

# 超高反射率的损耗比较测量法研究

蒋 跃

(空军雷达学院物理教研室, 武汉 430010)

**摘 要** 描述了一种用两个激活谐振腔的损耗比较测量超高反射率的有效方法。其基本原理源于菲涅耳公式和布儒斯特定律。测量精度为  $\pm 5.0 \times 10^{-5}$ , 并讨论了测量系统的若干问题。

**关键词** 超高反射率, 损耗, 布儒斯特角。

## 1 引 言

超高反射率的精确测定, 对于进一步提高镀膜工艺, 正确选用腔反射镜、改善激光陀螺的性能等都具有重要意义。现在已有多种高精度反射率测量仪器, 按其测量原理大致可分为光强法、差动法、谐振腔法三大类。其代表产品分别是中国科学院上海光学精密机械研究所的 GFS 高反射率测量仪<sup>[1]</sup>, 光路为 V-W 型, 精度为  $\pm 0.05\%$ ; 国防科大的 DF 透反仪<sup>[2]</sup>, 采用差动原理, 能很好地消除光源起伏, 经长期使用表明, 精度优于  $\pm 0.01\%$ ; Sanders 提出了一种利用激光谐振腔挑选高反射镜的装置<sup>[3]</sup>, 重复精度为  $\pm 0.01\%$ 。随着镀膜工艺的提高, 要求精度更高的测量仪器。本文就是受到 Sanders 的启发, 经分析研究他的装置后, 针对其弊病重新设计, 从原理、测量参数、仪器结构等多方面作了改进, 以期达到超高精度。

## 2 装 置

图 1 为损耗比较测量系统的主要结构示意图(原理图)。

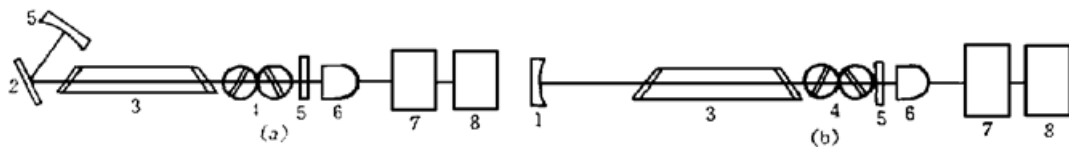


Fig. 1 Diagram of the principle of the reflection measurement arrangement. (a) Curved cavity, (b) Straight cavity

1 and 1': concave mirror; 2: test mirror; 3: He-Ne tube; 4: parallel rotatory plane; 5: output mirror; 6: detector; 7: digital meter; 8: computer

图 1(a) 中 2 为待测镜, 凹镜 1' 和镜 2 固定在同一剪式升降台上, 由它的升降实现折、直腔间的切换。两腔公用元件为 3、4、5、6、7、8, 4 和测角装置相连。用辅助光学元件(未画出)可使谐振腔中的光线被调节在凹镜的中心(偏差  $< 2 \mu\text{m}$ )。

### 3 原 理

如图 1 所示, 本系统采用两个主动腔的损耗比较法测量样品的反射率。当折腔的最佳状态调好后, 记其输出为  $V_1$ , 迅速变为直腔, 调节镜 1 使直腔达到输出最佳, 记其输出为  $V_2$  (以上 4 均位于布儒斯特角)。显然  $V_2 > V_1$ ,  $(V_2 - V_1)$  理论上应等于待测镜 2 反射不完全引起的那部分能量损失。旋转 4, 使  $V_2 = V_1$ , 记旋转角度为  $\Delta\theta$ , 用菲涅耳公式表述出旋转窗片反射损耗与入射角  $\theta$  ( $\theta = \theta_B \pm \Delta\theta$ ,  $\theta_B$  为布儒斯特角) 的关系, 此损耗与图 1(a) 中待测镜 2 的总损耗对应, 包含镜 2 的透射、吸收和散射损耗, 稍作换算即得待测镜 2 的反射率。

由菲得耳公式<sup>[4]</sup>可导出旋转平板玻片上 p 偏振光的反射损耗与入射角的关系(一个界面):

$$L = (n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})^2 / (n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})^2 \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为 p 偏振光对旋转窗界面的入射角;  $n$  为玻片 4 的折射率(石英为 1.457)。考虑到窗片 4 共有四个界面, 经换算可得待测镜 2 的反射率为

$$R = (1 - L)^4 \quad (2)$$

又因凹镜 1' 和 1 反射率实际存在差别, 将(2)式修正为

$$R = [(1 - L_r)(1 - L)]^4 \quad (3)$$

式中,  $L_r$  由  $\theta_0 = \theta_B \pm \Delta\theta_0$  按(1)式算出,  $\Delta\theta_0$  是因  $R_{1'} \neq R_1$  而存在的装置修正角。

