

激光反射镜高反射率的精确测量 ——“GFS 高反射率测量仪”

苏锴隆 丁安华 刘海清
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文介绍用于可见至近红外的“GFS 高反射率测量仪”的研制结果。该仪器根据在样品上两次反射的测量原理,采取单光路和用电流-频率变换器对光信号进行积分式统计计数方法,全部使用国产元件,达到了整机光电接收显示系统的高稳定性和高线性,此外,还采取一些必要措施减少仪器的系统误差。根据对精度的检验和分析,仪器在可见区的测量精度 $\leq \pm 5 \times 10^{-4}$; 在近红外区为 $\leq \pm 1 \times 10^{-3}$ 。

一、前 言

低损耗的高反射镜在激光应用中非常重要。对高反射率的精确测量,国外有不少学者作过研究^[1~6],从已有的报导看,有以激光为光源的单一波长高反射率的测量和以钨丝灯(或其它连续光谱光源)为光源的光谱高反射率的测量,许多作者还力求增加在样品上的反射次数以提高测量精度。我们感兴趣的是可见至近红外光谱高反射率的测量,因为这样能更好满足薄膜工作者研制各种波长激光反射镜的需要。在这一方面,国外能测量较小的样品和较有代表性者有1973年 R. S. Hernicy 等^[4]和1974年 F. Petru^[5]的工作,测量精度优于 $\pm 1 \times 10^{-3}$ 。

光谱高反射率的测量,由于光谱强度弱,要适应的波长范围宽,对信号接收显示系统的灵敏度和稳定性要求更高。我们因为需要测量 $\phi 20$ 毫米的样品,只宜在样品上采取反射两次的方法,这样,为了使测量有较高的精度,与 F. Petru^[5]不同,我们采取了电流-频率变换器(I/f 变换器)作接收显示系统以及单光路的简单结构,做到了光电接收显示系统的高稳定性和高线性,满足了作为精密测量的要求。此外,我们还注意采取一些措施来有效的减少系统误差。其中,我们与 R. S. Hernicy 等^[4,5]稍有不同的有两点:(1)发现必须用积分球和使光路对准相结合才能更好消除光束位置误差的影响;(2)对于一般多层介质膜样品,可见至近红外区的杂散光的影响仍然不容忽视,必须加滤色片或干涉滤光片予以消除。根据对精度的检验和分析,仪器在可见区的测量精度为 $\leq \pm 5 \times 10^{-4}$,在近红外区为 $\leq 1 \times 10^{-3}$ 。仪器对 $\phi 20 \sim 50$ 毫米的平面镜除可以作近似垂直($\approx 4^\circ$)入射和 45° 入射测量外,还可以作透射率和镜面反射率不均匀性的测量。仪器已使用将近两年,性能稳定。

二、测量原理

如图 1(a) 所示, 设入射光强为 I_0 , 参考镜的反射率为 R_0 , 则从参考镜反射的光强为

$$G_0 = I_0 R_0 \quad (1)$$

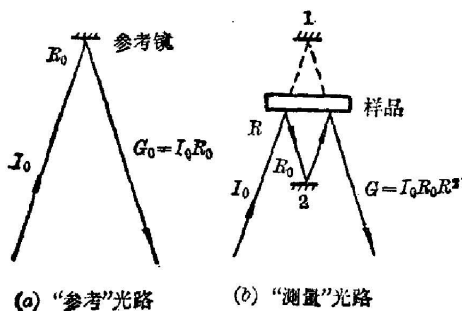


图 1

然后, 如图 1(b) 所示, 反射率为 R 的样品移入光路, 参考镜从位置 1 转至对称的位置 2, 则光束在样品上反射两次后仍与原来的光路重合, 此时光强为

$$G = I_0 R_0 R^2 \quad (2)$$

如果 I_0 稳定和参考光路与样品光路的光束位置精确重合的话, 则由式(1)和(2)得到样品的绝对反射率为

$$R = \sqrt{G/G_0} \quad (3)$$

这时测量反射率的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta R}{R} \right| = \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta G}{G} \right| + \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta G_0}{G_0} \right| \quad (4)$$

显然, 在样品上反射两次比在样品上反射一次精度可以提高一倍。如果适当安排参考镜使光束能在样品上反射 n 次, 则精度无疑可以提高 n 倍, 只不过样品的尺寸需要大一些。对于 $\phi 20$ 毫米的样品要使反射次数增多是困难的, 为了发挥多次反射的优点, 同时又保持仪器结构比较简单和使用方便, 我们估计到电子学的潜在可能, 选择了两次反射的方法。

