

利用泄漏波导测量低折射率薄膜的 折射率和厚度

吴 啟 宏
(浙江大学光仪系)

提 要

根据泄漏波导原理对 K₉ 玻璃基板上的冰晶石薄膜进行折射率测量, 达到的精度为 1×10^{-4} , 与真实波导的情况相似。文中讨论了利用添加高折射率薄层减小待测薄膜的最小厚度的可能性。文中还利用光电方法观察反射光中暗条纹的方法判别波导的激发, 并测出了冰晶石薄膜在 4500 Å 到 6500 Å 范围内的折射率。

关键词: 波导; 折射率; 薄膜。

一、引 言

在测量薄膜光学常数的各种方法中, 波导方法具有引人注目的优点。它所用的仪器比较简单, 主要是一台精度不低于 1' 的测角仪, 而能够达到折射率的绝对误差的测量精度一般小于 10^{-4} , 远优于光度法和椭偏法的测量精度。其次, 在利用波导方法测量时, 由于只需要利用光波的一个偏振分量, 故十分适合于测量薄膜的双折射特性。对于通常的波导测量, 由于光线在薄膜-基板界面和薄膜-空气界面上均需发生全反射, 故待测薄膜的折射率必须高于基板的折射率。这样, 折射率小于基板的薄膜, 如 K₉ 玻璃基板上的冰晶石、氟化镁薄膜, 就不能利用波导技术来测量折射率。文献[1]首先报道了利用泄漏波导, 测量 SF10 玻璃上的有机波导薄膜的折射率。我们利用泄漏波导技术, 对 K₉ 玻璃基板上的冰晶石薄膜进行了折射率的测量。我们还采用白光光源进行波导测量, 得到了冰晶石薄膜折射率随波长的变化。

二、泄漏波导的基本原理

波导中的光波行为服从麦克斯韦方程, 每一个稳定的波导模式对应于麦克斯韦方程的一个解, 但是在利用波导现象测量薄膜折射率时, 采用简单的射线光学方法分析, 也能得到正确的结论。

根据射线光学的观点, 光波在波导中沿 Z 字形的曲折路径行进。对于真实波导, 光波在薄膜的两侧界面上均发生全反射, 因此光波完全不进入两侧媒质。对于泄漏波导, 光波在薄膜-空气界面上仍发生全反射, 而在薄膜-基板界面上不发生全反射, 故欲测薄膜的折射率

可以低于基板折射率。这时将有一部份光能从薄膜进入基板,然而只要泄漏入基板的光能不多,例如光波在薄膜-基板界面上的反射系数不小于 0.5,那么在薄膜中仍可以形成稳定的波导。由于能量泄漏,这种波导模式的振幅随距离衰减很大,它的传播距离远小于真实波导。当我们利用泄漏波导原理测量薄膜折射率时,主要是考虑泄漏波导能否被激发,故实际上可以不考虑波导模式传播的远近。

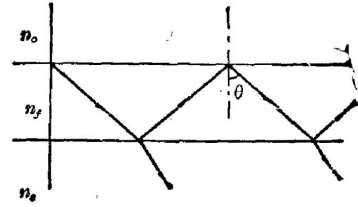


Fig. 1 Zigzag path of light in a quasi-waveguide

对于稳定的泄漏波导模式,光线在 Z 字形的路径传播一个周期后,应保持与初始时刻具有相同相位,即符合振幅干涉相加的条件。所以与真实波导类似,泄漏波导的模式应满足以下色散方程:

$$\frac{4\pi}{\lambda} nd \cos \theta - 2\varphi_{f_0} - 2\varphi_{f_s} = 2m\pi, \tag{1}$$

其中 nd 是薄膜的光学厚度, θ 是光线在波导中的反射角, m 是模式数, λ 是光波波长。 $-2\varphi_{f_s}$ 和 $-2\varphi_{f_0}$ 分别表示光线在薄膜-基板和薄膜-空气界面上的反射相位。

在薄膜-基板界面上,光线不发生全反射,故 $-2\varphi_{f_s} = \pi$ 。

在薄膜-空气界面上,光线发生全反射,故有以下关系:

$$\tan \varphi_{f_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^\rho \left[\frac{Nm^2 - n_0^2}{n^2 - Nm^2} \right]^{1/2},$$

上式中 $n_0=1$ 是空气的折射率,对于 S 分量 $\rho=0$,对于 P 分量 $\rho=2$ 。 Nm 是第 m 阶模式的有效折射率, $Nm = n \cdot \sin \theta$ 。

