第8卷 第12期
1988年12月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 8, No. 12
December, 1988

测量单模波导参数的新方法：导模和漏模的双偏振测量

金 锋 李丽娜
（中国科学院长春物理所）

提 要

本文提出测量单模波导参数的新方法。用棱镜耦合器测量两种偏振基导模和基漏模的模折射率，并由相应的四个模方程确定单模波导参数。其测量精度优于纯导模测量。用这种方法测量了单模玻璃波导参数，并对误差来源作了理论分析。

关键词：棱镜耦合器，单模波导参数，导模和漏模。

一、引 言

集成光路一般由单模波导器件组成，由此，用棱镜耦合器准确测量单模波导参数（薄膜的折射率和厚度），是集成光学中的重要测试课题之一。

对此，我们曾在文献[1]中概述了已有三种测量方法，并又提出了一种精度较高的双偏振测量方法。前者由一种偏振基导模的模方程确定单模波导参数，后者由两种偏振其导模的模方程确定单模波导参数。这四种方法均只涉及导模，均对应于单模波导参数的一次独立测量。

为了进一步提高测量精度，本文提出一种用棱镜耦合器测量两种偏振基导模和基漏模的模折射率，并由相应的四个模方程确定单模波导参数。这种测量相当于单模波导参数的三次独立测量，其测量精度优于前述四种方法。文中用该法测量了单模玻璃波导参数，并对误差来源作了理论分析。

二、波导和漏波导

图1表示棱镜-薄膜耦合器。其中n_3、n_2、n_1和n_0分别为棱镜、耦合隙、薄膜和衬底的折射率，b和d分别为耦合隙和薄膜的厚度，θ_i为i介质中波矢量与界面法线的夹角。对于导模测量，耦合隙是空气，且$n_3>n_1>n_0>n_0=1$；对于漏模测量，耦合隙中滴入匹配液，且$n_3\approx n_2>n_1>n_0$。

三层介质n_0、n_1和n_2，当$b\to\infty$时构成平板波导；而当$n_2\to n_3$时，构成平板漏波导，分别示于图2(*a*)和(*b*)。图2表示了考虑到Goos-Hänchen位移的导模和漏模的锯齿波模型[2]。导模在0-1和1-2界面上全反射，光能量集中在薄膜中传播；漏模在0-1界面上

收稿日期：1987年12月14日；收到修改稿日期：1988年3月23日

全反射，而在 1-2 界面上折反射，光能量泄漏到半无限空间中，图中的 $2d_f$ 和 z_f 分别为光波在薄膜中往返一次的横向和纵向传播距离。

则光波在薄膜中往返一次的横向相移为[2]

$$\psi^0=2K_1d-2\phi_{10}-2\phi_{12}, \tag{1}$$

横向共振条件下，$\psi^0=2m\pi$ ($m=0, 1, 2, \cdots$)，得出导模或共振漏模(本文简称漏模)的模方程[2]

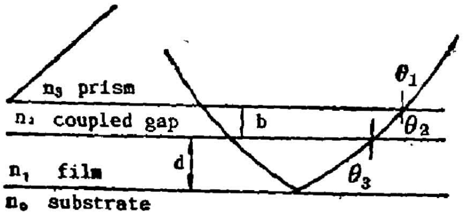

Fig. 1　The prism-film coupler

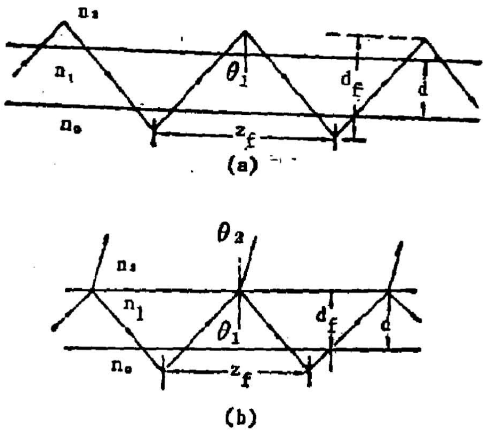

Fig. 2

(a) The waveguide; (b) The leaky waveguide

$$\left.\begin{aligned}
&K_1d=m\pi+\phi_{10}+\phi_{12},\\
&\phi_{ij}=\begin{cases}\tan^{-1}(n_i/n_j)^{2\rho}(p_j/K_i), & \text{全反射}\\ (\pi/2),\ (r_{ij}<0), & \text{折反射}\end{cases}\\
&K_i=n_ik\cos\theta_i=(n_i^2-N^2)^{1/2}k,\ p_j=(N^2-n_j^2)^{1/2}k,\\
&N=n_i\sin\theta_i=n_1\sin\theta_1,\ k=(2\pi/\lambda),
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中 $-2\phi_{ij}$ 为 i-j 界面上的反射相移，K_i 为 i 介质中的横向传播常数，p_j 为 j 介质中的横向衰减常数，N 为横折射率，m 为模阶数，$\rho=0$ 和 1 分别对应于 TE 模和 TM 模，k 和 λ 分别为真空中的波数和波长，r_{ij} 为 i-j 界面上的反射系数，由 (2) 式，得到基导模和其漏模的模方程分别为