三、仪器结构和主要措施

仪器分为两部分: (1) 测量室; (2) 电路系统。

1. 测量室

测量室的光学系统如图 2 所示。光源 S 的光束经 M_1, R_1 会聚到分光系统(玻璃棱镜圆盘单色仪)的入射狭缝 L 上。 T_1, T_2 为滤色片和干涉滤光片, 用以滤除杂散光。从出射狭缝 L' 出射的光束经 M_3 可任选: 一为右侧的近似垂直入射测量, 一为左侧的 45° 入射测量。 45° 测量为仪器的附带部分。 Z_1, Z_2, Z_3 为样品, R_2 分别把 L' 的像呈现在 Z_1 和 M_6 上, R_3 将 Z_1 的像点从一点呈现在另一点, 再由 R_5 变成平行光射入积分球 D 和倍增管 B 。 R_4, M_4 在测量反射率均匀性时使用。 R_6 同样是将光束变为平行光射入 D 。测量 Z_2 的反射率均匀性时, 将 Z_2 退至 M_6 的位置。

机械系统主要是保证 R_2, M_6 的 180° 旋转定位和 Z_1, Z_2 的平移导轨要有较高的精度。仪器经设计、装校, 近似垂直入射的光束位置偏差 $< 15''$, 45° 入射 $< 20''$, 平移导轨的位置偏差 $< 20''$ 。

2. 电路系统

电路系统的方框图如图 3 所示。光源为 12 伏, 100 瓦溴钨灯。光源稳压电源的稳定性在几十分钟内可优于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。倍增管为经过优选的国产 GDB 423(用于可见区)和 GDB 239

