

测量液体和气体折射率的集成光学 技术单侧和双侧漏模法

高福斌 李丽娜 金 锋
(中国科学院长春物理所)

提 要

由单侧和双侧漏模法,测量了液体和气体的折射率,将液体或气体滴入或充入棱镜和衬底之间,使这三层介质组成单侧或双侧漏波导。用棱镜耦合器测量共振漏模的模折射率,并由相应的模方程确定液体或气体的折射率。测量结果表明,折射率的误差为 $1\sim 3\times 10^{-4}$ 。并在理论上对测量精度作了分析和讨论。
关键词: 集成光学; 漏模法测量; 漏波导。

一、引 言

棱镜耦合器已广泛应用于介质薄膜的参数测量,这种测量多半采用导模法^[1,2]。适用于沉积在低折射率衬底上的高折射率薄膜(光波导)的参数测量。此外,介质薄膜的参数测量,也还可采用漏模法,即用棱镜耦合器测量共振漏模的模折射率,并由相应的模方程确定薄膜参数。最初,此法仅用于沉积在高折射率衬底上或棱镜底的低折射率薄膜的参数测量^[3,4]。后来,作者又将漏模法用于测量光波导参数和钢化玻璃表层双折射^[5~8]。但是,在以前的测量中,被测薄膜的材料通常是固体介质。本文用单侧和双侧漏模法测量液体和气体的折射率。

二、单侧和双侧漏波导

将液体或气体滴入或充入棱镜和衬底之间,在一定条件下这三层介质组成单侧或双侧波导,如图1所示。其中,画出漏模的锯齿光线模型 n_2 、 n_1 和 n_0 分别为棱镜、液体和气体、衬底的折射率, d 为液体或气体层的厚度, θ_i 为 i 介质中波矢量与界面的夹角($i=0, 1, 2$)。

当 $n_2 > n_1 > n_0$ 时,由棱镜折射到液体或气体层中的光波,在 1—0 界面上全反射,而在 1—2 界面上折反射,向棱镜一侧泄漏能量,形成单侧漏模;当 $n_2, n_0 > n_1$ 时,由棱镜折射到液体或气体层中的光波,在 1—0 和 1—2 界面上折反射,向棱镜和衬底两侧泄漏能量,形成双侧漏模。

光波在液体或气体层中往返通行一次的横向相移为^[9]

$$\psi = 2k_1d - 2\phi_{10} - 2\phi_{12}, \quad (1)$$

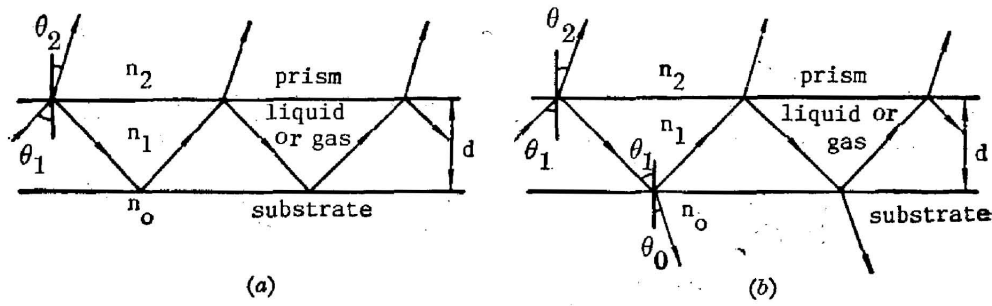


Fig. 1

(a) one side leaky-waveguide ($n_2 > n_1 > n_0$); (b) two-side leaky-waveguide ($n_2, n_0 > n_1$)