在测量时,如果我们测出两个模式的有效折射率 Nm 和 $N\hat{e}$,那么采取与真实波导类似的方法分析^[2],就可以推算出薄膜的折射率和厚度。如果在实验中测得 3~4 个模式的有效折射率,那么利用最小二乘法算法^[3],我们能减少实验误差的影响,求得最佳的薄膜折射率值和厚度。

三、测量装置和结果

由于光波在薄膜-基板界面上不发生全反射,故不必利用全反射下的光学隧道效应激发泄漏波导,而只要让光线斜入射至薄膜表面即可。为方便起见,通常把待测薄膜直接镀在直角棱镜的斜边上,而光线从直角面入射。

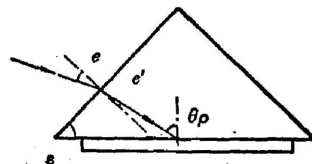


Fig. 2 Prism coated with film for measurement of leaky waveguide

根据图 2 中的几何关系,我们容易推算出薄膜中波导的有效折射率 Nm 和光线在直角边上的入射角 φ 的关系。

设棱镜的顶角为 ε ,由于 $\theta_p = \varepsilon + \varphi'$, φ' 为光线在棱镜内的折射角,那么有效折射率 Nm 为

$$\begin{aligned} Nm &= n_p \sin \theta_p = n_p \cdot (\sin \varepsilon \cos \varphi' + \cos \varepsilon \sin \varphi') \\ &= \sin \varepsilon \cdot \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi} + \cos \varepsilon \cdot \sin \varphi, \end{aligned}$$

在实验中直接测量的量是光线在直角面上的入射角 φ 。

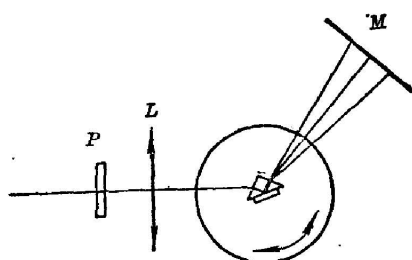


Fig. 3 Experimental setup of leaky waveguide

图3为利用泄漏波导测量薄膜折射率的实验装置图。直角棱镜安放在精度不低于 $1'$ 的测角仪平台上,棱镜斜边的中点接近转动轴心。He-Ne激光经过物镜 L 和起偏器 P 后聚焦于棱镜的斜边上。在测量时,转动测角仪平台,在适当的入射角 φ 下,在屏幕 M 上就可以观察到明亮的模式线。值得注意的是,在激发某一模式的波导时,其他模式的波导也会被激发,故往往可以同时观察到几根亮的模式线,这个现象也存在于真实波导的实验中。利用这一点,我们可以比较方便地判断光强较弱的高级次模式是否已被激发。我们对冰晶石薄膜进行实际测量的数据列于表1之中。

Table 1 Experimental results of rhyolite

	m	φ	Nm	n, d
S component	0	$25^{\circ}1'$	1.32749	
	1	$21^{\circ}55'$	1.30195	$n=1.3356\pm 0.0001$
	2	$17^{\circ}6'$	1.25859	$d=20450 \text{ \AA}$
	3	$10^{\circ}48'$	1.11950	$\pm 240 \text{ \AA}$
D component	0	$24^{\circ}57'$	1.32720	
	1	$21^{\circ}54'$	1.30180	$n=1.3355\pm 0.0001$
	2	$17^{\circ}3'$	1.25841	$d=20400 \text{ \AA}$
	3	$10^{\circ}46'$	1.11952	$\pm 280 \text{ \AA}$

由于泄漏波导的计算公式和处理方法与真实波导类似,故测量精度也相仿^[1]。在上述实验中,角度误差为 $2'$,造成对冰晶石折射率的误差不超过 1×10^{-4} 。由于冰晶石薄膜在一般情况下没有明显的双折射特性,故 P 分量和 S 分量的折射率十分接近。

四、减小待测薄膜厚度的实验

从表1的实例中可以发现,冰晶石薄膜的光学厚度已超过 4λ ($\lambda=6328 \text{ \AA}$)。这样厚的薄膜无论对冰晶石或氟化镁来说,在实际蒸镀时均会有较大的困难,因此有必要探讨减少待测薄膜最低厚度的可能性。

在泄漏波导中,薄膜-基板界面上必须有足够的振幅反射系数。如果薄膜的折射率给定后,那么只能靠增加光线在该界面上的入射角来增大反射率。在色散方程中,如果忽略入射角变化时两侧界面上反射相位的变化,那么就可以简化为

$$nd \cos \theta = m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (m \neq 0)。$$