若只用单窗, 则

$$R = [(1 - L_r)(1 - L)]^2 \quad (4)$$

## 4 部分系统误差的消除和削弱

### 4.1 两个激活腔的可比性问题

欲使两激光器的输出有好的可比性, 须保证两腔在各方面相同。如两腔长应相等、1' 和 1 相同、待测镜 2 的置入不得改变腔的几何参数、不改变高斯光束的形状及传输空间、保证两激光器具有相同的增益和损耗、放电参数恒定等。因此, 该方法仅适用于平面样品反射率的测量。凹镜 1' 和 1 的反射率不可能严格相同, 兹作如下讨论:

将 1 和 1' 先后置入直腔激光器内比较, 设腔总损耗为  $\gamma$  (双程损耗), 并假定  $R_{1'} > R_1$ , 为使两腔输出相等, 装  $R_1$  时 4 位于布儒斯特角  $\theta_B$ , 换  $R_{1'}$  后 4 就应偏离  $\theta_B$  ( $\theta_0 = \theta_B \pm \Delta\theta_0$ ), 因此

$$1 - \gamma_1 = R_1 R_5 T_i^2 \quad (5)$$

$$1 - \gamma_2 = R_{1'} R_5 T_i^2 (1 - L_r)^8 \quad (6)$$

式中,  $R_1$  和  $R_{1'}$  为镜 1 和 1' 的反射率;  $(1 - L_r)^8$  为 4 的双程透过率;  $L_r$  为 4 的一个界面的反射损耗;  $R_5$  为镜 5 反射率;  $T_i$  为腔内所有组件透过率(含布氏窗、放电气体等)。因  $\gamma_1 = \gamma_2$ , 所以

$$R_1 / R_{1'} = (1 - L_r)^8 = r \quad (7)$$

装上待测镜, 旋转玻片 4, 使直、折腔输出相等, 则有

$$T_i^2 R_5 R_{1'} R^2 = T_i^2 R_5 R_1 (1 - L)^8 \quad (8)$$

所以

$$R = (r)^{1/2} (1 - L)^4 = [(1 - L_r)(1 - L)]^4 \quad (9)$$

若  $R_1 > R_{1'}$ , 则将两镜互换, (3)、(9) 式不变。这样, 因  $R_1 \neq R_{1'}$  而引入的误差被消除。

## 4.2 零点误差

为使激光器输出最佳, 应调节4至布儒斯特角位置(此时4之损耗为零), 这是后续测量的

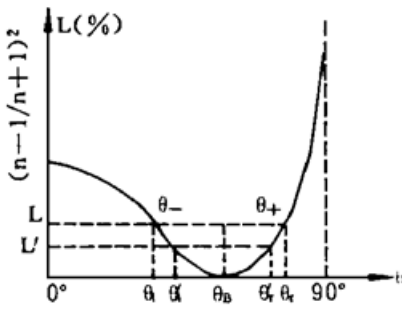


Fig. 2 Reflection losses  $L$  as a function of the incidence angle; effect of imperfectly determined Brewster's angle

的零点, 但  $\theta_B$  的调节总有一个微小范围。当 4 位于  $\theta_B$  时, 两相对旋转玻片应分别与放电管的两布儒斯特窗平行, S 偏振光在四个端面上反射的光在远处墙壁上的投射斑间距应分别等于相应元件的实际间距, 由此可实现  $\theta_B$  的粗调(4 的相对转动可用一组精密齿轮传动, 调节公用手柄, 可保证二板偏转的一致性)。  $\theta_B$  的细调如图 2 所示, 实验中采用了半近调节法(对称读数法), 可获得小于  $0.5'$  的调节误差, 对  $R > 99.9\%$  的试件, 经计算由零点不准引入的反射率测量误差小于  $0.001\%$ , 可略。另外,  $L \sim \theta$  曲线在  $\theta_B$  附近的不对称度可作抛物线近似, 经计算  $\theta_B \pm 2^\circ$  时调节误差为  $5'$ ,  $\theta_B \pm 1^\circ$  时为  $1.4'$ ……。

## 4.3 待测镜前、后表面反射光干涉效应的消除

由理论计算知道, 要求待测镜前、后表面引起的损耗的误差(绝对值)小于  $\epsilon$ , 则所需入射角的大小应满足<sup>[5]</sup>

$$\alpha \geq (nw_0 / \sqrt{2d}) [\ln(2 \sqrt{R_1 R_2 T_1 / \epsilon})]^{1/2} \quad (10)$$