式中 m 为模阶数, $-2\phi_{10}$ 和 $-2\phi_{12}$ 分别为光波在 1-0 和 1-2 界面上的反射相移。当 $\psi = 2m\pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$) 即横向共振时, 得共振漏模的模方程^[9]

$$k_1 d = m\pi + \phi_{10} + \phi_{12}, \quad (2)$$

$$\phi_{12} = (\pi/2) \quad (r_{12} < 0) \quad (3)$$

$$\phi_{10} = \begin{cases} \tan^{-1} \left[\left(\frac{n_1}{n_0} \right)^{2\alpha} \left(\frac{p_0}{k_1} \right) \right] & \text{单侧漏模} \\ (\pi/2) \quad (r_{10} < 0) & \text{双侧漏模} \end{cases} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= n_1 k \cos \theta_1 = (n_1^2 - N^2)^{1/2} k, & p_0 &= (N^2 - n_0^2)^{1/2} k, \\ N &= n_1 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 N 为模折射率, r_{10} 和 r_{12} 分别为光波在 1-0 和 1-2 界面上的反射系数, $k = (2\pi/\lambda)$ 和 λ 分别为真空中的波数和波长。

由(1)~(5)式, 可以证明^[9]

$$\frac{\partial \psi}{\partial N} = -2d_f k \tan \theta_1, \quad (6)$$

$$d_f = \begin{cases} d + (J_0^2 p_0)^{-1}, & \text{单侧漏模} \\ d & \text{双侧漏模} \end{cases} \quad (7)$$

$$J_0 = \left(\frac{N}{n_0} \right)^2 + \left(\frac{N}{n_1} \right)^2 - 1. \quad (8)$$

(6)式是由模方程推得。式中 d_f , 对导模可以理解为有效薄膜厚度(或模式有效能量厚度); 而对漏模, 可单纯理解为有效薄膜厚度。

模方程(2)用来确定液体和气体的折射率, 而(6)式用来分析测量精度。

三、测 量

测量装置示意图如图 2 所示。其中, 光源是 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 、孔径为 1 mm 的平行激光束。对称棱镜由 ZF₆ 玻璃制成, 棱镜参数为 $n_2 = 1.75132$ 和 $\epsilon = 45^\circ 33' 46''$ 。对于单侧和双侧漏模法, 分别采用石英玻璃($n_0 = 1.4571$)和 K₉ 玻璃($n_0 = 1.51369$)作为衬底。

将对称棱镜放在衬底表面, 用夹具夹住后, 置于测角仪转盘上的二维平移台上。调整对称棱镜的位置, 使激光束入射到棱镜底的中心处。在棱镜和衬底之间滴入或充入待测液体

或气体,使光波从棱镜折射到液体或气体层中并形成单侧或双侧漏模。由棱镜射出的漏模光投射到观察屏上,调节棱镜夹具的压力以改变液体或气体层的厚度,并转动转盘以改变激光束对棱镜斜面的入射角 α 。在观察屏上出现若干条 m 线,且 m 线最亮时,读出同步入射角 α_m 。 α_m 对应于 m 阶共振漏模,其模折射率的测量值可表示为^[1]

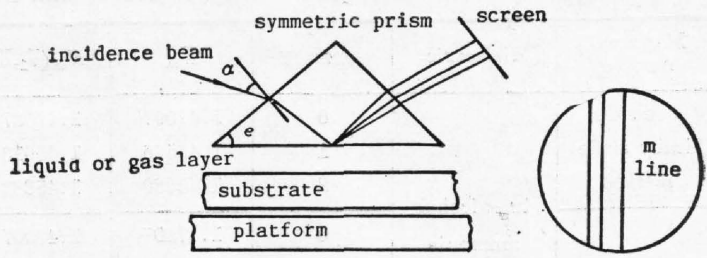


Fig. 2 The measuring apparatus

$$\bar{N}_m = \sin \alpha_m \cos \epsilon + (n_2^2 - \sin^2 \alpha_m)^{1/2} \sin \epsilon, \quad (9)$$