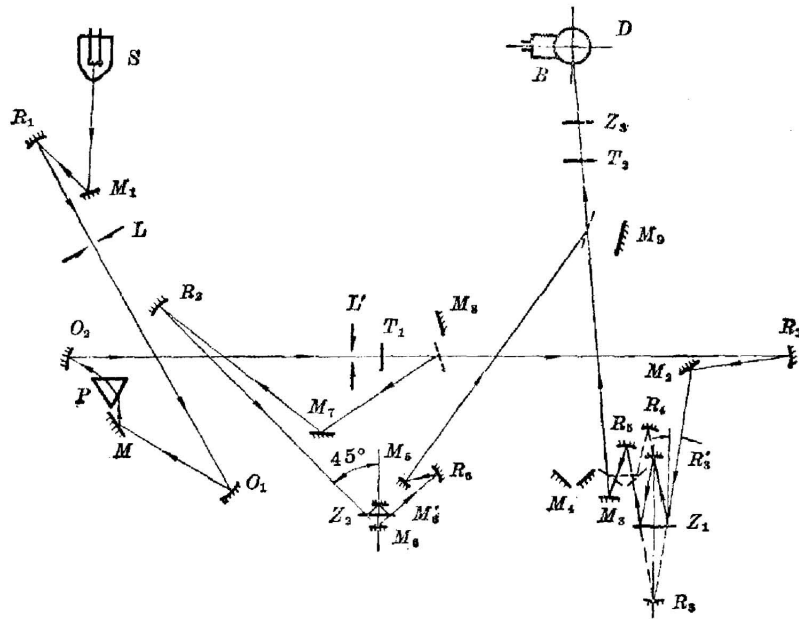


图 2 光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical system

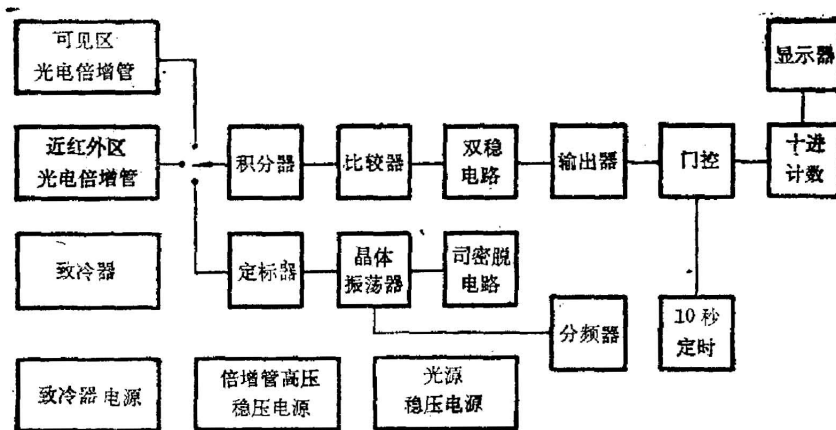


图 3 电路系统方框图

Fig. 3 Block diagram of the electric circuit system

(用于近红外)。GDB 239 受环境影响较大,我们附设了半导体致冷器,在必要时降低其热噪声暗电流。倍增管电源为国产的 FH-426 B 高压稳压电源。倍增管输出的信号由我们自制的 I/f 变换器用数字显示,变换系数为 10^{-12}A/Hz 。变换器对信号作积分式统计计数,减少了信号随机起伏的影响。变换器短时间(5分钟)的稳定性可达 $\pm 1 \times 10^{-5}$,经检验,线性为 $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ 。整机光电接收显示系统的稳定性曲线示于图 4 和图 5,对可见区 5 分钟的稳定性约为 $\pm 1 \times 10^{-4}$,2 分钟的稳定性约为 $\pm 5 \times 10^{-5}$;对近红外区 5 分钟的稳定性约为 $\pm 4 \times 10^{-4}$,2 分钟的稳定性约为 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。变换器的闸门时间选为 10 秒,对一种波长测量反射率一次的时间不超过一分钟,这就说明整机光电系统的稳定性可以满足仪器作精密测量的要求。

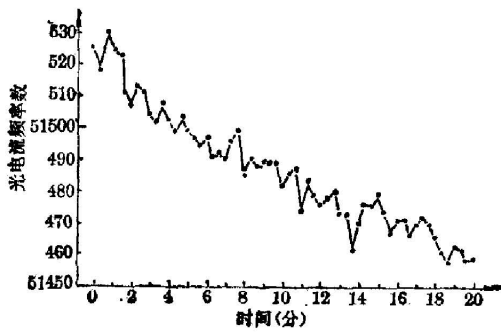


图 4 可见区(6328Å)光电接收显示系统的稳定性
Fig. 4 Stability of the optic-electronic detection and display system for 6328Å in the visible region

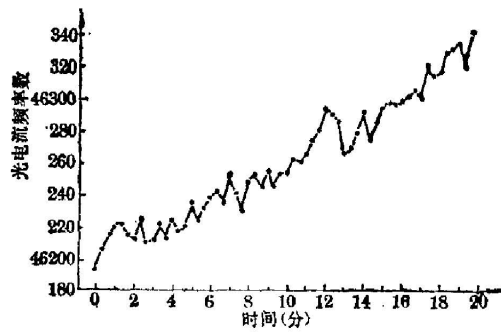


图 5 近红外 1.06μ 光电接收
Fig. 5 Stability of the optic-electronic detection and display system for 1.06 μm in the near IR region

四、精度检验

1. 仪器的系统误差

系统误差的来源主要是光束的位置误差、倍增管接收显示系统的非线性和杂散光的影响等。参考镜是铝膜,反射率均匀性经检验一般都比较好,而且参考镜在仪器里旋转定位精度高,它的影响可以忽略。

(1) 光束的位置误差及影响: 光束的位置误差对反射率测量的影响主要是由于倍增管光阴极区域灵敏度不均匀而引起的。我们将倍增管和积分球放置在测角仪样品台上,改变光束入射角测量倍增管输出信号的变化见图 6,显然,加积分球对消除光束位置误差的影响起着很好的作用。根据图 6 的实验结果和仪器仍有的光束位置误差计算对反射率测量值的影响是: 近似垂直入射约为 $\pm 3 \times 10^{-5}$, 45° 入射约为 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 。

(2) 倍增管接收显示系统的非线性及影响: 我们采用双孔法^[7]检验,如图 7 所示,设单独开启 A 孔或 B 孔的光电流分别为 I_A 、 I_B ,同时开启 A、B 孔时光电流为 I_{AB} ,则有

$$1 + \alpha = (I_A + I_B) / I_{AB},$$

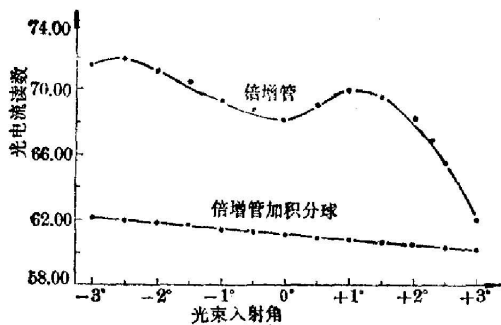


图 6 积分球消除光束位置误差影响的实验结果
Fig. 6 Experimental results obtained by using an integrating sphere to reduce the effect of aiming error of the light beam