当入射角 θ 很大时, $\cos \theta$ 很小,故只能通过加大薄膜的几何厚度 d 来满足色散方程的要求。

可见,薄膜和基板界面的反射率太低是减小薄膜的最小厚度的主要障碍。为此我们设法在棱镜斜边上预先镀上一层高折射率的薄膜,其厚度选择在波导模式所在的大入射角下接近 $1/4$ 波长的光学厚度,以达到增加界面反射率的目的。由于在大角度入射时, P 分量的修正导纳下降而 S 分量的修正导纳增加,所以这个方法只适用于 S 分量。高折射率层的折射率和厚度应预先测定,以便计算中使用。

在添加高折射率层后,实际的波导为两层结构(图 4)。这时色散方程将修改为

$$\frac{4\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1 + \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \theta_2 + \Phi_{01} + \Phi_{12} + \Phi_{23} = 2m\pi,$$

其中下标 0、1、2、3 分别代表空气、待测薄膜、高折射率层和棱镜。 Φ 则代表各界面上的相位变化。

我们选用 ZnS 作为高折射率层的材料,实际镀的厚度为 $1400 \text{ \AA} \pm 50 \text{ \AA}$,测得折射率为 2.40 ± 0.02 。然后在 ZnS 薄膜上镀上一层几何厚度为 $1.1 \mu\text{m}$ 的冰晶石薄膜。在实验中使用 S 偏振光能观察到 $m=0, 1, 2$ 三个模式,而用 P 偏振光只能看到 $m=0$ 一个模式。与理论估计的大体符合。

由于增加了一层 ZnS 薄膜,给测量带来了新的误差因素。但是由于 ZnS 层的厚度远小于冰晶石的厚度,故 ZnS 层引进的误差很小。模拟的数值计算表明,ZnS 的折射率误差 ± 0.02 ,厚度误差 $\pm 50 \text{ \AA}$,对冰晶石的折射率和厚度的总的影 响分别为 ± 0.0002 和 $\pm 150 \text{ \AA}$ 。同时 ZnS 薄膜的折射率非均匀性的误差也可以忽略。

五、采用连续光源进行波导测量

在波导测量中常常利用激光作为光源。但是波导的色散方程中并没有对光源的相干性提出要求,因此可以采用连续光源进行测量。

我们采用 100 W 溴钨灯作为光源,利用平行光管得到平行光。让平行光穿过窄带干涉滤光片和偏振片变成单色的线偏振光,用它来代替激光束进行测量。在实验中发现,在未插入干涉滤光片时,能看到模式线。低级次的模式线比较亮,但是线条较宽且轮廓不清楚(图 5)。高级次的模式线暗淡而十分模糊。在插入干涉滤光片利用单色光观察时,模式线变细,而亮度大幅度下降,高级次的用肉眼看不到,难于进行测量。

为了得到准确的数据,我们采用光电方法观察反射光中的暗条纹的出现,以判断波导是否被激发^[4]。实验装置如图 6 所示。待测的薄膜镀在直角棱镜的直角侧面上,在另一直角面上镀有银膜。直角棱镜仍放在测角仪平台上,镀有薄膜的直角边大致越过转轴中心。从光源发出的光线经过透镜和偏振片后聚焦于薄膜直角面上。从其反射出来的光线经银膜直角面反射后穿出棱镜。这两个直角面构成了两面角,故当棱镜随测角仪平台转动时,出射光线与入射光线的方向将保持不变。最后利用反射镜和透镜将该束光线聚焦于单色仪 M 的入射狭缝上。在单色仪的出射狭缝处,用光电倍增管接收光强并用指示电表读数。