$$(n_1^2-N^2)^{1/2}kd=\tan^{-1}\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{2\rho}\left(\frac{N^2-n_0^2}{n_1^2-N^2}\right)^{1/2}+\tan^{-1}n_1^{2\rho}\left(\frac{N^2-1}{n_1^2-N^2}\right)^{1/2}, \tag{3}$$

$$(n_1^2-N^2)^{1/2}kd=\tan^{-1}\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{2\rho}\left(\frac{N^2-n_0^2}{n_1^2-N^2}\right)^{1/2}+\frac{\pi}{2}。 \tag{4}$$

用这四个模方程可以确定单模波导参数。

利用截止条件 $N=n_0k$，由(2)式，可推得薄膜同时维持单一 TE、TM 导模和单一 TE、TM 漏模的条件为

$$0.5<[2(n_1^2-n_0^2)^{1/2}(d/\lambda)]<\left[1+(1/\pi)\tan^{-1}\left(\frac{n_0^2-1}{n_1^2-n_0^2}\right)^{1/2}\right]。 \tag{5}$$

文中单模波导就指满足(5)式的薄膜波导，

d_f 可写成[2]

$$\left.\begin{aligned}
&d_f=\begin{cases}d+(1/\xi_0^{\rho}p_0)+(1/\xi_2^{\rho}p_2), & \text{导模}\\ d+(1/\xi_0^{\rho}p_0), & \text{漏模}\end{cases}\\
&\xi_i=(N/n_i)^2+(N/n_1)^2-1,\ (i=0,\ 2)
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

由(1)式，可以证明

$$z_f k = 2d_f k \tan\theta_1 = -\left(\frac{\partial\psi^0}{\partial N}\right)。\tag{7}$$

三、单模玻璃波导测量

待测的单模波导样品是在 K_9 玻璃衬底($n_0=1.51639$)上溅射 BaK_7 玻璃薄膜而成的。测量用的对称棱镜由 ZF_6 玻璃($n_3=1.75132$)制成，棱镜角为 $\epsilon=45°35'48''$。光源采用 $\lambda=0.6328$ 和孔径 1 mm 的平行氦氖激光束。

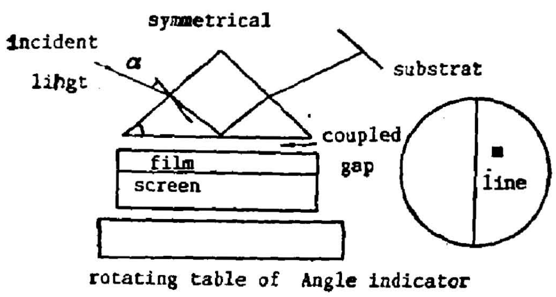

Fig. 3 The measuring apparatus

测量装置如图3所示。将对称棱镜放在波导样品表面，经夹住后一并置于最小刻度为 30″ 的测角仪转盘中心。调整样品位置，使激光束入射到棱镜底中心，先在耦合隙为空气时，改变激光束对棱镜斜面的入射角 α，在观察屏上出现 m 线时，读出基导模的同步入射角。然后在其他测量条件不变时，耦合隙中滴入二碘甲烷($n_n=1.7425$)，改变 α 并出现 m 线时，读出基漏模的同步入射角，模折射率的测量值 $\bar{N}_{\nu\mu}$ 可写成[3]

$$N_{\nu\mu}=\sin\alpha_{\nu\mu}\cos\epsilon+(n_3^2+\sin^2\alpha_{\nu\mu})^{1/2}\sin\epsilon \tag{8}$$

