

# 高反射率的双光束单检测通道测量法

高启孝

(海军工程学院)

**提要:** 介绍一种能同时克服光源波动及探测器系统非线性对测量精度影响的高反(透)射率测量方法, 在  $6328 \text{ \AA}$  及  $1.15 \mu\text{m}$  波长处已分别获得优于  $\pm 1 \times 10^{-4}$  与  $\pm 5 \times 10^{-4}$  的重复测量精度。

## A measurement method for high reflectivity with two beams and a single detecting channel

Gao Qixiao

(Naval Engineering Institute)

**Abstract:** A new method for measuring high reflectivity and transmissivity is given, with which the effect of both fluctuation of light source and nonlinearity of the detecting system on the accuracy of measurement can be cancelled out. The repeatability is better than  $\pm 1 \times 10^{-4}$  at  $6328 \text{ \AA}$  and  $\pm 5 \times 10^{-4}$  at  $1.15 \mu\text{m}$  respectively.

### 一、引言

随着激光技术的广泛应用, 对激光反射镜的质量要求越来越高。为了不断提高反射镜的镀制质量, 改进镀膜工艺以及正确地选用腔反射镜, 都需对其反射率进行精确的测量。

目前已有许多高精度的反射率测量仪器, 按其测量原理大致可分为两大类。

一类是设法稳定测量用光源的强度, 而利用同一探测系统分别测得试件镜加入前后光强的变化来求得其反射率。这种方案要求

测量用光源高度稳定, 同时还要求探测系统具有良好的线性。它测得的是两点或两点以上的平均反射率, 且一般不适合测量小曲率半径的试件。利用这种原理制成的测量仪器, 其测量精度可达  $\pm 10^{-3} \sim \pm 10^{-4}$ 。

另一类采用所谓“差动测量法”。它将未经稳定的光源分成两束后分别由两个探测系统接收, 在其中一束光路中置入被测试件镜。测得其置入前后的两束光的光强比, 即可求得试件镜的反射率。这种方法虽然无需特别稳定光源, 但要求探测系统具有非常好的线性, 否则测量中将产生很大的误差。

收稿日期: 1983年11月4日。

制作高稳定的光源并非一件容易的事情,挑选线性优良的探测器及保证整个探测系统的高度线性也并非总能办到,尤其是对红外波段响应良好的一些探测器,其线性度一般都不高。下面介绍的双光束单检测通道测量法可以克服上述困难。

## 二、装 置

图 1 是我们设计的一种双光束单检测系统测量装置的工作原理图。图中  $W$  为一表面经仔细加工并带有一定楔角的标准透红外石英玻璃片。它装在附有精确读数装置的旋转机构上,其反射损耗的大小随转角变化,利用菲涅耳公式,可以准确地计算出其透射率与光束 ( $I$ ) 入射角的关系。 $L_2$  为一带布儒斯特窗的 He-Ne 激光器,供测量时观察调整光路用,同时也是测量  $6328 \text{ \AA}$  处反射率的光源。 $L_1$  为布儒斯特窗输出  $1.15 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器(或其它要测波长的激光光源)。分光镜  $M_0$  将光源发出的光分为强度大致相等的两束光 ( $I$ ) 和 ( $II$ )。旋转调制器  $C$  将它们调制成交替通断的两列方波。两束光最后以相同的入射角近似垂直地落在探测器  $D$  的同一光敏区。适当调节  $F_0$ 、 $F_1$  及  $F_2$ , 可使两光束在探测器  $D$  上的面积也相等。探测器输出的信号经  $A_1$ 、 $A_2$  进行交流放大后再

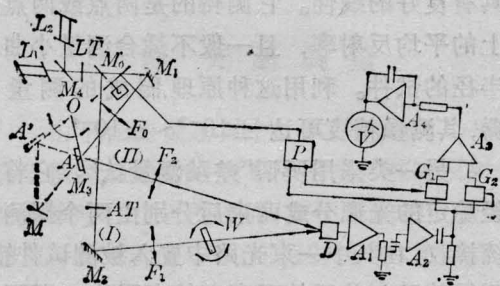


图 1

$M$ —试件镜;  $M_0$ —分光镜;  $M_{1-4}$ —反射镜;  
 $F_{0-2}$ —透镜;  $LT$ —滤光片;  $AT$ —衰减片;  
 $G_1$ 、 $G_2$ —电子开关;  $I$ —开关脉冲发生电路;  
 $A_{1-4}$ —线性放大器;  $D$ —光电探头;  $C$ —调制器

