

# 激光反射镜薄膜散射的测量

苏锴隆 钱伟珍 罗妙洪 何朝玲

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文介绍在可见光区内对激光反射镜进行光谱散射测量的方法和测量的一些结果。对测量误差进行了分析,并采取了一些相应措施,估计测量的相对误差约为 $\pm 15\%$ ,即对 $1 \times 10^{-3}$ 量级的散射率,测量的绝对偏差约为 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ 。测量结果与理论计算和实际情形基本吻合。结果表明,目前21层 $\lambda/4$   $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  硬膜激光反射镜的散射率一般在 $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ 范围,起伏较大,反射率的高低主要受散射损耗限制。

## 一、引 言

激光反射镜的散射率一般在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 量级,对这样低的散射率现在比较流行的一种测量方法是利用激光光源比较强这一特点来进行测量<sup>[1~3]</sup>。我们感兴趣的是光谱散射的测量,因为这样可以对各类薄膜的散射特性进行更为广泛的研究。

本文采用“GFS 高反射率测量仪”<sup>[4]</sup>的一套光电接收显示系统,灵敏度为 $2 \times 10^{-5}$ ,基本上避免了光源强度不足的缺点。其次,散射测量涉及到散射的标准问题。为了使测量简单,采用经过北京计量院测定的  $\text{MgO}$  白板作为标准样品进行相对测量,并对测量误差作了分析和改进,估计测量的相对误差约为 $\pm 15\%$ ,即对 $1 \times 10^{-3}$ 的散射率,测量的绝对偏差约为 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ 。这种精度,基本上满足了目前激光反射镜低散射率的测量要求。

我们现在建立的散射测量装置,是在可见光区对样品的反射散射用积分球进行测量,其可取之处是,这种方法测量的结果不但已经包括散射的一些主要特征,如积分散射率和表面的均方根粗糙度等,而且还可以与“GFS 高反射率测量仪”测量的  $R$ 、 $T$  值进行比较,在一定程度上可以定性的估计薄膜的吸收损耗,这对于改进镀膜的工艺技术有相当的现实意义。

## 二、散射率的测量

### 1. 测量装置

如图1所示,  $W$  是 12 V, 100 W 溴钨灯,  $P_1 \sim P_5$  是光阑,  $L_1 \sim L_3$  是透镜。从出口狭缝  $E_2$  出射的单色光经透镜  $L_3$  聚焦进入积分球  $T$  被样品  $C$  反射后进入反射吸收筒  $A_1$  被吸收,从  $C$  透镜的光束被透射吸收筒  $A_2$  吸收。样品  $C$  的表面安排在积分球的球壁上,光束入射角为  $11^\circ 15'$ ,在样品上的光斑约  $1 \times 3 \text{ mm}$ 。样品的反射散射光被积分球多次漫反射后

收稿日期: 1982年4月14日

由倍增管  $P$  接收, 并经“电流-频率变换器”用数字显示。倍增管的光阴极安排在离球壁 20 mm 处, 避免了样品散射光的直接照射。积分球直径 280 mm, 内壁喷 MgO, 积分球的入口直径为 27 mm。透射吸收筒  $A_2$  的入口, 以及倍增管  $P$  的窗口均为直径 40 mm。反射吸收筒  $A_1$  的入口为直径 10 mm。测量装置的这种安排, 使测量到的纯粹是样品的反射散射。

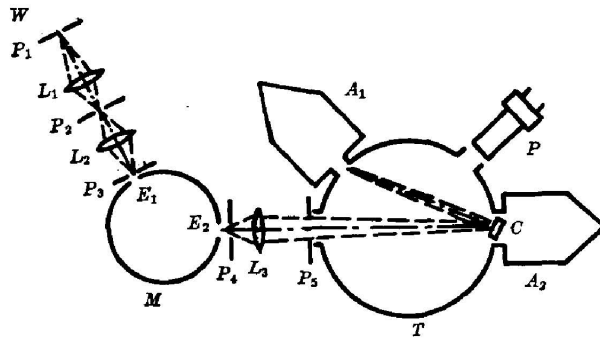


图 1 散射测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement apparatus of scattering

标准样品的读数  $G_1$ 。最后, 换入样品  $C$ , 读取样品读数  $G_2$ , 于是样品的散射率  $S$  为:  $S = (G_2 - G_0) \times R_0 / (G_1 - G_0)$ 。  $R_0$  为标准样品的漫反射率。