此公式适用条件为高斯腰, 这里仅作估算用。实验中, 待测镜的  $n = 1.52$ , 后表面  $R_2 = [(n - 1)/(n + 1)]^2 = 0.0426$ , 镜面  $R_1 \approx 0.9985$ ,  $T_1 \approx 1 - R_1 = 0.0015$ ,  $d = 3.5 \text{ mm}$ , 取  $\epsilon = 0.001\%$ , 则要求  $\alpha \geq 0.62w_0 \text{ rad.}$  ( $w_0$  的量纲为 mm)。

实验腔长  $l = 795 \text{ mm}$ , 凹镜  $r = 100 \text{ mm}$ , 输出镜  $r' = \infty$ , 基模  $w_0 = \sqrt{\frac{f\lambda}{\pi}}$ <sup>[5]</sup> =  $0.285 \text{ mm}$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), 故要求  $\alpha \geq 10.19^\circ$ , 本文的装置  $\alpha > 38^\circ$ , 能很好满足此条件。

## 4.4 其它误差的削弱

1) 设计两个相对转动的窗片可消除光束横移, 增强谐振腔增益和损耗的稳定性, 用发散角极小的单模调腔光源、准直望远镜、移动屏、透镜和紧贴在镜 1(1') 后的叉丝等调节管 3 与 1(1') 共轴, 使两腔光束均严格处在镜心、镜球心和毛细管轴连线上, 2、4、5 均严格位于竖直面内, 5 处加压电驱动, 用步进电机控制 4 的转、停等尽量实现两腔的重现性调节; 2) 为保证光源的超稳定, 除用常规法外, 主要利用了由大规模集成电路构成的数字电压表具有的电子除法器功能 [ $V = (V_m/V_R) \times 20000$ ], 以及表头自动平均和计算机采数再平均, 将光源起伏削弱至(每轮)  $\sim 6 \times 10^{-3}$ , (每组)  $\sim 1 \times 10^{-3}$  (参见表 1), 使对测 R 的影响降至  $\sim 1 \times 10^{-5}$ ; 3) 所用光学元件由国防科大 208 室提供, 其光度特性和光学常数均分别经 DF-透反仪、微积分散射仪、椭偏仪等测定, 其精度分别为  $T \sim 0.002\%$ , 元件 4 的散射损耗变化  $\sim 1 \times 10^{-6}/\text{deg.}$ , 吸收率  $2.6 \times 10^{-5}/\text{mm}$ , 元件 2、4、5 的平行度  $\sim \lambda/20$ , 均方根粗糙度  $0.6 \text{ nm}$ , 等等。这为实验成功提供了保障。

## 5 测量灵敏度

如图 1(a) 所示, 记输出片 5 的透过率为  $T$ , 双程增益和损耗分别为  $G$ 、 $\gamma$ (除  $T$  以外的总损耗), 则  $V_1$  一般可写成<sup>[6, 7]</sup>

$$V_1 = KT[G/(T + \gamma) - 1] \tag{11}$$

对图 1(b), 当玻片 4 未旋转时, 由于少一待测镜因此有

$$V_2 = V_1 + \Delta V = KT[G/(T + \gamma - \Delta\gamma') - 1] \tag{12}$$

所以 
$$\frac{\Delta V}{V_1} = \frac{G/(T + \gamma)}{[G/(T + \gamma) - 1]} \frac{2(1 - R_{test})}{(T + \gamma - \Delta\gamma')} \tag{13}$$

上式中,  $\Delta\gamma' = 2(1 - R_{test})$  ( $\Delta\gamma'$  为双程损耗变化量)。已知光强法测量灵敏度为

$$\Delta V/V_1 = KI_0(1 - R_{test})/KI_0 = 1 - R_{test} \tag{14}$$

所以, 损耗比较法(本方案)比光强法灵敏度提高倍数  $F$  为:

$$F = \frac{G/(T + \gamma)}{[G/(T + \gamma) - 1]} \frac{2}{(T + \gamma - \Delta\gamma')} \tag{15}$$

一般  $G/(T + \gamma) \approx 5 \sim 10$ ,  $(T + \gamma - \Delta\gamma') \approx 1 \sim 3 \times 10^{-2}$ , 故

$$F \approx 80 \sim 240 \tag{16}$$

若  $T$  更小  $F$  会更大, 这是本设计的一大可取之处和基本出发点。

## 6 结果和分析

### 6.1 测量结果

仅举一例说明, 见表 1(对同一镜片作了六轮测量, 只列出一轮, 结果不变)

Table 1.