分别经电子开关  $G_1$ 、 $G_2$  输入差动放大器  $A_3$  的正、反相输入端,电子开关  $G_1$ 、 $G_2$  的交替等间隔通断由置于调制器  $C$  中的光电装置发出的同步脉冲经逻辑组合电路处理后来控制。差动放大器  $A_3$  的输出再由积分器  $A_4$  积分后用电压表  $V$  显示。如果落在探测器  $D$  上的两束光强度相同 ( $i_1=i_2$ ), 则积分器  $A_4$  的输出保持为零; 否则, 电压表的指示会逐渐加大, 此时可转动石英玻璃片  $W$  使  $i_1=i_2$ , 让电压表指示保持不变。

$M_3$  为一均匀性良好的反射镜, 它可以绕  $O$  轴转动。当  $M_3$  处于图示  $OA$  位置时, 光束 ( $II$ ) 未经被测试件  $M$ , 而当  $M_3$  处于图示  $OA'$  位置时, 光束 ( $II$ ) 被试件镜  $M$  反射后再经  $M_3$  反射到探测器  $D$  上。调整光路时应使  $OA=OA'$ ,  $\angle M_1AD=\angle MA'D$ 。

## 三、测量原理

下面我们简单地讨论一下本方法的测量原理。

设探测系统(包括探测器  $D$  及检测线路)的响应曲线如图 2 所示。图中,  $i$  为到达探测器  $D$  表面的光强,  $S$  为探测器系统的输出响应。当系统的输出响应曲线存在一定的非线性时, 若光强  $i$  在  $i_1$  附近变化, 其输出响应可表示为:

$$S = \beta i [1 + a_1(1 - i/i_1) + a_2(1 - i/i_1)^2 + \dots] \quad (1)$$

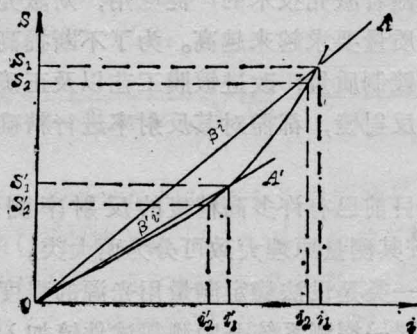


图 2

式中  $\beta$  为直线  $OA$  的斜率,  $a_1, a_2, \dots$  为响应曲线在  $i_1$  处的一次、二次……非线性修正系数。对于一般探测系统而言, 均有:

$$1 \gg |a_1| \gg |a_2| \gg \dots$$

同理, 若光强  $i$  在  $i_1$  附近变化, 其输出响应可表示为:

$$S' = \beta' i [1 + a'_1(1 - i/i_1) + a'_2(1 - i/i_1)^2 + \dots] \quad (2)$$

式中  $\beta'$  为直线  $OA'$  的斜率,  $a'_1, a'_2, \dots$  为响应曲线在  $i'_1$  处的一次、二次……非线性修正系数, 且一般均有:

$$1 \gg |a'_1| \gg |a'_2| \gg \dots$$

当光强  $i$  的变化范围不太大时,  $a_n$  和  $a'_n$  的数量级相同且相近。

设分光镜  $M_0$  的分光比为  $i_1:i_{11} = m_1:m_2$ , 透镜  $F_0, F_1$  和  $F_2$  的透过率分别为  $T_{f_0}, T_{f_1}$  和  $T_{f_2}$ , 反射镜  $M_1, M_2$  和  $M_3$  的反射率为  $R_1, R_2$  和  $R_3$ , 衰减片  $AT$  的透过率为  $t$ 。