### 3. 测量误差

(1) 标准样品 用作标准样品的 MgO 白板经北京计量院测定, 精度为  $\pm 0.008$ 。此样品表面漫反射率不均匀性为  $\pm 0.009$ 。为了测量的方便, 再将此标准样品传递到透射吸收筒  $A_2$  前面的球缺上, 传递误差(包括球缺不均匀性)为  $\pm 0.003$ 。因此标准样品本身的误差为  $\pm 0.020$ 。

(2) 本底杂光 本底杂光表现在光束穿过积分球而进入透射吸收筒  $A_2$  对倍增管的输出信号不为零。吸收筒经试验比较, 其吸收效果是好的。为了分析本底杂光的来源, 做了狭缝宽度对本底杂光影响的实验, 结果见图 2, 表明狭缝衍射的影响不明显。可以认为, 这种本底杂光主要来自光源的背景和光学元件消除杂光不完全所致。采取适当的光阑后, 这种杂光得到了改善。因为它基本上是一个恒量, 因此每次测量时可以把它作为零读数加以扣除。经多次测量, 本底杂光读数的误差约为  $\pm 0.05$ 。

(3) 样品镜向反射光束的截取 因为样品的散射是从总反射光中(镜向反射光加反射散射光)将镜向反射光束吸收掉而测量出来的, 因此对镜向反射光束是否正确截取将影响测量的结果。为此在反射吸收筒  $A_1$  前面通过安放不同通光孔的 MgO 球缺检验了反射光束的强度分布轮廓, 结果见图 3, 它与对着光束拍摄的感光底片用 42 W 型显微密度仪描绘的轮廓基本相同。图中  $\phi 10$  mm 以外的光强分布实际上是样品的反射散射光部分, 用通光孔  $\phi 10$  mm 的球缺让镜向反射光出射而由反射吸收筒  $A_1$  加以吸收, 就能恰好测得样品的反射散射。激光反射镜散射的角分布在镜反射方向附近一般仍是一比较平滑的曲线<sup>[4]</sup>, 通光孔  $\phi 10$  mm 对样品的接收角约为  $2^\circ$ , 逸

2. 测量步骤  
装上透射吸收筒  $A_2$ , 读取零读数  $G_0$ 。把事先经过测定的 MgO 白板作为标准样品放在样品  $C$  的位置, 读取

### 2. 测量步骤

装上透射吸收筒  $A_2$ , 读取零读数  $G_0$ 。把事先经过测定的 MgO 白板作为标准样品放在样品  $C$  的位置, 读取

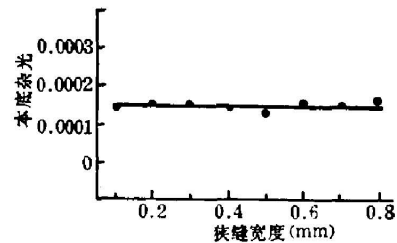


图 2 单色仪出口狭缝宽度对本底杂光的影响

Fig. 2 Effect of exit slit width of monochromator on background light level

出的散射光是很少的。如果球缺的通光孔过大,将有较多的散射光漏掉,则测量值会偏低。球缺通光孔的大小对测量值影响的程度见表 1。

(4) 样品背面反射散射的影响 由于反射吸收筒  $A_1$  前面通光孔的限制,如果样品背面的反射不能进入吸收筒,则对流量是会有影响的,但是对于高反射率的样品,因为透光很少,背面的镜向反射和反射散射的影响都是可以忽略的。至于非高反射率的样品,这种影响无疑需要考虑,为了避免这种影响,我们一般在背面镀双层增透膜以减小镜向反射的影响,但是对背面反射散射的影响,则需要适当估计,因为其散射率一般很小,对于前表面的散射率比它为大的样品,这种影响一般也是可以忽略的。玻璃基底的体散射为  $10^{-6} \text{ cm}^{-1}$  量级,一般可以不加考虑。

(5) 测量误差的估计 由散射率公式  $S = (G_2 - G_0) \times R_0 / (G_1 - G_0)$ , 可推得相对误差为  $|\Delta S/S| = |\Delta R_0/R_0| + |\Delta G_2/(G_2 - G_0)| + |\Delta G_1/(G_1 - G_0)| + |\Delta G_0/(G_2 - G_0)| + |\Delta G_0/(G_1 - G_0)|$ , 其中  $\Delta S$ 、 $\Delta G_1$ 、 $\Delta G_2$ 、 $\Delta G_0$ 、 $\Delta R_0$  分别为测量  $S$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_0$ 、 $R_0$  的偏差。由前述的分析,  $\Delta R_0/R_0 \sim \pm 0.020$ 。在我们的实验条件下,  $\Delta G_0/(G_2 - G_0) \sim \pm 0.05$ ,  $\Delta G_0/(G_1 - G_0) \sim \pm 0.0001$ ,  $\Delta G_2/(G_2 - G_0) \sim \pm 0.05$ ,  $\Delta G_1/(G_1 - G_0) \sim \pm 0.0056$ , 光电接收显示系统的非线性  $\pm 0.0001 \sim \pm 0.0003^{[2]}$ , 因此  $\Delta S/S \approx \pm 0.126$ 。考虑到镜向反射光束与散射光不可能完全截然分开等原因,误差可能还会大一些,我们估计  $\Delta S/S \approx \pm 15\%$  左右。实际测量的例子见表 2。

