

棱镜—薄膜耦合器的耦合间隙对 薄膜参数测量误差的影响

李玉善 金 锋

(中国科学院长春物理所)

提 要

利用等厚干涉法测量了棱镜—薄膜耦合器的耦合间隙,在不同耦合间隙下测量了薄膜波导模式的传播常数、薄膜折射率和薄膜厚度。用 Tien 和 Ulrich 有关棱镜—薄膜耦合器的理论分析了耦合间隙对薄膜参数测量误差的影响。

棱镜—薄膜耦合器是测量薄膜参数的有效工具^[1]。薄膜参数的测量误差依赖于棱镜与薄膜波导的耦合间隙。

我们利用等厚干涉法测量了玻璃棱镜与玻璃平板波导的耦合间隙,在不同耦合间隙下测量了波导模的传播常数。将这些传播常数的测量值代入模方程,利用电子计算机计算出波导的薄膜折射率、薄膜厚度、与此相关的波导模传播常数的理论值及其相对传播常数测量值的均方差。对此,用 Tien 和 Ulrich 有关棱镜—薄膜耦合器的理论^[2,3]分析了耦合间隙对薄膜参数测量误差的影响,并指出了适合薄膜参数测量的较恰当的耦合间隙。

一、传播常数与耦合间隙的关系

图 1 表示棱镜—薄膜耦合器的折射率分布和几何结构。 n_p 、 n_c 、 n_f 和 n_s 分别为棱镜、耦合间隙、薄膜和衬底的折射率,且 $n_p > n_f > n_s > n_c$ 。 d 和 t 分别为薄膜厚度和耦合间隙的尺寸。 θ_i 和 θ_p 分别为激光束对棱镜斜

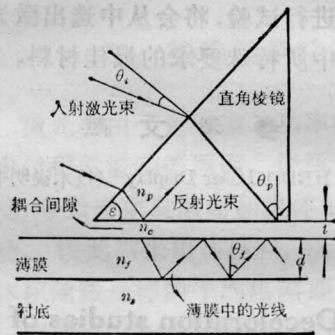


图 1 棱镜—薄膜耦合器

面和棱镜底面的入射角, θ_f 是波导模在薄膜中的光线对薄膜上下界面的入射角, ϵ 是棱镜斜面和棱镜底面的夹角。

在薄膜波导上面没有棱镜时,自由平板波导 TE 模的模方程为^[2,3]

$$hd = m\pi + \phi_s + \phi_c \quad (1)$$

式中, $\phi_s = \tan^{-1}(p/h)$,

$$\phi_c = \tan^{-1}(q/h),$$

$$\beta = n_f k \sin \theta_f,$$

$$h = n_f k \cos \theta_f = (n_f^2 k^2 - \beta^2)^{1/2},$$

收稿日期: 1979 年 6 月 4 日。

$$p = (\beta^2 - n_s^2 k^2)^{1/2}, \quad q = (\beta^2 - n_c^2 k^2)^{1/2},$$

β 是波导模沿薄膜平面的传播常数, $k = 2\pi/\lambda$ 和 λ 分别为入射激光束的真空波数和真空波长; $2\phi_c$ 和 $2\phi_s$ 分别为薄膜中的光线在薄膜上界面和下界面全反射时的相位改变; m 是波导模的模阶数。由式(1)可以看到, 对于确定的 m 就有一个对应的传播常数 β_m 。

当薄膜波导上面放上棱镜时, 薄膜中的光能量密度 W_f 与棱镜中的光能量密度 W_p 之比 W_f/W_p 对传播常数 β 的关系曲线具有与自由波导模式相对应的共振峰^[2,3]。在这个共振曲线中, 峰值传播常数相对自由波导模传播常数的偏移设为 $4\beta_a$, 共振峰的半能量宽度设为 $4\beta_n$ 。由参考文献[2]和[3]可以推得

$$4\beta_a = -\alpha_p \cot 2\phi_p, \quad (2)$$

$$4\beta_n = 2(\alpha_p + \alpha_f) \quad (3)$$

式中, $\alpha_p = (e^{-2\alpha_f} \sin 2\phi_c \sin 2\phi_p) / (d_{eff} \tan \theta_f)$,

$$d_{eff} = d + 1/p + 1/q, \quad \phi_p = \tan^{-1}(q/\sigma),$$

$$\beta = n_p k \sin \theta_p, \quad \sigma = n_p k \cos \theta_p = (n_p^2 k^2 - \beta^2)^{1/2},$$