式中 $\alpha_{\nu\mu}$ 为同步入射角，下标 ν 表示 TE 模或 TM 模，下标 μ 表示基导模或基漏模，对每个模折射率，我们都作了七次测量。

设一误差和[3]为

$$\sigma=\sum_{\nu,\mu}[\bar{N}_{\nu\mu}-N_{\nu\mu}(n_1,\ d)]^2, \tag{9}$$

式中 $N_{\nu\mu}$ 为模折射率的理论值，对给定的 n_1 和 d 由模方程(3)和(4)求得。改变 n_1 和 d，使 σ 取最小值 $\sigma_{\min}$。将与 $\sigma_{\min}$ 相对应的 n_1 和 d 分别记作 $\bar{n}_1$ 和 $\bar{d}$，这就是单模波导参数的测量值。其均方误差可表示为

$$\left.\begin{aligned}\Delta n_1&=[\sum_{\nu\mu}|\Delta n_1(\nu,\ \mu)|^2/6]^{1/2},\\ \Delta d&=[\sum_{\nu\mu}|\Delta d(\nu,\ \mu)|^2/6]^{1/2},\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta n_1(\nu,\ \mu)&=[\bar{N}_{\nu\mu}-N_{\nu\mu}(\bar{n}_1,\ d)]\frac{2\Delta_n}{N_{\nu\mu}(\bar{n}_1+\Delta_n,\ \bar{d})-N_{\nu\mu}(\bar{n}_1-\Delta_n,\ \bar{d})},\\ \Delta d(\nu,\ \mu)&=[\bar{N}_{\nu\mu}-N_{\nu\mu}(\bar{n}_1,\ d)]\frac{2\Delta_d}{N_{\nu\mu}(\bar{n}_1,\ \bar{d}+\Delta_d)-N_{\nu\mu}(\bar{n}_1,\ \bar{d}-\Delta_d)},\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中 Δ_n 和 Δ_d 分别为 n_1 和 d 的计算步长，实际采用了 $\Delta_n=10^{-6}$ 和 $k\Delta_d=10^{-4}$。

单模玻璃波导参数的测量结果如表1所示。由表1可知，薄膜折射率和薄膜厚度的相对测量误差分别为 0.8×10^{-4} 和 0.7×10^{-2}。显然，这种方法的测量精度优于纯导模的双偏振测量[1]。此外，把测得的波导参数代入 $m=1$ 阶模的截止方程后可知，$m=1$ 阶模未截止，并不满足单模波导的条件(5)式。但是，$m=1$ 阶模接近截止，故在实验中只观察到基模，而未能观察到 $m=1$ 阶模。

Table 1　Measuring values for parameters of the single mode glass waveguide

mode	$\bar{N}_{\nu\mu}$	$N_{\nu\mu}(n_1, d)$	$\bar{N}_{\nu\mu}-N_{\nu\mu}$	$\bar{N}_{\nu\mu}-N_{\nu\mu}$	$\bar{n}_1 \pm \Delta n_1$	$d \pm \Delta d$
TE_0 guided mode	1.54124	1.54122	0.2×10^{-4}			
TM_0 guided mode	1.54041	1.54054	-1.3×10^{-4}		1.55094	1.427
TE_0 leaky mode	1.54050	1.54026	2.4×10^{-4}	1.2×10^{-4}	$\pm1.3\times10^{-4}$	$\pm1.0\times10^{-2}$ (μm)
TM_0 leaky mode	1.53998	1.54011	-1.3×10^{-4}			

四、误差来源分析

将耦合器中的薄膜看作一个干涉仪[4]，用多光束干涉原理[5]，推得在平衡状态下薄膜和棱镜中的光能量密度之比。

$$\left.\begin{aligned} \frac{w_1}{w_3}&=\left(\frac{1+r}{1-r}\right)\left[1+\frac{4r}{(1-r)^2}\sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right)\right]^{-1}, \\ \psi&=2K_1d-2\phi_{10}-2\phi_{123}, \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中 ψ 是光波在耦合器的薄膜中往返一次的横向相移，r 和 $-2\phi_{123}$ 分别为在三层介质（n_1、n_2 和 n_3）1-2 界面上的反射系数 r_{123} 绝对值和反射相移。r_{123} 的表达式为[5]

$$\left.\begin{aligned} r_{123}&=\frac{r_{12}+r_{23}\exp(i2K_2b)}{1+r_{12}r_{23}\exp(i2K_2b)}=r\exp(-i2\phi_{123}), \\ r_{ij}&=\frac{K_in_j^{2\rho}-K_jn_i^{2\rho}}{K_in_j^{2\rho}+K_jn_i^{2\rho}}。 \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

式中 r_{ij} 对于导模测量，在(13)式中应作如下代换

$$r_{12}=\exp(-i2\phi_{12}),\ r_{23}=-\exp(-i2\phi_{32}),\ \exp(i2K_2b)=\exp(-2\rho_2b), \tag{14}$$