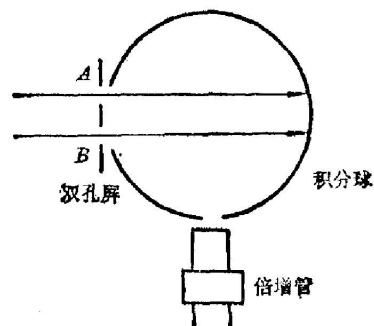


图 7

式中 α 表示系统的非线性, 如果系统是线性的, 则 $\alpha=0$ 。

我们对倍增管 GDB 423 模拟实际工作条件进行线性检验的结果示于图 8, 曲线表明光电流在频率数 60000 以下时, 非线性在 1×10^{-4} 以内, 与波长没有明显的关系。我们还对测量 K_0 光学玻璃表面低反射率的光强条件进行了线性检验, 结果列于表 1, 与图 8 的结果相吻合。对于 GDB 239 模拟实际工作条件时所进行的检验结果示于图 9, 曲线表明在频率数 60000 以下时, 非线性小于 2×10^{-3} 。简单计算表明, 在频率数 60000 以下工作时, 可见区的

非线性对测量高反射率和低反射率的影响为 2×10^6 量级, 近红外区约为 2×10^{-5} 量级, 因此, 非线性的影响可以忽略。

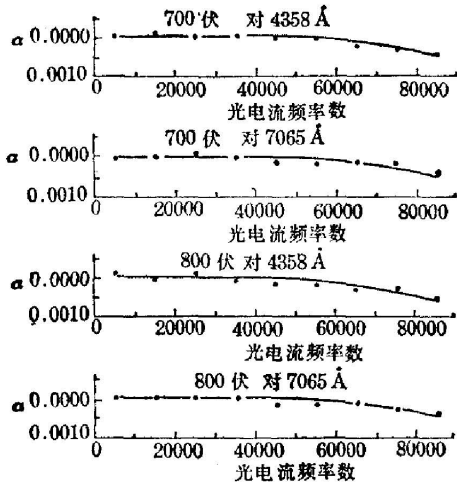


图 8 可见区倍增管接收显示系统的线性检验结果
Fig. 8 Linearity test results for the multiplier detection and display system in the visible region

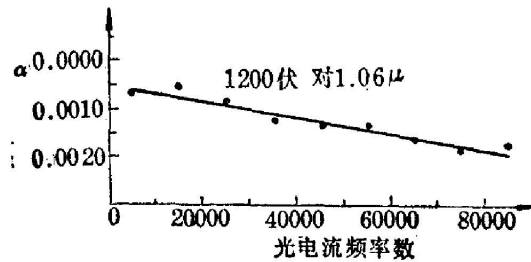


图 9 近红外区倍增管接收显示系统的线性检验结果

Fig. 9 Linearity test results for the multiplier detection and display system for 1.06μ in the near IR region

表 1 模拟 K_0 玻璃表面反射的光强条件检验系统线性的结果

Table 1 Test results of the system linearity using beam intensity simulation of the reflectance of K_0 wedge glass surface

波 长	测 量 值									α
4358 Å	零读数	66	66	66	66	66	66	66	66	3.67×10^{-5}
	I_A	166	166	166	166	166	166	165	165	
	I_B	61237	61233	61224	61225	61211	61215	61195	61193	
	I_{AB}	61330	61333	61333	61314	61314	61297	61297	61293	
5893 Å	零读数	63	63	63	63	64	64	64	64	3.7×10^{-5}
	I_A	126	126	126	126	125	125	127	127	
	I_B	40941	40932	40926	40915	40900	40901	40879	40874	
	I_{AB}	41009	40992	40992	40971	40971	40957	40957	40921	
7065 Å	零读数	64	64	64	64	64	64	64	64	2.9×10^{-5}
	I_A	149	149	150	150	149	149	147	147	
	I_B	55973	55971	55969	55966	55969	55964	55968	55963	
	I_{AB}	56050	56054	56054	56059	56059	56047	56047	56038	

