

各向异性聚合物薄膜参数的测量与计算*

王志刚 任 谔

(山东大学光学系、晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

郭士义 牟晓东 张光辉 许 东

(山东大学晶体材料研究所、晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘 要 讨论了用单侧漏模法测量薄膜共振漏模的耦合角、计算漏模的有效折射率并由相应的模方程来确定各向异性聚合物薄膜折射率 n_o 、 n_e 及厚度 d 的方法。对 PT-PEK-c(酞酸铅-聚醚醚酮)膜, 测量与计算结果为: $n_o = 1.6525 \pm 0.0014$, $n_e = 1.6439 \pm 0.0019$, $d = 2.33 \pm 0.32 \mu\text{m}$ 。

关键词 单侧漏模法, 各向异性聚合物薄膜, 膜参数。

1 引 言

棱镜耦合器已广泛应用于介质薄膜的参数测量。利用棱镜耦合器进行测量时, 多数采用导模法^[1]。这种方法适用于测量沉积在低折射率衬底上的高折射率薄膜(光波导)的参数。利用棱镜耦合器测量薄膜参数的另一种方法是漏模法, 即通过测量共振漏模的耦合角, 计算漏模的有效折射率, 并由相应的模方程来确定薄膜参数。此方法可用于测量沉积在高折射率衬底上或棱镜底面上的低折射率薄膜的参数^[2, 3]。当前可用于光电子技术中的聚合物薄膜材料是各向异性的, 这是因为, 为了获得高的电光系数, 需要使材料中的非线性基元取向定位, 这就要对材料作极化处理, 经过极化处理的材料便呈现各向异性。确定各向异性聚合物薄膜的参数, 对于研究这些薄膜的多种性质都是十分必要的。本文将漏模法用于测量各向异性聚合物薄膜的参数, 讨论了测量与计算薄膜厚度以及折射率 n_o 和 n_e 的方法。结果表明, 当入射光为 S 偏振和 P 偏振时, 薄膜的有效折射率的测量精度分别为 1.9×10^{-3} 和 1.6×10^{-3} , 而相应的薄膜厚度 d 、折射率 n_o 和 n_e 的精度分别为 $3.2 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 、 1.4×10^{-3} 和 1.9×10^{-3} 。

2 单侧漏波导

为了获得具有高电光效应、低介电常数的各向异性薄膜材料, 首先采用旋涂工艺, 使待测聚合物薄膜, 例如 PT-PEK-c 薄膜, 附着在折射率 $n_3 = 1.5163$ 的 K10 玻璃衬底上; 然后, 利用电晕极化, 将膜加热到接近它的玻璃化温度, 通过极化电场使薄膜内的非线性基元取向定位。在测量该薄膜的参数时, 采用了一块折射率 $n_2 = 1.7979$ 和 ZLaF1 玻璃耦合棱镜, 使

* 国家自然科学基金和山东省自然科学基金的资助课题。

收稿日期: 1997-01-16; 收到修改稿日期: 1997-05-12

该棱镜的底部与被测薄膜紧密接触。设膜的折射率为 n_1 , 当 $n_2 > n_1 > n_3$ 时, 棱镜-膜-衬底就组成了一个单侧漏波导, 亦称准波导, 如图 1 所示。由棱镜折射到膜的光波, 在 1-3 界面上发生全反射, 而在 1-2 界面上发生折射和反射, 并由棱镜一侧泄漏能量, 形成单侧漏模。

光波在薄膜内沿 z 路径传播。在 1-3 界面与 1-2 界面之间经过一个传播周期引起的横向(x 向)相移 φ 为

$$\varphi = 2Kd + \varphi_2 + \varphi_3 \quad (1)$$

式中, φ_2 和 φ_3 分别为光波在 1-2 界面和 1-3 界面上的反射相移, K 为传播常数在垂直方向(z 方向)上的分量, d 为薄膜厚度, Kd 为薄膜的厚度相移。 K 可以表示为:

$$K^2 = n_1^2 k^2 - N^2 k^2 \quad (2)$$

其中, k 为光波在自由空间的传播常数, 即 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为自由空间的光波波长, N 为薄膜的有效折射率, 即 $N = n_1 \sin \theta_1$, θ_1 为进入薄膜内的光波在 1-2 界面和 1-3 界面上的反射角。当 $\varphi = 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) 即横向共振时, 得到共振漏模的模方程