$\bar{V}_{1i}$	.17496	.17384	.17196	.17294	.17168
$\bar{V}_{2i}$	.19612	.19596	.19472	.19517	.19296
$\Delta\theta_i$	2°55'	3°	3°5'	3°	2°55'
$R_i$	.99855	.99847	.99839	.99847	.99855
$\bar{V} \pm \delta V_1 / \frac{\delta V_1}{\bar{V}_1}$	0.173076 ± 1.355 × 10 <sup>-3</sup> / 0.78%				
$\bar{V}_2 \pm \delta V_2 / \frac{\delta V_2}{\bar{V}_2}$	0.194986 ± 1.142 × 10 <sup>-3</sup> / 0.59%				
$\left[ \frac{\bar{V}_{2i}}{\bar{V}_{1i}} \right] \pm \left[ \delta \frac{\bar{V}_{2i}}{\bar{V}_{1i}} \right]$	1.126607 ± 4.36881 × 10 <sup>-3</sup>				
$F = \left[ \left[ \frac{\bar{V}_{2i}}{\bar{V}_{1i}} \right] - 1 \right] / (1 - \bar{R})$	83.846				
$R$	$R = \bar{R} \pm \delta R = 0.99849 \pm 5.0 \times 10^{-5}$				

该装置现在对高反片 ( $R > 0.9980$ ) 单次反射率测量偏差值已小于  $2 \times 10^{-4}$ , 重复精度约为  $\pm 5.0 \times 10^{-5}$ 。

### 6.2 误差分析

1) 测角装置引入的误差

$$dR = -4(1 - L) dL = 16 \left[ 1 - \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right]^2 \times \left[ \frac{n^2 (\cos \theta - \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}) (n^2 - 1) \sin \theta}{(n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta})^3 \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \right] d\theta$$

实测  $R$  在 99.14% ~ 99.86% 范围内, 相应的  $2^\circ 50' < \Delta\theta < 8^\circ$ , 测角装置分辨率  $d\theta = \pm 15''$ ,

所以  $dR \approx 1.25 \times 10^{-5}$ 。

2) 旋转玻片在处于和偏离布儒斯特角位置时的吸收、散射损耗之差估算为  $2.0 \times 10^{-5}$ ，原理中已被忽略。此外，还有两激光器的非严格重现性调节、污染等误差，靠提高技能、改善装置来降低。腔的调谐好坏对结果影响极大，操作经验是都调至最大输出，便可实现两腔的匹配，但理论上的严格证明还待进一步研究。

3) 总误差主要源于非重现性调节。另外，外腔未抽真空，其空气段和尘埃也将影响光源稳定。

**结 语** 本装置现在的测量精度( $5 \times 10^{-5}$ ) 还未达到预期目标( $10^{-6}$ 量级)，主要受条件和技能限制。国外同类仪器耗资上百万，而本方案结构简单、花费省。除此，还具有以下优点。

1) 待测镜测量角度可调范围大，宜作激光陀螺腔镜反射率测量；2) 两激光器的输出用同一探测器接收，无需匹配调试；3) 探测系统仅用于比较两激光器的损耗是否相等，对其线性度要求降低；4) 两激光器的绝大部分元件重合，测量过程中毋须调节公用元件和移动探测器，保证测量值有好的重复性；5) 待测元件置于腔内，损耗对激光输出的变化有放大作用，当输出镜反射率适中时，待测镜的反射率改变 0.01%，激光输出功率可变化 1.0%，即待测镜反射率的微小差异被转化成明显的功率变化，这是该方法能提高测量精度的重要原因。

衷心感谢高伯龙教授，曾淳主任的悉心指教。

### 参 考 文 献

- [1] 苏锴隆, 丁安华, 刘海清, GFS 高反射率测量仪. 光学学报, 1982, 2(1): 57~ 66
- [2] 高伯龙, DF 透反仪. 工学学报, 1978, 8(3): 1~ 24
- [3] V. Sanders, High-precision reflectivity measurement technique for low-loss laser mirrors. *Appl. Opt.*, 1977, 16(1): 19~ 20
- [4] M. 玻恩, E. 沃耳夫, 光学原理, 北京: 科学出版社, 1985: 62
- [5] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等, 激光原理. 北京, 国防工业出版社, 1984: 98~ 99
- [6] Murray Sargent III, Marlan O. Scully, Willis E. Lamb, Jr, *Lasers Physics*, London, Amsterdam, Don Mills, Sydney, Tokyo, Addisonweley Publishing Company, 1974: 162~ 170
- [7] P. W. Smith, Output power for 6328 Å He-Ne gas lasers. *IEEE J. Quant. Electron*, 1966, QE-2(1): 62~ 68

## Measurement of Ultra-High Reflectivity by Loss Comparason

Jaing Yue

(Air Force Radar Academy, Wuhan 430010)

(Received 23 July 1996; revised 24 March 1997)

**Abstract** An effective methods for measuring ultra-high reflectivity by comparing the loss between two active optical resonators is presented. The basic principle of this measurement comes from the Fresnel formula and Brewster's law. The measuring accuracy is  $\pm 5.0 \times 10^{-5}$  and the problems of the measuring system are discussed.

**Key words** ultra-high reflectivity, loss, Brewster's angle.