测量反射率时试件  $M$  加入前转动石英玻璃片  $W$  使积分器  $A_4$  的输出保持为零。设这时光源的强度为  $i_0$ , 则到达探测器  $D$  表面的两束光光强分别为  $i_1$  和  $i_2$ , 其中:

$$i_1 = m_1 t R_2 T_{f_1} T_1 i_0 \quad (3)$$

$$i_2 = m_2 R_1 T_{f_0} R_3 T_{f_2} i_0 \quad (4)$$

式中  $T_1$  为平衡时  $W$  的透射率。这时探测系统对两束光的输出响应分别为  $S_1$  和  $S_2$ , 且应  $S_1 = S_2$ 。但若考虑到由于差动放大器  $A_3$  对正相反输入的不严格对称性, 实际在  $A_4$  输出为零时  $S_1$  不严格等于  $S_2$ , 从而导致  $i_1$  不严格等于  $i_2$ , 故一般有:

$$S_1 = \beta m_1 t R_2 T_{f_1} T_1 i_0$$

$$S_2 = \beta m_2 R_1 T_{f_0} R_3 T_{f_2} i_0 [1 + a_1(1 - i_2/i_1) + a_2(1 - i_2/i_1)^2 + \dots]$$

$$S_1 = (1 + \varepsilon) S_2 \quad (5)$$

式中  $\varepsilon$  为一修正量, 它的值一般都很小(我们利用未经挑选的 F008 作为  $A_3$ , 经测量表明  $|\varepsilon| < 10^{-3}$ )。

加入试件  $M$  后, 转动石英玻璃  $W$  使积

分器  $A_4$  的输出再次保持为零。设此次平衡时光源的强度为  $i'_0$ , 到达探测器  $D$  表面的两束光光强分别为  $i'_1$  和  $i'_2$ , 则:

$$i'_1 = m_1 t R_2 T_{f_1} T_2 i'_0 \quad (6)$$

$$i'_2 = m_2 R_1 T_{f_0} R_3 T_{f_2} i'_0 \quad (7)$$

式中  $T_2$  为  $W$  的透射率,  $R$  为试件的反射率。这时探测系统对两束光的输出响应为  $S'_1$  和  $S'_2$ , 同理有:

$$S'_1 = \beta' m_1 t R_2 T_{f_1} T_2 i'_0$$

$$S'_2 = \beta' m_2 R_1 T_{f_0} R_3 T_{f_2} i'_0 [1 + a'_1(1 - i'_2/i'_1) + a'_2(1 - i'_2/i'_1)^2 + \dots]$$

$$S'_1 = (1 + \varepsilon) S'_2 \quad (8)$$

由(5)、(8)两式可得:

$$R = \frac{T_2}{T_1} \times \frac{[1 + a_1(1 - i_2/i_1) + a_2(1 - i_2/i_1)^2 + \dots]}{[1 + a'_1(1 - i'_2/i'_1) + a'_2(1 - i'_2/i'_1)^2 + \dots]} \quad (9)$$

若  $\varepsilon = 0$ , 则  $i_1 = i_2, i'_1 = i'_2$ , (9) 简化为:

$$R = \frac{T_2}{T_1} \quad (10)$$

若  $\varepsilon \neq 0$ , 设此时:

$$i_2 = i_1 + \sigma, i'_2 = i'_1 + \sigma'$$

将它们代入(9)式中整理可得:

$$R = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{[1 - a_1 \frac{\sigma}{i_1} + a_2 \left(\frac{\sigma}{i_1}\right)^2 - \dots]}{[1 - a'_1 \frac{\sigma'}{i'_1} + a'_2 \left(\frac{\sigma'}{i'_1}\right)^2 - \dots]}$$

由于  $1 \gg |a_1| \gg |a_2| \dots, 1 \gg |a'_1| \gg |a'_2| \gg \dots,$

$\left|\frac{\sigma}{i_1}\right| \approx |\varepsilon| \ll 1, \left|\frac{\sigma'}{i'_1}\right| \approx |\varepsilon| \ll 1$ , 忽略二阶以上的无穷小量, 上式变为:

$$R = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{1 - a_1 \frac{\sigma}{i_1}}{1 - a'_1 \frac{\sigma'}{i'_1}} \quad (11)$$

对于一般检测系统而言, 放大线路的非线性很容易保证在 1 以下, 探测器本身的非线性一般也能保证在 1~2% 以内(我们实验中使用的国产 Ge 二极管出厂非线性度保证在 2% 以内)。因此公式中的  $\left|a_1 \frac{\sigma}{i_1}\right| < 10^{-2}$