由(12)式可知，(w_1/w_3) 在耦合器的共振点（$\psi=2m\pi$）取极大值，相应地在观察屏上出现 m 线。要测的模折射率，就是这一共振点的模折射率。然而对于漏模测量，由(12)、(13)式可知，(w_1/w_3) 在 $2K_2b=n\pi$ 或 $(2n+1)(\pi/2)$ $(n=0, 1, 2, \cdots)$ 时也能取极值，并在观察屏上有可能出现假 m 线。若适当选择 $n_2\approx n_3$，降低光波在耦合隙中的共振效应。便可去掉假 m 线。为了说明这一点，选择 $n_2=1.58$ 和 $n_2=1.7425$，用测得的波导参数，由(12)式和(13)式计算出漏模的 $(w_1/w_3)\sim N$ 共振曲线，其结果分别示于图 4(*a*)和(*b*)，由图 4 可见，当 $n_2=1.58$ 和 $n_3=1.75132$ 相差较大时，出现两个共振峰，其中一个峰对应于假 m 线；当 $n_2=1.7425$ 和 $n_3=1.75132$ 相差不多时，只出现一个共振峰，对应于真 m 线。

实测的模折射率只能是在共振峰上耦合器共振点 $\psi=2m\pi$ 附近的模折射率，而不是波导或漏波导共振点 $\psi^0=2m\pi$ 的模折射率。所以，除了测试系统所带来的误差以外，模折射率的测量误差还有两个来源：一是共振峰的半能量模折射率宽度 ΔN_h，二是 $\psi=2m\pi$ 和 $\psi^0=2m\pi$ 之间的模折射率之差 ΔN_e。由(1)、(7)和(12)式，推得

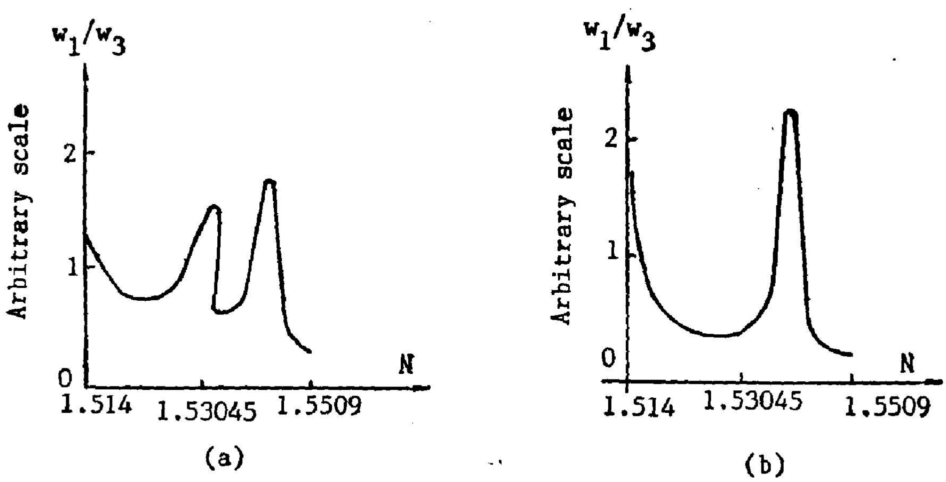

Fig. 4 $(w_1/w_3)\sim N$ resonant curves of the leaky mode (TE mode, $b/\lambda=0.5$)
(a) $n_3=1.58$; (b) $n_3=1.7425$

$$\left.\begin{aligned}\Delta N_\lambda&=2\sin^{-1}[(1-r)/2\sqrt{r}]/z_f k,\\ \Delta N_d&=-2(\phi_{123}-\phi_{12})/z_f k。\end{aligned}\right\}\tag{15}$$

要减少 ΔN_λ 和 ΔN_d，必须把棱镜对波导或漏波导的影响降低到测量精度所允许的程度。这种影响可由 $\Delta r=r_{123}-r_{12}$ 来表示，由(13)式可知，$|\Delta r|$很小的条件是

$$|(r_{23}/r_{12})\exp(i2K_2b)|\ll 1。\tag{16}$$

在此条件下，(13)式可近似写成

$$r_{123}\approx r_{12}[1+(1-r_{12}^2)(r_{23}/r_{12})\exp(i2K_2b)]。\tag{17}$$

对于给定的棱镜和波导样品。由(16)式可知，漏模测量应选用折射率接近等于棱镜折射率的匹配液；在(16)式中经代换(14)式后可知，导模测量应选用较大的耦合隙。

在实际测量中，漏模测量难以选择 $n_3=n_1$ 的匹配液，而导模测量不能采用太大的耦合隙。因此，上述两种误差总是存在的。为了对此作定量计算，对于漏模测量，由(17)和(15)式推得

$$\left.\begin{aligned}r&=|r_{12}|[1+(1-r_{12}^2)(r_{23}/r_{12})\cos 2K_2b],\\ \phi_{123}&=(\pi/2)-(1/2)(1-r_{12}^2)(r_{23}/r_{12})\sin 2K_2b,\\ \Delta N_d&=(1-r_{12}^2)(r_{23}/r_{12})\sin 2K_2b/z_f k。\end{aligned}\right\}\tag{18}$$