$$2Kd + \varphi_2 + \varphi_3 = 2m\pi \quad (3)$$

式中, m 为模阶数。在准波导情况, $n_2 > n_1 > n_3$, 且 $n_1 > N > n_3$,

$$\varphi_2 = \pi \quad (4)$$

$$\varphi_3 = -2 \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{n_1}{n_3} \right)^\rho \sqrt{N^2 - n_3^2} k/K \right] \quad (5)$$

式中, ρ 为入射光偏振依赖因子

$$\begin{aligned} \rho &= 0, & (\text{S 偏振}) \\ \rho &= 2, & (\text{P 偏振}) \end{aligned} \quad (6)$$

对于 S 偏振, 由(2)~(5)式、并代入 $\rho = 0$, 可以得到薄膜的关于 S 偏振光的折射率 n_1 的超越方程

$$\sqrt{\frac{n_1^2 - N_i^2}{n_1^2 - N_j^2}} = \frac{(i + \frac{1}{2})\pi + \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{N_i^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_i^2}}}{(j + \frac{1}{2})\pi + \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{N_j^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_j^2}}} \quad (7)$$

式中的 N_i 和 N_j 分别是当入射光为 S 偏振光时第 i 和 j 模的有效折射率, 它们的值由实验确定。解这个超越方程, 即可得到薄膜的折射率 n_1 , 此处的 n_1 为各向异性薄膜的寻常光折射率 n_o 。

由(2)~(5)式, 同时可得到薄膜厚度的表达式

$$d = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{n_1^2 - N_m^2}} \left[(2m + 1)\pi + 2 \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_m^2}} \right] \quad (8)$$

式中 N_m 为第 m 阶模的有效折射率。

对于 P 偏振, 由(2)~(5)式、并代入 $\rho = 2$, 并利用上面已经得到的薄膜厚度 d , 可以得到薄膜的关于 P 偏振光的折射率 n_1 的超越方程

$$\frac{4\pi}{\lambda} d \sqrt{n_1^2 - N_m^2} - 2 \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{n_1}{n_3} \right)^2 \sqrt{\frac{N_m^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_m^2}} \right] = (2m + 1)\pi \quad (9)$$

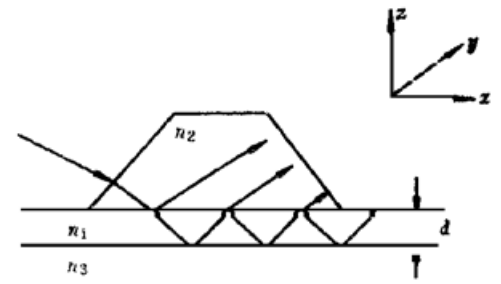


Fig. 1 One side leaky-waveguide

式中的 N_m 是当入射光为 P 偏振光时, 第 m 阶模的有效折射率, 可由实验确定。此处的 n_1 为各向异性薄膜的非常光折射率, 它的值依赖于光的传播方向, 将它与非常光主折射率 n_e 、以及 n_o 、 N_m 的关系式

$$n_e = \frac{N_m n_o}{\sqrt{n_o^2 - n_1^2 + N_m^2}} \quad (10)$$

代入方程(9), 可以得到关于 n_e 的超越方程, 解超越方程, 可以得到各向异性薄膜的对应于非常光的主折射率 n_e 。

3 测 量

测量装置如图 2 所示。He-Ne 激光束经起偏器成为偏振光, 再通过透镜聚焦到棱镜底面上,

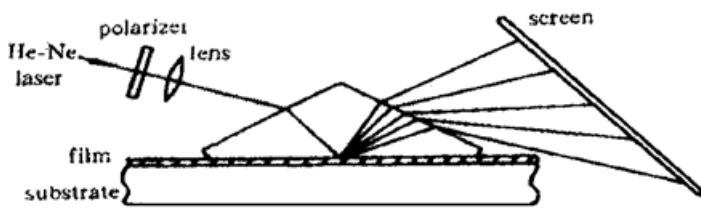


Fig. 2 The measurement apparatus

上, 等腰棱镜对于 $0.6328 \mu\text{m}$ 的折射率 $n_2 = 1.7979$, 底角 $\epsilon = 45.242^\circ$ 。棱镜置放于薄膜表面上, 用夹具夹住后, 置于测角仪转盘上的二维平台上。改变光的入射角, 使光波从棱镜折射到薄膜中去, 形成共振漏模, 漏模复又经棱镜耦合射出, 投射到观察屏上。在观察屏上, 出现了 5 条明亮的

