\partial n_1} \Delta n_1 \right| \right) / 2d, \quad (31)$$

由(20)式偏微商代入(31)式得到薄膜厚度测量误差的具体表达式

$$\Delta d = \left| \frac{P}{R} \Delta N_e \right| + \left| \frac{Q}{R} \Delta n_1 \right|, \quad (32)$$

式中

$$P = (n_1^2 - N_e^2) \frac{\partial \phi_e}{\partial N_e} + N_e \phi_e, \quad (33)$$

$$Q = (n_1^2 - N_e^2) \frac{\partial \phi_e}{\partial n_1} - \phi_e n_1, \quad (34)$$

$$R = dk^2(n_1^2 - N_e^2)^2 / \phi_e. \quad (35)$$

具体计算 Δn_1 和 Δd 时, 必须知道 $\partial \phi_e / \partial n_1$ 、 $\partial \phi_e / \partial N_e$ 、 $\partial \phi_m / \partial n_1$ 和 $\partial \phi_m / \partial N_m$ 的具体表达式。这些偏微商可由(13)式和(14)式求得。

从(26)式和(32)式可以看到, 为了提高波导参数的测量精度, 必须对有效折射率进行多次测量, 以此减少其测量误差。

四、单模玻璃波导测量

根据以上几节提出的单模波导参数的双偏振测量方法, 我们测量了单模玻璃波导参数,

其测量装置如图 2 所示。

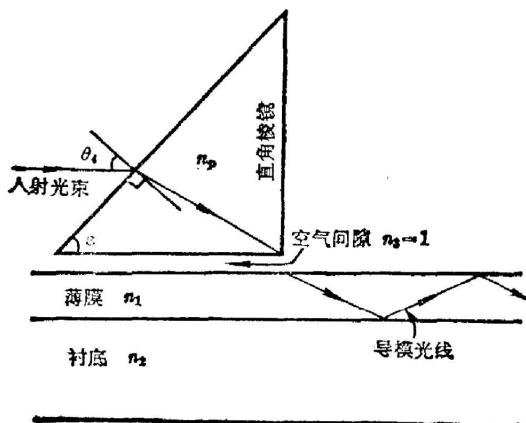


图 2 波导参数的测量装置示意图

玻璃波导样品是在 K_9 玻璃衬底上溅射一层 BaK_7 玻璃薄膜制成的, 它同时具有单一 TE 导模和单一 TM 导模。利用 V-棱镜折射仪测得的 K_9 和 BaK_7 大块玻璃材料在 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 的折射率分别为 1.51369 和 1.56620。因此, 这个波导的衬底和包层(空气)的折射率分别为 $n_2 = 1.51369$ 和 $n_3 = 1$ 。由于在溅射过程中 BaK_7 玻璃材料的折射率有一些变化, 所以薄膜折射率不能使用其大块材料的折射率, 而是待测。

测量用的直角棱镜是由 ZF_6 玻璃加工成的, 由 V-棱镜折射仪测得的棱镜材料在 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 的折射率为 $n_p = 1.75132$, 斜面与底

面的夹角为 $\varepsilon = 59^\circ 52' 30''$ 。利用这个棱镜将 He-Ne 激光束 ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) 耦合到玻璃波导薄膜中, 观察到在薄膜中光束传播时, 用最小刻度为 $10''$ 的测角仪测量激光束对棱镜斜面的同步入射角 θ_i , 并由导模的有效折射率 N 与入射角 θ_i 的关系式^[3, 4]

$$N = \sin \theta_i \cos \varepsilon + (n_p^2 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} \sin \varepsilon \quad (36)$$

可以求得单一 TE 导模和单一 TM 导模的有效折射率 N_e 和 N_m 。为了提高测量精度, 对 N_e 和 N_m 分别进行 7 次测量, 其测量结果为

有效折射率	均方误差
$N_e = 1.54335$	$\Delta N_e = 3.2 \times 10^{-5}$
$N_m = 1.54237$	$\Delta N_m = 5.3 \times 10^{-5}$