α_p 是在棱镜—薄膜耦合区域内从薄膜到棱镜的光能量的漏泄引起的波导模衰减系数, α_f 是自由波导模的损耗系数; $2\phi_p$ 是激光束在棱镜底面全反射时的相位改变; d_{eff} 是波导模的有效厚度。

利用棱镜—薄膜耦合器测得的波导模传播常数实际上是在共振曲线峰值附近的传播常数, 并不是自由波导模的传播常数。由式(2)和(3)容易看到: 耦合间隙 t 越大, $4\beta_a$ 和 $4\beta_n$ 就越小, 测得的传播常数越接近自由波导模的传播常数; 反之, 耦合间隙 t 越小, $4\beta_a$ 和 $4\beta_n$ 就越大, 测得的传播常数越偏离自由波导模的传播常数。由于薄膜参数测量是以准确测量波导模的传播常数为基础的, 所以原则上耦合间隙越大越好, 以减少薄膜参数的测量误差。但是, 当耦合间隙太大时, 从棱镜耦合入薄膜中的光能量太少, 以致不易准确地确定峰值传播常数, 反而增加薄膜参数的测量误差。因此, 对于确定的棱镜和薄膜波导应找出较恰当的耦合间隙, 以减少

薄膜参数的测量误差。

二、耦合间隙的测量

将棱镜和薄膜波导擦洗干净后对放起来, 用夹具夹住以使夹具顶针压力对着棱镜的直角棱处。于是, 在棱镜与薄膜波导之间形成楔形耦合间隙(见图2)。

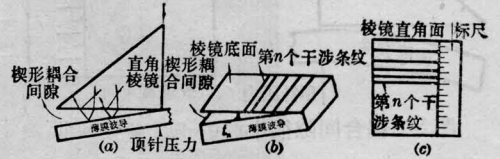


图2 耦合间隙的等厚干涉

如图2(a)所示, 入射到棱镜底面的光, 一部分被反射, 另一部分折射到楔形耦合间隙中被薄膜波导表面反射。这两部分反射光干涉后在接近棱镜底面处形成等厚干涉条纹(见图2(b)), 经棱镜斜面反射可在棱镜直角面观察到(见图2(c))。当光垂直入射到棱镜底面时, 从棱镜底直角棱开始数, 也就是从棱镜直角面顶边开始数第 n 个干涉条纹所对应的耦合间隙为^[4]

$$t_n = (n - 1/2)\lambda_0/2, \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

利用白光时干涉条纹呈彩色, 可取平均光波长 $\lambda_0 \approx 0.5$ 微米。以某一种颜色(例如红色)为准, 数得干涉条纹数目, 可由式(4)求得对应的耦合间隙。

利用棱镜—薄膜耦合器测量波导模的传播常数时, 将激光束聚焦到棱镜底面接近直角棱处, 在我们的测量系统中其束斑大小约为 300 微米。因此, 实际待测的耦合间隙是离直角棱 300 微米处的平均耦合间隙。为了减少其测量误差, 先通过棱镜直角面上的标尺数得对应于离直角棱 1 毫米处耦合间隙的干涉条纹数, 再由此推算出对应于离直角棱 300 微米处耦合间隙的干涉条纹数, 最后由式(4)计算出实际耦合间隙。