$\times 2 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-5} \ll 1$ ,  $\left| a_1' \frac{\sigma'}{i_1'} \right| < |10^{-3} \times 2 \times 10^{-3}| = 2 \times 10^{-5} \ll 1$ , 于是 (11) 式可相当准确地近似为:

$$R = \frac{T_2}{T_1} \left( 1 + a_1' \frac{\sigma'}{i_1'} - a_1 \frac{\sigma}{i_1} - a_1 a_1' \frac{\sigma}{i_1} \cdot \frac{\sigma'}{i_1'} \right) \quad (12)$$

在实际测量时利用 (10) 式来计算试件的反射率, 这时可利用 (12) 式估计测量的相对误差:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\Delta R}{R} \right| &= \left| a_1' \frac{\sigma'}{i_1'} - a_1 \frac{\sigma}{i_1} - a_1 a_1' \frac{\sigma}{i_1} \cdot \frac{\sigma'}{i_1'} \right| \\ &\leq \left| a_1' \frac{\sigma'}{i_1'} \right| + \left| a_1 \frac{\sigma}{i_1} \right| \\ &\quad + \left| a_1 a_1' \frac{\sigma}{i_1} \cdot \frac{\sigma'}{i_1'} \right| \\ &\approx 4 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

如果对探测器略加挑选并将测量线路仔细调整, 利用 (10) 式来计算试件的反射率带来的误差完全可以忽略。从两次平衡时光束 (I) 对石英玻璃片  $W$  的入射角, 可以利用预先制出的表格查出其透射率  $T_1$ 、 $T_2$  的准确值, 也可以利用固定的程序直接计算出  $R$ 。

测量增透膜的透射率时, 试件置于光路 (II) 中, 测试步骤及计算公式的推导过程完全相同, 但不用转动反射镜  $M_3$ , 此时试件的透射率为:

$$T = \frac{T_2}{T_1} \quad (13)$$

#### 四、光路调整

由于在测量过程中, 试件光路 (II) 在两次平衡时经过的路线不尽相同, 被测反射镜的曲率半径也可能不同, 如不采取相应措施, 加试件前后光束 (II) 在反射镜  $M_3$  上及探测器  $D$  上光斑的面积会发生很大的变化, 这将引入较大的测量误差。为此, 应用透镜  $F_0$  将光束 (II) 聚焦于试件  $M$  表面并形成一较小的腰斑  $\omega_0$  (图 3)。设经曲率半径为  $\rho$  的试件  $M$  反射后光束 (II) 成象于  $l'$  处, 象腰斑半径

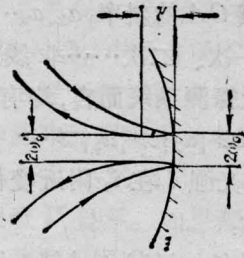


图 3

为  $\omega_0'$ 。若  $l' \approx 0$  且  $\omega_0' \approx \omega_0$ , 则可保证光束 (II) 在试件  $M$  加入前后于  $M_3$  上的光斑面积几乎不变。由高斯光束的传播规律可知:

$$\left. \begin{aligned} l' &= \frac{\rho}{2} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{2\pi\omega_0^2}{\lambda\rho} \right)^2} \right] \\ \omega_0' &= \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi\omega_0^2}{\lambda\rho} \right)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

只要使  $\frac{2\pi\omega_0^2}{\lambda\rho} \ll 1$ , 就可使  $l' \approx 0$ ,  $\omega_0' \approx \omega_0$ 。在我们的装置中,  $\rho = 1000$  mm,  $\omega_0 = 0.095$  mm,  $\lambda = 0.00115$  mm, 求得  $l' = 1.2$  mm,  $\omega_0' = 0.9988\omega_0$ 。

由于高斯光束经透镜聚焦后在焦平面上光斑的大小仅和入射光束的波长、腰斑尺寸及透镜的焦距有关<sup>[4]</sup>, 故可使探测器  $D$  置于透镜  $F_2$  的焦平面上, 这样就能保证在试件加入前后光束 (II) 在  $D$  上的大小不变。

石英玻璃片  $W$  是一重要部件, 为了克服表面干涉效应在  $W$  转动过程中对其透射率  $T$  的影响, 应使玻璃片两面有一夹角  $\alpha$ 。经过计算可以证明 (推导略), 为使干涉效应的影响小于  $\eta$ , 应有:

$$\alpha \geq \frac{\lambda}{2\sqrt{2} \cdot n \cdot \pi \omega_0} \sqrt{\ln \left[ \frac{2r_1 r_2 (1 - r_1^2)}{\eta} \right]} \quad (15)$$