对于导模测量，由(17)、(15)和(14)式推得

$$\left.\begin{aligned}r&=1-2\exp(-2p_2b)\sin 2\phi_{12}\sin 2\phi_{32},\\ \phi_{123}&=\phi_{12}+\exp(-2p_2b)\sin 2\phi_{12}\cos 2\phi_{32},\\ \Delta N_d&=-2\exp(-2p_2b)\sin 2\phi_{12}\cos 2\phi_{32}/z_f k。\end{aligned}\right\}\tag{19}$$

根据模折射率测量精度的具体要求，对于漏模测量和导模测量，分别用(18)和(19)式，可选择适当的匹配液和耦合隙。

对于实验的波导样品和棱镜，用测得的波导参数和上述有关公式，计算出 r、ΔN_λ 和 ΔN_d，如表 2 所示。由表 2 可见，对于导模测量，只要调节耦合隙达到 $(b/\lambda)\geqslant 0.2$，ΔN_λ 和

ΔN_d 的数量级均小于 10^{-4}，故不影响表 1 所示波导参数的测量精度。对于漏模测量，不管耦合隙多大，ΔN_h 的数量级为 10^{-3}，而 ΔN_d 的数量级为 10^{-5} 以下，显然，其 ΔN_d 值不影响表 1 所列的测量精度，至于其 ΔN_h 值，由于眼睛的灵敏度约为 27 db，并经过多次测量，将其影响可减少到如表 1 所示的测量精度所要求的程度。

Table 2　Calculation values of r, ΔN_h and ΔN_d

polarized	b/λ	guided mode measured ($n_1=1.0000$)			Leaky mode measured ($n_2=1.7425$)		
		r	ΔN_h	ΔN_d	r	ΔN_h	ΔN_d
TE mode	0.1	0.9375	2.3×10^{-4}	1.6×10^{-4}	0.6288	1.5×10^{-3}	-3.0×10^{-5}
	0.2	0.9857	5.2×10^{-5}	3.6×10^{-5}	0.6322	1.6×10^{-3}	-3.2×10^{-5}
	0.3	0.9967	1.2×10^{-5}	8.3×10^{-6}	0.6286	1.6×10^{-3}	-2.5×10^{-6}
	0.4	0.9992	2.7×10^{-6}	1.9×10^{-6}	0.6314	1.6×10^{-3}	2.9×10^{-5}
	0.5	0.9998	6.2×10^{-7}	4.3×10^{-4}	0.6380	1.5×10^{-3}	3.3×10^{-5}

综上所述，导模和漏模双偏振测量的联用可提高单模波导参数的测量精度。它不仅对于集成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共了一种新的测试手段，此外，该法也可用来确定渐变折射率单模波导的参数。

参 考 文 献

[1] 金　锋，李玉善；《光学学报》，1981, **1**, No. 4 (Jul), 351～356。

[2] 金　锋，范俊清；《集成光学》，上册，国防工业出版社(1981 年)，§1.2。

[3] R. Ulrich, R. Torge; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 12 (Dec), 2901～2908.

[4] P. K. Tien, R. Ulrich; *J. O. S. A.*, 1970, **60**, No. 10 (Oct), 1325～1337.

[5] M. 玻恩，E. 沃耳夫；《光学原理》，上册，科学出版社(1978 年)，§1.5, §1.6, §7.6。

A new method for measuring single-mode waveguide parameters: Two polarization measurements of guided and leaky modes

JIN FENG AND LI LINA
(*Changchun Institute of Physics, Academia Sinica*)

(Received 14 December 1987; revised 23 March 1988)

Abstract

A new method for measuring single-mode waveguide parameters is presented in this paper. Mode refractive indices of fundamental guided and leaky modes at two polarization states are measured by the prism coupler, and single-mode waveguide parameters are determined from four corresponding mode equations. Its measuring accuracy is higher than that of measurements of pure guided modes. Single-mode glass waveguide parameters were measured by this method, and its error sources were analysed theoretically.

Key words: prism coupler; single-mode waveguide parameters; guided and leaky mode.