如图3所示, 继续加大夹具顶针压力时, 耦合间隙变得很小, 并且薄膜波导表面变弯曲, 因而干涉条纹也将变弯曲。当离直角棱

1毫米处的耦合间隙不到半个波长($\lambda_0/2$)时,耦合间隙可表示为^[4]

$$t = (\hbar/a) (\lambda_0/2) \quad (5)$$

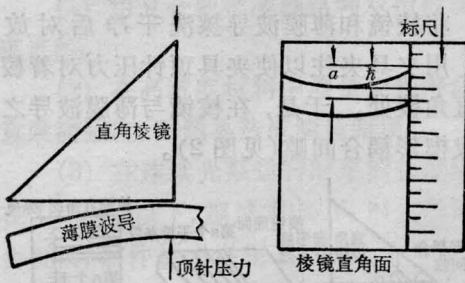


图3 耦合间隙很小时的干涉条纹弯曲

式中, a 是相邻两个干涉条纹间距, h 是干涉条纹弯曲程度。类似地, 先通过棱镜直角面上的标尺测得对应于离直角棱1毫米处耦合间隙的 h/a , 再由此推算出对应于离直角棱300微米处耦合间隙的 h/a , 最后由式(5)求得实际耦合间隙。

三、薄膜参数测量及其误差

待测的玻璃波导样品是在 K_8 玻璃衬底 ($n_s = 1.5137$) 上溅射一层 BaK_7 玻璃薄膜制成的, 它具有三个 TE 模。直角棱镜是由 ZF_6 玻璃制成的, 其结构参数为 $n_p = 1.7513$ 和 $\varepsilon = 59^\circ 52' 30''$ 。利用这个棱镜将 He-Ne 激

光束 ($\lambda = 6328\text{\AA}$) 耦合到玻璃波导中, 观察到在波导中光束传播时, 用 $20''$ 精度的测角仪测量同步入射角 θ_i , 并由如下关系式^[4]

$$\bar{\beta}_m/k = \sin \theta_i \cos \varepsilon + (n_p^2 - \sin^2 \theta_i)^{1/2} \sin \varepsilon$$

求得波导模的传播常数测量值 $\bar{\beta}_m$ 。

为了研究耦合间隙对薄膜参数测量误差的影响, 先用上一节所述的等厚干涉法测量了四个不同耦合间隙: $t = \lambda_0/2, \lambda_0/3, \lambda_0/4, \lambda_0/8$ 。在这些不同耦合间隙下, 测量了玻璃波导 TE 模的传播常数, 并列入表 1。对于确定的耦合间隙, 用参考文献[1]所述的最小二乘法, 在模方程(1)中使传播常数的理论值 β_m 拟合于传播常数测量值 $\bar{\beta}_m$, 有关的拟合参量就是待测的薄膜参数: 玻璃波导的薄膜折射率 n_f 和薄膜厚度 d 。就这样, 对于每一耦合间隙, 均利用电子计算机计算出薄膜折射率、薄膜厚度、与此相关的传播常数理论值及其相对传播常数测量值的均方差, 并把这些数据也列入表 1。

为了分析表 1 所列的各种参数随耦合间隙的变化趋向, 把表 1 中的薄膜折射率、薄膜厚度和传播常数理论值以及耦合间隙代入式(2)和(3), 计算出对应于每一耦合间隙的传播常数偏移 $\Delta\beta_a$ 和半能量宽度 $\Delta\beta_h$, 并列入

表 1

耦合间隙 t	模阶数 m	测量值 $\bar{\beta}_m/k$	理论值 β_m/k	偏差 $(\bar{\beta}_m - \beta_m)/k$	均方差 $\delta \left(\frac{\bar{\beta}_m - \beta_m}{k} \right)$	薄膜折射率 n_f	薄膜厚度 d (微米)
$\frac{\lambda_0}{2}$	0	1.55309	1.55327	-0.00018	3.4×10^{-4}	1.55714 ± 0.00034	2.521 ± 0.050
	1	1.54161	1.54178	-0.00017			
	2	1.52381	1.52340	+0.00041			
$\frac{\lambda_0}{3}$	0	1.55314	1.55321	-0.00007	0.8×10^{-4}	1.55699 ± 0.00008	2.552 ± 0.019
	1	1.54190	1.54197	-0.00007			
	2	1.52399	1.52393	+0.00009			
$\frac{\lambda_0}{4}$	0	1.55316	1.55325	-0.00006	1.6×10^{-4}	1.55696 ± 0.00017	2.580 ± 0.026
	1	1.54213	1.54222	-0.00009			
	2	1.52468	1.52448	+0.00020			
$\frac{\lambda_0}{8}$	0	1.55352	1.55328	+0.00024	2.8×10^{-4}	1.55696 ± 0.00029	2.676 ± 0.055
	1	1.54273	1.54256	+0.00017			
	2	1.52489	1.52520	-0.00031			