(3) 杂散光的影响: 从 L' 出射的光束, 除选定的测量波长外, 还含有少量其它波长的背景杂光, 我们对其影响进行了实验, 发现这种杂光对测量金属膜的反射率影响不明显, 但对多层介质膜则有一些影响。这是因为参考镜是铝膜, 它具有很宽的光谱反射, 而多层介质膜只在有限的光谱区为高反射, 其余为透射。这样, 参考镜在测量光路和参考光路的作用不能等价, 结果测量得到的反射率一般会偏低。实验结果见表 2。因此仪器附设了一些滤光片和干涉滤光片, 杂散光的影响可以基本避免。

表 2 金属膜与多层介质膜反射率测量值受杂散光影响的比较
Table 2 Comparison of the measured reflectivity between metal and multilayer dielectric films

样 品	铝 膜 (对 6328 Å 测量)			多 层 介 质 膜 (对 7000 Å 高反射)				多层介质膜 (对 1.06 μ 高反射)		
	未 加	6000 Å 截 止 滤 色 片	6328 Å 干 涉 滤 光 片	未 加	5000 Å 截 止 滤 色 片	6800 Å 截 止 滤 色 片	7000 Å 干 涉 滤 光 片	未 加	0.9 μ 截 止 滤 色 片	1.06 μ 干 涉 滤 光 片
反 射 率 测 量 值 %	90.21	90.21	90.20	98.53	98.56	98.76	98.92	99.37	99.59	99.59

综上所述, 经采取适当措施后, 仪器剩余的系统误差主要是光束的位置误差, 它对反射率测量值的可能影响 $\leq \pm 1 \times 10^{-4}$ 。

2. 仪器精度的直接检验

迄今还没有镜面高反射率的绝对标准。精细抛光的金属表面和真空蒸发的金属膜在大气中会氧化, 反射率不稳定。我们作过试验, 真空蒸发的铝膜在可见和近红外区因受工艺条件(如膜料、蒸发率)的影响很难有精确重复的反射率, 而且手册上的金属光学常数多为早期数据, 条件不一, 精度有限, 据此进行理论计算定为标准是有些问题的。在这种情况下, 为了对精度尽量有个直接比较, 我们选择了 K_9 玻璃表面的反射率作为参考标准, 其可取之处是化学稳定性比较好, 玻璃折射率的测定精度比较高, 如果表面光洁度足够的话, 反射率可以以比较高的精度确定。当然, 这是一个低反射率的标准, 但是如前所述, 由于我们的仪器线性

表 3 在“近似垂直”入射下, 对一级光洁度 K_9 楔形玻璃表面测量的结果
Table 3 Measurement results for the reflectivity of the 1st grade polishing degree on the K_9 wedge glass surface, in near vertical incidence

波 长	4358 Å	5461 Å	5893 Å	6328 Å	6563 Å	7065 Å	1.06 μ
测 量 的 玻 璃 折 射 率	1.52664	1.51852	1.51652	1.51467	1.51405	1.51269	1.50622
计 算 的 反 射 率 %	4.345	4.239	4.213	4.189	4.181	4.163	4.030
测 量 的 反 射 率 %	4.344 ± 0.012	4.251 ± 0.013	4.216 ± 0.013	4.195 ± 0.016	4.190 ± 0.009	4.169 ± 0.012	4.096 ± 0.024
与 计 算 的 偏 差 %	-0.001	+0.012	+0.003	+0.006	+0.009	+0.006	+0.016
平 均 偏 差	$\pm 0.006\%$						0.016%

表 4 在“近似垂直”入射下,用偏光对一级光洁度 K_0 楔形玻璃表面测量的结果Table 4 Measurement results by using polarized light for the reflectivity of 1 st grade polishing degree on the K_0 wedge glass surface, in near vertical incidence

波 长		4358 Å	5461 Å	5893 Å	6328 Å	6563 Å	7065 Å	
测量的玻璃折射率		1.52664	1.51852	1.51652	1.51467	1.51405	1.51269	
计 算 的 反 射 率 %	R_s	4.373	4.266	4.240	4.216	4.208	4.190	
	R_p	4.317	4.212	4.186	4.162	4.154	4.136	
	R_0	4.345	4.239	4.213	4.189	4.181	4.163	
测 量 的 反 射 率 %	R_s	4.382	4.260	4.233	4.216	4.200	4.186	
	R_p	4.319	4.227	4.196	4.173	4.151	4.152	
	R_0	4.351	4.244	4.215	4.195	4.170	4.169	
与计算的偏差%		+0.006	+0.005	+0.002	+0.006	-0.002	+0.006	
平 均 偏 差		±0.005%						