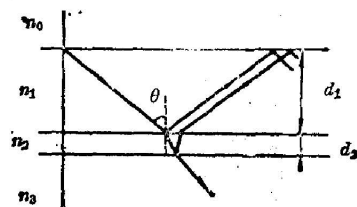


Fig. 4 Structure of waveguide with 2 layers



Fig. 5 Photograph of m-lines under white light illumination

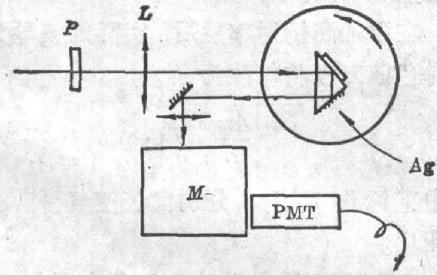


Fig. 6 Experimental setup using white light source

当光线从棱镜入射到薄膜界面上时, 如果入射角满足耦合条件, 一部份光能将进入薄膜

形成波导。否则将全部经薄膜反射回棱镜。因此在泄漏波导激发时, 必定伴随着反射光的强度明显下降, 由此而造成暗条纹。这种暗条纹的出现与波导在薄膜中的传播状况无关。当薄膜的吸收比较大时, 亮模式线可能因吸收而变得难以观察, 而反射光中的暗条纹却仍然能清晰地看到。所以利用这种暗条纹来判别波导的激发是一种较好的观察方法。图 7 就是用单色光照明时对应于图 5 中的模式线的反射光中的暗条纹, 它的轮廓比较清楚, 于用光电方法测出对应于最小光强时的入射角。图 8 和图 9 分别是该暗条纹在改变波长或改变入射角时, 光强信号的变化曲线。从图中可知, 当入射角改变时, 反射光的下降较剧烈。而波长改变时由于测量装置本身对波长有一响应分布, 故反射光的下降不甚剧烈。

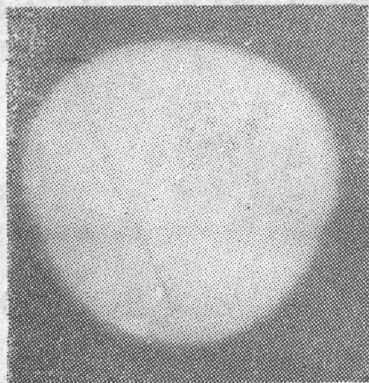


Fig. 7 Photograph of dark m-lines under reflective light

最后我们在表 2 中列出对冰晶石薄膜实际测量的结果。反演得到的折射率随波长而逐步减少, 符合正常色散的规律。

Table 2 Refractive index of cryolite film as a function of the wavelength of visible light

	4500 Å	5000 Å	5500 Å	6000 Å	6500 Å
$m=0$	25°19'	25°2'	24°47'	24°25'	24°1'
$m=1$	21°54'	20°36'	19°19'	17°30'	16°13'
$m=2$	15°39'	12°50'	10°18'	7°27'	4°55'
$n(\lambda)$	1.3365	1.3348	1.3331	1.3304	1.3274

$d=10300 \text{ Å} \pm 200 \text{ Å}$

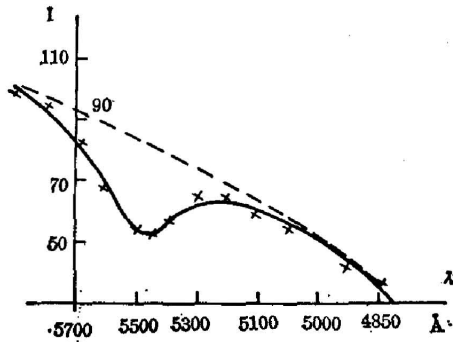


Fig. 8 Intensity of reflective light vs. wavelength

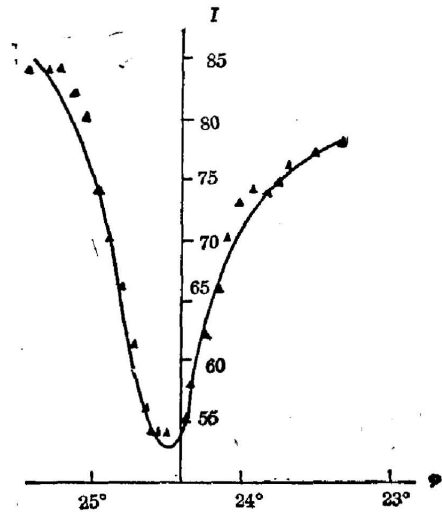


Fig. 9 Intensity of reflective light vs. incident angle

Determination of refractive index and thickness of a low index thin film by leaky waveguide technique

WU QIHONG

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 27 November 1986)

Abstract

Based on the principle of leaky waveguide, we made measurement of the refractive index of a cryolite film deposited on a K_9 glass substrate. The accuracy is about 1×10^{-4} , which is similar to that for a real waveguide. Possibility of decreasing the minimal measurable thickness of the film by insertion of a high index thin layer between the substrate and the film to be measured is discussed. When a white light source is used, we make judgement of waveguide excitation by observing the dark m-lines in the reflective light; in this way, the refractive of the cryolite film in the wavelength range from 4500 Å to 6500 Å is determined.

Key Words: waveguide; refractive index; thin film.