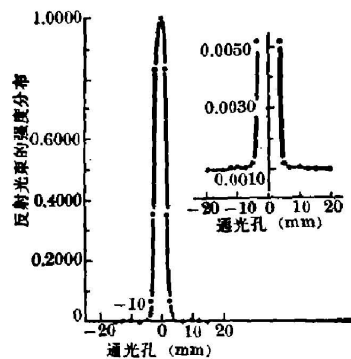


图 3 对反射光束强度分布轮廓的测量结果

Fig. 3 The measurement result of intensity profile for reflected beam

表 1 截取反射光束的通光孔直径对散射率测量值的影响

Table 1 Effect of aperture diameter for intercepting reflected beam on measurement values of scattering

样 品	通 光 孔 直 径 (mm)					
	$\phi 10$	$\phi 15$	$\phi 20$	$\phi 25$	$\phi 30$	$\phi 35$
激光反射镜 1*	$1.72 \times 10^{-3}$	$1.58 \times 10^{-3}$	$1.50 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^{-3}$	$1.48 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-3}$
激光反射镜 2*	$6.14 \times 10^{-4}$	$5.29 \times 10^{-4}$	$5.21 \times 10^{-4}$	$5.24 \times 10^{-4}$	$4.54 \times 10^{-4}$	$4.77 \times 10^{-4}$
银 膜	$1.39 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$9.60 \times 10^{-4}$	$9.60 \times 10^{-4}$	$9.9 \times 10^{-4}$
抛光的玻璃表面	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.14 \times 10^{-4}$	$1.02 \times 10^{-4}$	$8.99 \times 10^{-5}$	$9.04 \times 10^{-5}$	$9.24 \times 10^{-5}$

表 2 实际测量薄膜样品散射率的例子(对 6328 Å)

Table 2 Measurement example for thin films scattering (at 6328 Å)

测量次序	$G_2$	$G_0$	$G_1$	$S$	测量次序	$G_2$	$G_0$	$G_1$	$S$
1.	165	157	19728	$3.88 \times 10^{-4}$	6.	167.5	158	18506	$4.92 \times 10^{-4}$
2.	166	156.5	19390	$4.69 \times 10^{-4}$	7.	166	156.5	18391	$4.95 \times 10^{-4}$
3.	165	156.5	19161	$4.25 \times 10^{-4}$	8.	164.5	155	18199	$5.00 \times 10^{-4}$
4.	165.5	157	18962	$4.29 \times 10^{-4}$	平均结果 (S)	$4.57 \times 10^{-4} \pm 0.33 \times 10^{-4}$			
5.	166.5	157.5	18707	$4.61 \times 10^{-4}$					

### 三、测量结果

#### 1. 两种不同方法测量的比较

H. E. Bennett<sup>[5]</sup>等早期曾用测量反射比的方法确定粗糙表面的散射率,本文用此法作了比较。我们选择具有一定粗糙度的  $K_9$  毛玻璃和良好抛光的  $K_9$  玻璃,使后者相对前者可以近似看作理想表面,在一次真空中同时蒸镀铝膜。先用“GFS 高反射率测量仪”分别测量它们的镜向光谱反射率  $R_s$  和  $R$ ,  $(R - R_s)$  相当于镀铝毛玻璃表面的散射率。然后将镀铝的毛玻璃用积分球法直接测量光谱散射率  $S$ , 结果列于表 3。除 4500 Å 以下偏差较大外,两种方法测量的结果相当接近。“GFS 高反射率测量仪”的测量精度为  $\pm 0.05\%$ , 所测得的反射率值是比较可信的,问题是把测量的  $R$  值作为理想表面的铝的反射率有多大的误差。我们测量铝膜的  $R$  值与 H. E. Bennett 等<sup>[5]</sup>测量的结果均比按铝的光学常数  $n, k$  计算的值为高,其原因可能是所引的  $n, k$  值是早期发表的数据,条件不一,与现在的实际情形有较大偏差所致。尽管如此,假设测量  $R$  的误差为 1% (实际  $< 1\%$ ), 比较两种不同方法测量的散射率仍不失一定的参考价值。