实验过程中对各阶共振漏模,均作了7次测量。

由一组 \bar{N}_m 及其模方程确定液体或气体的折射率,其误差和^[1]

$$\sigma = \sum_m [\bar{N}_m - N_m(n, d)]^2, \quad (10)$$

式中 $N_m(n, d)$ 为模折射率的理论值。对给定的 n_1 和 d ,由模方程(2)求得 N_m 实验值。改变 n_1 和 d ,使误差和 σ 取最小值 σ_{\min} ,并将与 σ_{\min} 相对应的 n_1 和 d 分别记作 \bar{n}_1 和 \bar{d} 。 \bar{n}_1 就是液体或气体折射率的测量值。计算过程中, n_1 的初始值选为^[10]

$$n_1 = \frac{1}{3}(4\bar{N}_0 - \bar{N}_1) \quad \text{或} \quad n_1 = \frac{1}{10}(15\bar{N}_0 - 6\bar{N}_1 + \bar{N}_2), \quad (11)$$

d 的初始值由(2)和(11)式求得, n_1 和 d 的步长分别为 $\Delta_n = 10^{-6}$ 和 $k\Delta_d = 10^{-4}$ 。则 n_1 的测量误差可写成^[1]

$$\Delta n_1 = \left[\frac{\sum_m |\Delta n_1(m)|^2}{(M-1)(M-2)} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$\Delta n_1(m) = \frac{2\Delta_n [\bar{N}_m - N_m(\bar{n}_1, \bar{d})]}{N_m(\bar{n}_0 + \Delta_n, \bar{d}) - N_m(\bar{n}_1 - \Delta_n, \bar{d})}, \quad (13)$$

M 为被测的模式数量。

用单侧漏模法测量了三乙醇氨的折射率,并用双侧漏模法测量了三乙醇氨、丙三醇和空气的折射率,测量结果列入表1。测量液体时的 m 线照片示于图3,(a)和(b)分别对应于单侧和双侧漏模。

由表1可见,单侧和双侧漏模法的折射率测量误差约为 $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ 。对三乙醇氨,单



Fig. 3 m -line photographs for measuring liquids
(a) one side leaky mode; (b) two-side leaky mode

Table 1 Measurement values of the refractive indices for some liquid and gas ($\lambda=0.6326 \mu\text{m}$, TE modes)

Measured method	dielectric	m	\bar{N}_m	$N_m(\bar{n}_1, \bar{d})$	$\bar{N}_m - N_m$	$\bar{n}_1 \pm \Delta n_1$	\bar{d} (μm)
one side leaky mode method		0	1.47097	1.47087			4.13
		1	1.46596	1.46613	1.47247 1.2×10^{-4}	1.47247 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$	
		2	1.45889	1.45882			
two sides leaky mode method	tri-alcohol ammonia	0	1.47207	1.47207			6.16
		1	1.46930	1.46938	2.2×10^{-4}	1.47296 $\pm 1.9 \times 10^{-4}$	
		2	1.46524	1.46489			
		3	1.45832	1.45859			
	maleic resin	0	1.46400	1.46407	2.2×10^{-4}	1.46561 $\pm 1.7 \times 10^{-4}$	4.71
		1	1.45962	1.45944			
		2	1.45191	1.45169			
air		0	0.99944	0.99909	7.4×10^{-4}	1.00026 $\pm 3.4 \times 10^{-4}$	6.53
		1	0.99545	0.99559			
		2	0.98924	0.98974			
		3	0.98095	0.98148			
		4	0.96965	0.97076			
		5	0.95811	0.95750			
6	0.94285	0.94158					

侧和双侧漏模法在误差范围内给出一致的折射率值。对空气,用双侧漏模法测得的折射率在误差范围内与室温常压下的标准值(1.000294)一致。

四、分析和讨论

将液体或气体层视作薄膜干涉仪,由多光束干涉原理,推得在平衡状态下液体或气体层中的光能量密度^[5,11]

$$w_1 = w_2 G(N) \left[1 + F(N) \sin^2 \left(\frac{\psi}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (14)$$

$$G(N) = \frac{1 - \gamma_{12}^2}{(1 - |r_{10} r_{12}|)^2}, \quad (15)$$

$$F(N) = \frac{4 |r_{10} r_{12}|}{(1 - |r_{10} r_{12}|)^2}, \quad (16)$$

$$r_{ij} = \frac{h_i n_j^{2\alpha} - h_j n_i^{2\alpha}}{h_i n_j^{2\alpha} + h_j n_i^{2\alpha}}, \quad (17)$$