线, 每一条亮线表示不同阶 m 的一个模。调节入射光角度 α , 当入射角等于某些确定的耦合角时, 这些亮线的一条上就会出现一个明亮的光斑, 它是棱镜底面对入射光的反射斑。转动二维平台, 让光斑依次对准每一条 m 线, 即可依次读出对应于一条 m 线的耦合角 α_m 。测角仪的分度值为分, α_m 的有效数字为五位。 α_m 对应着第 m 阶共振漏模, 漏模的有效折射率的实验值 N_m 可通过下式计算出来,

$$N_m = \sin \theta_m \cos \epsilon + (n_2^2 - \sin^2 \alpha_m)^{1/2} \sin \epsilon \quad (11)$$

4 计算与讨论

虽然, 由实验中确定的两个 N_m 值和模方程(7)、(8)式, 可以确定薄膜的折射率 n_o 和厚度 d 的值, 并由(9)和(10)式可以求出 n_e , 但为了提高薄膜折射率和厚度的测量精度, 还需要使这些计算结果彼此相洽, 以便求出最佳的参数值。

对于 TE 偏振的 5 个共振模, 首先用其中任意两个模的有效折射率的实验值 N_m , 计算出薄膜的厚度 d 和折射率 n_1 的值, 然后求出这些由不同的模组合所得到的厚度和折射率值的平均值, 并将平均值 d 和 n_1 作为计算过程的初始值, 求出使有效折射率的误差平方和 $\sigma(n_1, d)$ 值为最小的 n_1 和 d 。 $\sigma(n_1, d)$ 的表达式为^[4]:

$$\sigma(n_1, d) = \sum_m [N_m - N_m(n_1, d)]^2 \quad (12)$$

其中, N_m 是有效折射率的实验值, $N_m(n_1, d)$ 是由一个假设的折射率 n_1 和厚度 d 并由(7)、(8)式计算得到的有效折射率的值, 称之为有效折射率的计算值。首先取 n_1 和 d 的初始值, 计算 $\sigma(n_1, d)$, 然后改变 n_1 和 d 的值, 计算对应于 $n_1 \pm \Delta n_1$ 和 $d \pm \Delta d$ 不同组合的 σ 值, 其中, Δn_1 和 Δd 分别为 1×10^{-6} 和 1×10^{-5} 。将这些新的 σ 值相互比较, 求出其中对应于较小的 σ 值的 n_1 和 d , 以其为中心, 再求出对应于新的 $n_1 \pm \Delta n_1$ 和 $d \pm \Delta d$ 的 σ 值, 如此反复计算, 直

到改变 n_1 和 d , $\sigma(n_1, d)$ 不再减少为止。这样得到的与 σ_{\min} 相对应的 n_1 和 d 的值即为薄膜的折射率和厚度的终值, 分别用 n_{1f} 和 d_f 表示。由折射率和厚度的终值计算得到的有效折射率称为有效折射率的理论值, 以 $N_m(n_{1f}, d_f)$ 表示。

有效折射率的均方根误差可由公式

$$\delta N = [\sigma_{\min}/(M-1)(M-2)]^{1/2} \quad (13)$$

求出, 其中 M 为漏膜数目, 计算结果为 $\delta N = 1.9 \times 10^{-3}$ 。

n_1 和 d 的均方根误差可由下式计算:

$$\delta n_1 = \{ \sum_m [n_1(m) - n_{1f}]^2 / (M-1)(M-2) \}^{1/2} \quad (14)$$

$$\delta d = \{ \sum_m [d(m) - d_f]^2 / (M-1)(M-2) \}^{1/2} \quad (15)$$

当(14)式中的 $n_1(m)$ 为厚度 d 取终值 d_f 、有效折射率取实验值 N_m 时, 由(8)式计算出的 n_1 值, 而(15)式中的 $d(m)$ 为 n_1 取终值 n_{1f} 、有效折射率取实验值 N_m 时, 由(8)式计算出的 d 值时, 得到 $\delta n_1 = 1.4 \times 10^{-3}$, $\delta d = 3.2 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 。