表 3 对镀铝的毛玻璃用积分球法与用“GFS 高反射率测量仪”测量结果的比较

Table 3 Comparison of measurement results between integrating sphere method and GFS reflectometer for an aluminum-coated ground glass

波长(Å)	7500	7000	6500	6328	6000	5500	5000	4500	4000
积分球法 $S$	0.4761	0.4921	0.4923	0.4895	0.4976	0.5187	0.5281	0.5530	0.5769
“GFS 高反仪” $R - R_s$	0.4887	0.5040	0.5076	0.5075	0.5073	0.5087	0.5108	0.5280	0.5249

#### 2. 测量结果与理论计算的比较

我们把与上述样品同时,在一次真空中蒸镀铝膜的抛光的石英基板用积分球法测量光谱散射率的结果示于图 4。根据粗糙表面的散射公式<sup>[3]</sup>

$$S/R = 1 - \exp[-(4\pi\sigma \cos\theta/\lambda)^2],$$

式中  $\sigma$  为粗糙表面的均方根粗糙度,  $\theta$  为测量光束的入射角,  $\lambda$  为测量光束的波长。

假设  $\sigma = 33.5 \text{ \AA}$ , 计算光谱相对散射的曲线也画于图中, 测量值与计算曲线基本相符。4500 Å 以下相差比较大, 可能是测量尚存在一定的系统误差; 也可能是样品上有灰尘, 微粒等复盖, 或者表面不规则性的高度分布不完全是高斯分布所引起<sup>[3]</sup>。

#### 3. 对五种常规薄膜的散射率测量的结果

这些样品都是在现在常规的工艺条件下制备的(见表 4)。结果显示  $TiO_2$  的散射率比  $ZrO_2$  和  $ZnS$  小,  $SiO_2$  的散射率比  $MgF_2$  小。从散射损耗的角度估计, 可以预期  $TiO_2-SiO_2$  多层膜的反射

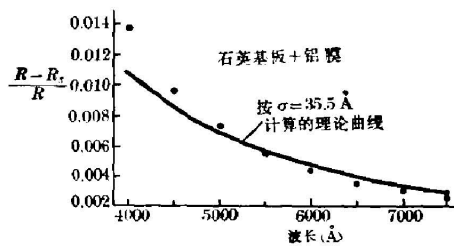


图 4 对镀铝的石英基板测量的散射率与根据均方根粗糙度  $\sigma = 35.5 \text{ \AA}$  计算的理论曲线的比较

Fig. 4 Comparison of the scattering between measurement and theoretical calculation from  $\sigma = 35.5 \text{ \AA}$  for aluminum-coated polished fused quartz sample

表 4 对 5 种常规薄膜的散射率测量结果的比较( $\lambda=6328 \text{ \AA}$ )  
Table 4 Comparison of measurement results of scattering for five kinds  
of routine monolayer thin film

薄膜材料	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	ZnS	MgF <sub>2</sub>
光学厚度	$\lambda/2$	$\lambda/2$	$\lambda/2$	$\lambda/2$	$\lambda/2$
$S$	$2.63 \times 10^{-4}$	$4.55 \times 10^{-4}$	$2.05 \times 10^{-4}$	$5.07 \times 10^{-4}$	$2.55 \times 10^{-4}$

率会比 ZrO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 或 ZnS-MgF<sub>2</sub> 多层膜的反射率高。这一点与现在的许多实际情形吻合。

#### 4. 对 21 层 $\lambda/4$ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 激光高反射镜典型散射率的测量

对这种激光反射镜的大量测量表明, 散射率一般在  $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$  范围, 测量的典型散射率见表 5。为比较起见, 用“GFS 高反射率测量仪”测量的  $R$ 、 $T$  值同时列于表中。对于低透射率的激光高反射镜, 直接测量的  $T$  值即近似为膜的透射率。由表可见,  $R$ 、 $T$ 、 $S$  的测量值是合理的。同时, 由表中可以看到, 在一定的工艺条件下, 这种激光反射镜的反射率的高低主要受散射损耗的限制。

表 5 对 21 层  $\lambda/4$  TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 激光高反射镜测量的典型散射率及与  
 $R$ 、 $T$  测量值的比较( $\lambda=6328 \text{ \AA}$ )