表 5 在 45° 入射下,用偏光对一级光洁度 K_0 楔形玻璃表面测量的结果Table 5 Measurement results by using polarized light for the reflectivity of the 1 st grade polishing degree on the K_0 wedge glass surface, in 45° incidence

波 长		4358 Å	5461 Å	5893 Å	6328 Å	6563 Å	7065 Å	
测量的玻璃折射率		1.52664	1.51852	1.51652	1.51467	1.51405	1.51269	
计 算 的 反 射 率 %	R_s	9.830	9.638	9.591	9.548	9.533	9.501	
	R_p	0.966	0.929	0.920	0.912	0.909	0.903	
	R_0	5.398	5.284	5.256	5.230	5.221	5.202	
测 量 的 反 射 率 %	R_s	9.722	9.581	9.489	9.515	9.494	9.434	
	R_p	1.067	0.926	1.011	0.965	0.996	0.955	
	R_0	5.395	5.254	5.272	5.240	5.245	5.195	
与计算的偏差%		-0.003	-0.030	+0.016	+0.010	+0.024	-0.007	
平 均 偏 差		±0.015%						

比较好,它对这种低反射率测量值的影响可以忽略,因此用它作为精度检验的比较仍不失一定的参考价值。

我们选作参考标准的 K_0 玻璃的直径为 $\phi 30$ 毫米,精细抛光到一级光洁度,玻璃反面磨成斜面,使反面的反射不参与前表面的反射。同一批玻璃的折射率经用最小偏向角法(对 6328 \AA 和 1.06μ 激光波长用自准法)测量,精度为 $\pm 5 \times 10^{-5}$,结果与一般手册上的数据基本相同。为了估量表面光洁度的影响,经用积分球法测量散射率,表明一级光洁度 K_0 玻璃表面的散射率约 3×10^{-5} 。我们还对测量光束进行过检验,光束实际稍呈 S 偏振,对于近似垂直入射光路,偏振度约 5%, 45° 入射光路约 20%。仪器对上述玻璃表面的测量结果列于表 3~5。

由表 3~4 可见, 近似垂直入射光束稍呈 S 偏振, 对测量值无明显影响。根据玻璃表面的散射率约 3×10^{-5} , 由表 3~5 可见, 对近似垂直入射, 可见区与参考标准相比的测量偏差 $\approx \pm 1 \times 10^{-4}$, 近红外 $\approx \pm 2 \times 10^{-4}$; 对 45° 入射, 测量偏差 $\approx \pm 2 \times 10^{-4}$ 。在 45° 下测量时, 测量值受偏振片的偏振度和旋转角的影响很敏感, 测量比较困难, 误差可能会比较大。因此, 从总的来讲, 表 3~5 所反映的偏差与前面关于系统误差的分析结果 ($\leq \pm 1 \times 10^{-4}$) 基本上吻合。表 3~5 中有许多表现为正公差, 这反映了仪器和测量方法在客观上仍是存在一定的系统误差, 只是这个误差很小而已。我们对各种高反射率的样品进行的大量测量表明, 在可见区的测量重复性一般 $\leq \pm 2 \times 10^{-4}$, 近红外一般 $\leq \pm 4 \times 10^{-4}$, 因此可以认为仪器的精度在可见区为 $\leq \pm 5 \times 10^{-4}$, 近红外为 $\leq \pm 1 \times 10^{-3}$ 。仪器对激光反射镜实测的例子见表 6 所示。

表 6 实测激光反射镜的例子

Table 6 Measurement examples for the laser mirrors

He-Ne 激光反射镜 (6328 Å)					钹玻璃激光反射镜 (1.06 μ)				
次序	零读数	参考信号	样品信号	反射率%	次序	零读数	参考信号	样品信号	反射率%
1	132	53815	53668	99.86	1	3788	28404	28290	99.77
2	132	53804	53668	99.87	2	3797	28432	28290	99.72
3	132	53804	53688	99.89	3	3797	28427	28314	99.77
4	132	53807	53688	99.89	4	3806	28460	28314	99.70
5	132	53807	53688	99.89	5	3806	28446	28328	99.76
6	132	53806	53688	99.89	6	3817	28462	28328	99.73
7	132	53806	53680	99.88	7	3817	28476	28362	99.76
8	132	53810	53680	99.88	8	3823	28486	28362	99.75
9	132	53810	53682	99.88	9	3823	28484	28365	99.76
10	132	53801	53682	99.89	10	3831	28512	28365	99.70
平均反射率		99.88 \pm 0.01%			平均反射率		99.74 \pm 0.03%		