将 N_e 和 N_m 的测量值代入(17)式, 利用电子计算机进行迭代求得薄膜折射率 n_1 。从平板波导理论知道, $n_1 > N_e > N_m$ 。由于薄膜材料 BaK₇ 的折射率 1.56620 大于 N_e 和 N_m , 所以迭代过程中可采用 n_1 的起始值为 1.56620。又由于有效折射率的测量误差为 10^{-5} 数量级, 所以迭代过程一直进行到最后两次迭代所得到的薄膜折射率之差应小于 10^{-6} 为止。将上述迭代所得到的 n_1 和 N_e 的测量值代入(19)式, 求得薄膜厚度 d 。又将已测得的 n_1 、 d 、 ΔN_e 和 ΔN_m 代入(26)式和(32)式分别求得薄膜的折射率和厚度的测量误差 Δn_1 和 Δd 。于是, 单模玻璃波导参数的测量结果为

波导参数	测量误差
$n_1 = 1.55568$	$\Delta n_1 = 20 \times 10^{-5}$
$d = 1.238 \mu\text{m}$	$\Delta d = 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}$

由此可见, 薄膜的折射率和厚度的相对测量误差分别为 1.3×10^{-4} 和 1.3×10^{-2} 。这个测量精度接近于由相同玻璃材料制成的多模波导参数所作的多模测量^[9], 且超过波导参数的双波长测量^[5]。将上述已测得的波导参数代入(8)式和(9)式, 得到 $G_e/\pi = 0.4026$ 和 $G_m/\pi = 0.4587$ 。由于 $2(n_1^2 - n_2^2)d/\lambda = 1.4047$, 所以我们的玻璃波导样品只满足条件(7)式, 而并不满足条件(6)式, 从而不满足条件(10)式; 但是, 由于 $\nu = 1$ 阶 TE 导模几乎接近截止, 所以在实验中还是只观察到单一 TE 模和单一 TM 导模, 并没有观察到 $\nu = 1$ 阶 TE 导模。测量结果又表明, 薄膜折射率的测量值略低于 BaK₇ 大块玻璃材料的折射率。这可能是玻璃材料中的某些金属离子在溅射过程中挥发后未能溅落在玻璃衬底上, 以致改变薄膜的玻璃组分和网络结构, 而玻璃中少了一些金属离子会减少材料的折射率。

综上所述, 我们提出了单模波导参数的双偏振测量方法。这一新方法不仅对于导波光学中单模波导参数测量有着十分重要的意义, 而且在薄膜工艺中为测量非常薄的光学薄膜参数提供了一个简单而实用的测量手段。但是, 这个方法要求待测的薄膜波导必须同时具有单一 TE 导模和单一 TM 导模。此外, 由于两个偏振态基模的有效折射率所对应的同步入射角之差 $\Delta\theta_i$ 一般很小, 所以为了分辨这两个同步入射角需要高精度的测角仪。对于上述单模玻璃波导样品, 有 $\Delta\theta_i \approx 7 \sim 8'$, 因此需要最小刻度为 $1'$ 以下的测角仪, 否则将明显降低单模波导参数的测量精度。

参 考 文 献

- [1] P. K. Tien, R. Ulrich; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 10 (Oct), 1325.

- [2] R. Ulrich; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 10 (Oct), 1337.
- [3] R. Ulrich, R. Torge; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 12 (Dec), 2901.
- [4] T. Tamir; *«Integrated Optics»* (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1975), 223~231.
- [5] G. B. Brandt; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 4 (Apr), 946.
- [6] P. S. Chung; *Opt. Acta*, 1976, **23**, No. 8 (Aug), 651.
- [7] J. S. Wei, W. D. Westwood; *A. P. L.*, 1978, **32**, No. 9 (1 Nov), 819.
- [8] 吉林物理所集成光学调制器组; *«激光»* 1979, **6**, No. 5 (May), 26.
- [9] 李玉善, 金锋; *«激光»*, 1980, **7**, No. 1 (Jan), 42.

Two polarization measurements of single-mode waveguide parameters

JIN FENG and LI YUSHAN

(Chanchun Institute of Physics, Academia Sinica)

(Received 27 September 1980)

Abstract

Two polarization method for measuring single-mode waveguide parameters (thin film refractive index and thickness) was presented, the calculation formulae of single-mode waveguide parameters and the errors in parameter measurements were given, and single-mode glass waveguide parameters were measured. The measurement results showed that this method is more simple than multi-wavelength measurements, and the measurement accuracy is approaching to that of multi-mode measurements of waveguide parameters.