对于 TM 偏振的共振模, 由于 d 的值已确定, 由(9)和(10)式可以求出对应于每个有效折射率实验值 N_m 的 $n_e(m)$ 。将多个模所对应的 $n_e(m)$ 的平均值作为初始值, 用与求 n_1 和 d 的终值类似的方法, 求出使

$$\sigma(n_e) = \sum_m [N_m - N_m(n_e, d_f)]^2 \quad (16)$$

为最小的 n_e 的终值, 即 n_{ef} 。最后, 由公式

$$\delta n_e = \{ \sum_m [n_e(m) - n_{ef}]^2 / (M-1)(M-2) \}^{1/2} \quad (17)$$

求出 n_e 的均方根误差。 n_e 的均方根误差为 $\delta n_e = 1.9 \times 10^{-3}$, TM 模的有效折射率 N 的均方根误差为 $\delta N = 1.6 \times 10^{-3}$ 。实验与计算数据列于表 1。

Table 1. The experimental and theoretical values of the effective refractive indices for PT-PEK-c polymer thin film

polarity	m	incident angle $\alpha_m / (\text{deg})$	experimental effective index N_m	theoretical effective index $N_m(n_{1f}, d_f)$	difference $N_m - N_m(n_{1f}, d_f)$
TE	0	40.917	1.6501	1.6476	0.0025
	1	38.000	1.6330	1.6328	0.0002
	2	33.917	1.6065	1.6080	-0.0015
	3	28.917	1.5701	1.5733	-0.0032
	4	24.167	1.5314	1.5297	0.0017
TM	0	39.833	1.6439	1.6391	0.0048
	1	36.667	1.6247	1.6242	0.0005
	2	32.750	1.5984	1.5993	-0.0009
	3	28.083	1.5636	1.5647	-0.0011
	4	22.917	1.5205	1.5229	-0.0024

$$d = 2.33 \pm 0.32 \mu\text{m}, n_o = 1.6525 \pm 0.0014, n_e = 1.6439 \pm 0.0019$$

综上所述, 单侧漏波导法是一种精确测量薄膜参数的有效方法, 它不仅适合各向同性薄膜的参数测量, 也适合各向异性薄膜的参数测量。

参 考 文 献

- [1] R. Ulrich, Theory of the prism-film coupler by plane-wave analysis. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(10) : 1337~ 1350
- [2] Tie-Nan Ding, E. Garmire, Measurement of thin film parameters using substrate excitation of leaky modes. *Opt. Commun.*, 1983, **48**(2) : 113~ 115
- [3] Tie-Nan Ding, E. Garmire, Measuring refractive index and thickness of thin films: A new technique. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(20) : 3177~ 3181
- [4] R. Ulrich, R. Torge, Measurement of thin film parameters with a prism coupler. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(12) : 2901~ 2908

Measurement and Calculation of Anisotropic Polymer Film Parameters

Wang Zhigang Ren Quan

(Department of Optics, Shandong University, Jinan 250100)

Guo Shiyi Mu Xiaodong Zhang Guanghui Xu Dong

(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 16 January 1997; revised 12 May 1997)

Abstract The one side leaky wave technique is discussed for determination of the refractive indices n_o , n_e and thickness d of the anisotropic polymer thin film through the measurement of the coupling angles corresponding to leaky modes, and the calculation of their effective indices and solving the corresponding mode equations. The results of measurement and calculation for PT-PEK-c film are: $n_o = 1.6525 \pm 0.0014$, $n_e = 1.6439 \pm 0.0019$, $d = 2.33 \pm 0.32 \mu\text{m}$.

Key words one side leaky wave technique, anisotropic polymer thin film, film parameters.