Table 5 Comparison of measurement values between typical scattering  $S$  and  
 $R$ ,  $T$  for 21 layers  $\lambda/4$  TiO-SiO laser mirrors

样品编号	$S$	$R$	$T$	$R+T+S$	估计 $A$
R-10-16-2	$6.88 \times 10^{-4}$	0.9987	$2.3 \times 10^{-4}$	0.9998	$\sim 4 \times 10^{-4}$
11-19A3	$1.24 \times 10^{-3}$	0.9984	$1.89 \times 10^{-4}$	0.9998	$\sim 2 \times 10^{-4}$
4-20	$2.70 \times 10^{-3}$	0.9966	$2.50 \times 10^{-4}$	0.9996	$\sim 4 \times 10^{-4}$

#### 5. 对 21 层 $\lambda/4$ TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 激光高反射镜的光谱散射率的测量

如图 5 所示, 与高反射带相应也有一低散射率的光谱区, 在反射带截止边缘开始有散射

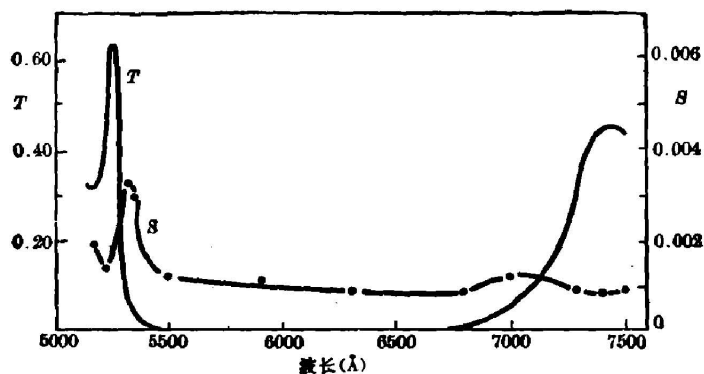


图 5 对 21 层  $\lambda/4$  TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 激光高反射镜测量的光谱散射曲线  
(用 SP700 光谱光度计测量的光谱透射曲线也示于图中)

Fig. 5 The measurement curve of spectral scattering for 21-layer  
 $\lambda/4$  TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> laser mirror

次峰。这一点明显表现出膜系结构对散射的影响。这条测量曲线与 J. Ebert 等人的测量结果<sup>[7]</sup>类似。

#### 四、讨 论

本文介绍的散射测量装置,从误差分析和测量的一些结果与实际符合的情况来看,具有一定的可靠性,它基本上可以满足目前激光反射镜低散射率的测量要求,并且在实际工作中已起到一定的作用。但是这个测量装置还是实验性的,仍有值得改进的地方,例如样品镜向反射的光束面积尚嫌过大;对样品表面的不同位置不能进行扫描测量,如果表面不同位置的散射不均匀,则测量到的散射率有一定的随机性,等等。

本工作曾得到王之江同志的关心和指导,“电流-频率变换器”是丁安华同志提供的,王德林同志协助设计了光学系统,在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Richard Blazey; *A. O.*, **6**, No. 5 (May), 831, 1967.
- [2] K. H. Güenther *et al.*; *T. S. F.*, **34**, No. 2 (May), 363, 1976.
- [3] T. E. Elson *et al.*; «*Applied Optics and Optical Engineering*», (New York Academic Pr. 1979), VII, 191.
- [4] 苏绪隆、丁安华、刘海清;《光学学报》, **2**, No. 1 (Feb.), 57, 1982.
- [5] H. E. Bennett *et al.*; *J. O. S. A.*, **51**, No. 2 (Feb.), 123, 1961.
- [6] H. E. Bennett *et al.*; *J. O. S. A.*, **50**, No. 1 (Jan.), 1, 1960.
- [7] J. Ebert *et al.*; *A. O.*, **18**, No. 6 (Mar.), 818, 1979.

### Measurement of thin films scattering of laser mirrors

SU KAILONG QIAN WEIZHEN LUO MIAOHONG AND HE CHAOLING  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 14 April 1982)

#### Abstract

A measure method for laser mirror scattering in the visible region and its results are described in this paper. The measure errors have been analysed and some of them may be reduced by  $\pm 15\%$ , which is corresponding to  $\pm 1.5 \times 10^{-4}$  (absolute deviation) for the  $1 \times 10^{-3}$  scattering. The measurement results are essentially in agreement with theoretical calculation and the practice. It shows that the 21-layer  $\lambda/4$   $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  hard-film scattering of laser mirrors is generally  $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ . The fluctuation of scattering is great, and the mirrors reflectivity is governed by scattering in principle.