式中  $n$  为玻璃的折射率,  $\lambda$  为光波波长,  $\omega_0$  为光束 (I) 束腰半径,  $r_1$ 、 $r_2$  分别为前后表面的幅值反射率。我们所用石英玻璃  $n = 1.4488$ , 光束 (I) 的束腰半径为  $\omega_0 = 0.37$  mm,  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ , 设  $r_1 = r_2 = 0.2$ , 当要求  $\eta = 10^{-5}$

时,则要求:

$$\alpha > 4'$$

在  $W$  旋转的过程中,由于光束( $I$ )在  $W$  表面入射角的变化,它到达探测器  $D$  表面的位置也会变化,如果探测器  $D$  表面灵敏度不均匀,将会产生测量误差。计算表明,光束( $I$ )在探测器表面的位置与  $W$  的折射率  $n$ 、夹角  $\alpha$ 、厚度  $d$  及入射角  $\varphi$  和探测器  $D$  至  $W$  的距离  $S$  有关。利用计算机在所使用的入射范围内对位置进行计算表明,对于选定的  $n$  值,适当选择  $\alpha$ 、 $d$  和  $S$  值,可做到光束( $I$ )在  $D$  上的位置变化极微。我们实验装置的参数选择如下,  $n=1.4488$ ,  $\alpha=33'$ ,  $d=2.62$  mm,  $S=175$  mm,  $\varphi$  角变化范围  $15^\circ \sim 35^\circ$ 。这时,光束( $I$ )在  $D$  上的位置变化不大于  $0.05$  mm,而我们使用的 Ge 二极管探测器在光敏面中心当光斑移动  $0.1$  mm 时,输出信号的变化小于  $10^{-4}$ 。这样位置变化的影响就可不必考虑。入射角  $\varphi$  在上述范围变化时,可测的反射率范围为:  $1 \sim 0.96$ 。

## 五、实验结果

利用上面介绍的装置,我们采用硅光电池和 Ge 二极管作探测器分别测量了反射镜在  $6328 \text{ \AA}$  和  $1.15 \mu\text{m}$  波长处的反射率。对多片试件的测试结果表明:在  $6328 \text{ \AA}$  处反射率测量的重复精度可优于  $1 \times 10^{-4}$ ,在  $1.15 \mu\text{m}$  处反射率测量的重复精度可优于  $5 \times 10^{-4}$ 。下表为我们测得的两组典型数据。

波长		6328 Å		1.15 μm	
探测器		硅光电池		Ge 二极管	
试件镜		9层 SiO <sub>2</sub> +TiO <sub>2</sub> +ZrO <sub>2</sub>		14层 MgF <sub>2</sub> +ZnS	
测量点位移		0mm (中心点)	0.2mm	0mm (中心点)	0.2mm
测量结果 $R_s$	第一次	0.97363	0.97298	0.98251	0.98274
	第二次	0.97359	0.97301	0.98260	0.98299
	第三次	0.97357	0.97301	0.98250	0.98303
平均值 $\bar{R}$		0.97360	0.97300	0.98254	0.98292
重复精度 $\Delta R_{\max}$		0.00006	0.00003	0.0001	0.00029
说明		测试时试件入射角为 $8^\circ$ ; 试件在 $6328 \text{ \AA}$ 处利用 DF 透反仪测得的值 与此法测得的值相差一般 $< \pm 5 \times 10^{-4}$			

根据前面的分析及初步实验结果表明,利用这种方法测量时有如下主要优点:

1. 由于探测系统仅用来检测两束光的相等条件,故对其线性度要求较低。
2. 测量中采用了参考光路,能有效地消除光强变化对测量结果的影响。
3. 两光路由同一探测器测试,不用进行匹配调试。
4. 由于采用多级交流放大后再进行积分检测,不但放大倍数高,有利于提高检测灵敏度与极限精度,而且能消除杂散光对测量的影响,故测量时不用进行光屏蔽。

作者对清华大学冯铁荪、李克兰两位先生的指导和帮助表示深切的谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 周炳琨等;《激光原理》,国防工业出版社,1980年, p369.