$$h_i = n_i \cos \theta_i = (n_i^2 - N^2)^{1/2}, \quad (18)$$

式中 w_2 为棱镜中入射波的光能量密度, r_{10} 和 r_{12} 分别为 1-0 界面和 1-2 界面的反射系数^[11]。在(14)式中, $G(N)$ 和 $F(N)$ 都是 N 的缓变函数, 而 $\sin^2[\psi(N)/2]$ 是 N 的快变函数。显然, w_1 随 N 的变化呈现共振效应, 即 $w_1 \sim N$ 关系曲线是一个共振曲线。当 $\psi(N_m) = 2m\pi$ 时, w_1 取极大值, 并在观察屏上的 m 线最亮。峰值模折射率 N_m 就是 m 阶共振漏模

的模折射率。实际测量 N_m 时,要观察者细心观察 m 线光强在峰值附近的变化,并要准确判断 m 线光强最强的峰值位置。因此,除了系统误差以外,对 m 线光强变化的观测灵敏度也影响模折射率的测量精度。下面就此进行理论推导和分析。

设某一条 m 线光强为 I 。由于光强正比于光能密度即 $I \propto w_1$, 利用(14)式,得光强 I 为

$$I = AG \left[1 + F \sin^2 \left(\frac{\psi}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (19)$$

式中 A 为比例系数,在峰值附近,设

$$\psi = 2m\pi + \Delta\psi, \quad |\Delta\psi| \ll 1 \quad (20)$$

忽略 G 和 F 随 N 的变化,则(19)式变成

$$I \approx AG_m \left[1 - F_m \left(\frac{\Delta\psi}{2} \right)^2 \right], \quad (21)$$

式中 $G_m = G(N_m)$, $F_m = F(N_m)$ 。由(21)式推得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta I}{I_m} &= F_m \left(\frac{\Delta\psi}{2} \right)^2, \\ \Delta I &= I - I_m, \quad I_m = AG_m, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中 I_m 为 m 线的峰值光强。设可分辨的 m 线相对光强变化为 $(\Delta I/I_m)$, 则相应的观测灵敏度可定义为

$$\eta = \left(\frac{\Delta I}{I_m} \right)^{-1}. \quad (23)$$

由(6)、(16)、(22)和(23)式,推得由观测灵敏度 η 引起的模折射率测量偏差

Table 2 Calculation values of N 's

measured method	dielectric	m	r_{10}^{12}	ΔN_η		ΔN_η average square value	
				$\eta=100$	$\eta=500$	$\eta=100$	$\eta=500$
one side leaky mode method		0	0.865	8.2×10^{-6}	3.7×10^{-6}		
		1	0.751	3.3×10^{-5}	1.4×10^{-5}	4.5×10^{-5}	2.0×10^{-5}
		2	0.658	7.1×10^{-5}	3.1×10^{-5}		
two side leaky mode method	tri-alcohol ammonia	0	0.669	1.2×10^{-5}	5.2×10^{-6}		
		1	0.451	4.7×10^{-5}	2.1×10^{-5}	1.2×10^{-4}	5.3×10^{-5}
		2	0.307	1.1×10^{-4}	4.8×10^{-5}		
		3	0.213	2.0×10^{-4}	8.8×10^{-5}		
	maleic resin	0	0.611	2.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}	2.5×10^{-4}	1.1×10^{-4}
		1	0.377	1.0×10^{-4}	4.5×10^{-5}		
		2	0.238	2.3×10^{-4}	1.0×10^{-4}		
air		0	0.859	5.6×10^{-6}	2.5×10^{-6}		
		1	0.738	2.3×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}	7.1×10^{-5}
		2	0.635	5.1×10^{-5}	2.3×10^{-5}		
		3	0.544	9.3×10^{-5}	4.1×10^{-5}		
		4	0.470	1.5×10^{-4}	6.6×10^{-5}		
		5	0.405	2.2×10^{-4}	9.8×10^{-5}		
6	0.350	3.0×10^{-4}	1.3×10^{-4}				

$$\Delta N_{\eta} = \frac{\lambda}{4\pi d_f \tan \theta_1 \sqrt{\eta}} \cdot \frac{1 - |r_{10} r_{12}|}{\sqrt{|r_{10} r_{12}|}} \quad (24)$$