五、讨 论

(1) 45° 测量在本仪器是作为附带部分。在 45° 入射下, 如果样品是多层介质膜高反射镜, 因为它对中心波长的 P 分量和 S 分量的反射率 R_P 和 R_S 非常接近, 测量值不会因测量光束稍呈 S 偏振而有明显影响, 其它样品一般应加偏振片测量, 但是由于偏振片质量和偏振精度的影响, 将会引入附加误差, 在这种情况下, 估计可见区 45° 反射率的测量精度 $\approx \pm 1 \times 10^{-3}$, 近红外 $\approx \pm 2 \times 10^{-3}$ 。

(2) 我们研制的仪器是高反射率测量仪, 最适合于测量 $R > 95\%$ 的样品, 此时, 仪器在可见区测量透射率的绝对偏差 $\leq \pm 1 \times 10^{-4}$, 因此可以从测量的 R 、 T 值得出样品的吸收散射损耗, 这是很有意义的。对 $R < 95\%$ 的样品需要注意的是样品背面反射的影响。这种影

响事先可以估计,必要时背面可以镀增透膜或磨斜。

(3) 仪器对样品可测的最小面积实际可为 $\phi 15$ 毫米,对更小面积的样品,可以用已知反射率的较大样品作相对测量。至于非平面的样品,因为在我们接触到的各种波长激光反射镜样品中仍属少数,为了仪器结构简单和使用方便,我们对它没有考虑,这无疑是本仪器的一个局限。

(4) 激光反射镜的反射带一般有几百埃以上的宽度,故仪器的波长精度除用光谱灯和用 6328 \AA 、 1.06μ 激光进行校正外,没有作其它特殊考虑。分光系统分辨率为钠光的双线。

(5) 仪器的光学系统全部为反射式,原则上容易推广用作紫外和红外高反射率的测量。

(6) 仪器的电路系统着重于保证测量的精度,由于考虑到经济性和便于推广使用,暂时没有配备计算机和打印机。

参加本工作的还有陈莉娜同志,上海海光玻璃制品厂谢光明、沈志强等同志。王之江同志对本工作曾给予关心和指导;李元康同志在确定光学系统时曾给予帮助;韩广礼等同志对仪器作了精心的装校;蒋安民、夏青生同志协助测定了玻璃的折射率,在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] D. R. Herriott, H. J. Schulte; *Appl. Opt.*, 1965, **4**, No. 8 (Aug), 883.
- [2] 小仓盘夫,应用物理,1971, **40**, No. 10 (Oct), 1151.
- [3] W. Baner; *J. A. P.*, 1973, **44**, No. 8 (Aug), 3694.
- [4] R. S. Hernicy, D. P. Dewitt; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 10 (Oct), 2454.
- [5] F. Petru, J. Krsek; *Opt Acta*, 1974, **21**, No. 4 (Apr), 293.
- [6] A. Arnon, P. Baumeister; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 17 (1 Sep), 2913.
- [7] K. D. Mieleng, K. L. Eckerle; *Appl. Opt.*, 1972, **11**, No. 10 (Oct), 2294.

Accurate measurement of the high-reflectivity of laser mirror ——“GFS high reflectivity measuring instrument”

SU KAILONG DING ANHUA AND LIU HAIQING

(Shanghai Institute Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 10 February 1981)

Abstract

The “GFS high-reflectivity measuring instrument” used in the visible and infrared regions are developed. According to the measuring principle of double-reflectance on a sample, the instrument takes a simple structure of a single optical path. The optical signals are investigated by statistical counting with a current-frequency convertor. The electric elements involved are all made in China. A high stability and linearity are realized in optio-electronic detection and readout. We take some measures to reduce the systematic errors of the instrument. The measurement accuracy has been analyzed and tested. The results show that the measurement accuracy is better than $\pm 5 \times 10^{-4}$ in the visible region; and $\pm 1 \times 10^{-3}$ in rear infrared region.