表 2

耦合间隙 t		$\lambda_0/2$		$\lambda_0/3$		$\lambda_0/4$		$\lambda_0/8$	
$\Delta\beta_a$ 和 $\Delta\beta_h$		$\Delta\beta_a/k$	$\Delta\beta_h/k$	$\Delta\beta_a/k$	$\Delta\beta_h/k$	$\Delta\beta_a/k$	$\Delta\beta_h/k$	$\Delta\beta_a/k$	$\Delta\beta_h/k$
模阶数 m	0	0.0005	0.0026	0.0005	0.0026	0.0005	0.0026	0.0006	0.0030
	1	0.0014	0.0080	0.0017	0.0096	0.0018	0.0102	0.0021	0.0118
	2	0.0019	0.0130	0.0023	0.0158	0.0025	0.0178	0.0030	0.0202

表 2。在计算半能量宽度时，忽略了自由波导损耗系数 α_i 的贡献。这是因为玻璃波导样品的传播损耗低于 4 分贝/厘米，它对于 $\Delta\beta_h/k$ 的贡献小于 0.00005。

由表 2 看到，对于确定的波导模，传播常数的偏移 $\Delta\beta_a$ 随耦合间隙的减少而增加，基模 ($m=0$) 的 $\Delta\beta_a$ 随耦合间隙的减少而不明显增加，但是高阶模的 $\Delta\beta_a$ 随耦合间隙的减少而明显增加。这一点与表 1 中的传播常数测量值 $\bar{\beta}_m$ 和传播常数的理论值 β_m 随耦合间隙的减少而增加的趋势相符合。

由表 2 还看到， $\Delta\beta_a$ 和 $\Delta\beta_h$ 都是随耦合间隙的减少而增加的。这一点导致表 1 中的传播常数的均方差、薄膜折射率和薄膜厚度的测量误差随耦合间隙从 $\lambda_0/3$ 开始减少而增加。但是，表 1 中的这些均方差和测量误差在耦合间隙为 $\lambda_0/2$ 时变大，这是从棱镜耦合入波导中的光能量太少以致不易准确地测量峰值传播常数所致。

此外，表 1 中的薄膜折射率 n_f 在其测量误差范围内随耦合间隙的减少几乎没有变化。但是，薄膜厚度 d 随耦合间隙的减少而明显增加，甚至其变化超出了测量误差范围。这是因为在耦合间隙太小时传播常数的测量值过分偏离自由波导模的传播常数。因此，薄膜厚度应取耦合间隙较大时的测量值。

综上所述，对于我们的玻璃波导样品和玻璃棱镜，薄膜参数测量误差较小的耦合间隙为 $\lambda_0/3$ 。在这个耦合间隙下，薄膜折射率的测量误差小于万分之一，薄膜厚度测量误差小于百分之一。

参 考 文 献

- [1] R. Ulrich, R. Torge; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, 2901.
- [2] P. K. Tien, R. Ulrich; *J. Opt. Soc. Amer.*, 1970, **60**, 1325.
- [3] R. Ulrich; *J. Opt. Soc. Amer.*, 1970, **60**, 1337.
- [4] 吕茂钰编, 《光学元件制造——冷加工部分》, 增订本, 机械工业出版社, 1977 年版, 79~83.

Effect of coupling gap for prism-film couplers on the errors of film parameters

Li Yushan Jin Feng

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

The coupling gap of prism-film couplers has been measured by iso-thickness interference. The mode propagation constants of thin-film waveguide, refractive index and thickness of the film have been measured at different coupling gaps. Effect of the coupling gap on the measurement errors of film parameters has been analyzed by Tien and Ulrich's theory of prism-film coupler.