对于给定的液体或气体,根据(24)式选择适当的棱镜和衬底,便可满足所要求的模折射率的测量精度。由(24)式可以看到,减少测量偏差 ΔN_{η} 的方法有:(1)适当放松棱镜夹具的压力,增加 d_f ; (2)选择若干低阶模进行测量,增加 $\tan \theta_1$; (3)选择较大的 n_2 和 n_0 , 增加 $|r_{10} r_{12}|$; (4)提高对 m 线光强变化的观测灵敏度; (5)将棱镜和衬底抛光好并擦洗干净,还去除液体或气体中的杂质,减少由界面和杂质引起的散射和吸收损耗,增加 $|r_{10} r_{12}|$ 。

根据表1的数据,由(24)式计算出 ΔN_{η} 。列于表2,由表2可见,在我们的测量条件下,对肉眼灵敏度 27 dB, ΔN_{η} 均方值小于或接近等于 1×10^{-4} , 这样的精度能满足高精度测量的要求。对于液体,单侧漏模法与双侧漏模法相比,前者的 ΔN_{η} 均方值小于后者的 ΔN_{η} 均方值,即单侧漏模法的测量精度优于双侧法。这一点由表1中 $\bar{N}_m - N_m$ 均方值和 Δn_1 的相应趋势得到证明。此外,对双侧漏模法,空气与液体相比,表1中 $\bar{N}_m - N_m$ 均方值和 Δn_1 有所增加,但表2中 ΔN_{η} 均方值反而有所减少。这是由空气界面的散射损耗大于液体界面的散射损耗所造成的。

综上所述,单侧和双侧漏模法均可应用于液体折射率的精确测量,双侧漏模法可应用于气体折射率的测量,并可用来制造相应的光学仪器。

参 考 文 献

- [1] R. Ulrich, R. Torge; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 12 (Dec), 2901~2908.
- [2] Jin Feng, Li Yushen; *Chinese Physics*, 1982, **2**, No. 3 (Jul-Sep), 804~809.
- [3] T. -N. Ding, E. Garmire; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 20 (Oct), 3177~3181.
- [4] T. -N. Ding, E. Garmire; *Opt. Commun.*, 1983, **48**, No. 2 (Nov), 113~115.
- [5] 金锋;《光学学报》, 1983, **3**, No. 4 (Apr), 337~343.
- [6] 金锋,李玉善;《光学学报》, 1987, **7**, No. 7 (Jul), 637~641.
- [7] 金锋,李丽娜;《光学学报》, 1988, **8**, No. 12 (Dec), 1072~1078.
- [8] 李丽娜,金锋,李玉善;《量子电子学》, 1989 (待发表)。
- [9] 金锋,范俊清;《集成光学》(上册), (国防工业出版社,北京,1981), § 1,2。
- [10] 金锋;《光学学报》, 1983, **3**, No. 7 (Oct), 656~662.
- [11] M. 玻恩, E. 沃耳夫;《光学原理》(上册), (科学出版社,北京,1978) § 1,5 § 7,6。

**A integrated optics technique for measuring
the refractive indices of liquid and gas
one and two-side leaky mode method**

GO FUBIN, LI LINA, AND JIN FENG

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

(Received 14 September 1988; revised 3 April 1989)

Abstract

The refractive indices of some liquid and gas were measured by using one and two-side leaky mode method. Liquid or gas was dripped or filled between prism and substrate, so that these three layers media formed one or two sides leaky waveguide. The mode refractive indices of resonant modes were measured by using the prism coupler, and the refractive index of the liquid or gas was determined from corresponding mode equations. Measured results shown that errors of the refractive indices are within $1\sim 3\times 10^{-4}$. The measurement accuracies were analysed and discussed theoretically.

Key words: integrated optics; leaky mode measurement method; leaky waveguide.