

镜面红外高反射率的精确测量

——JF-1 型红外高反射率测量仪*

徐世秋 陶凤翔 陈伟塘 薛魁武 朱红兵

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文介绍了 JF-1 型红外高反射率测量仪的研制结果。该仪器的特点是, 光学上采用在样品表面反射四次的方法; 电路上采用高增益集成运算放大器作闭环使用, 组成各种组态放大器来提高线性度和稳定性。该仪器能测量样品在 $0.65\sim 15\ \mu\text{m}$ 波长范围内的红外高反射率, 精度优于 1×10^{-3} 。

一、前 言

提高反射镜面的反射率, 对改善红外遥感、红外激光、辐射致冷等系统的性能有很大作用, 而精确测量红外高反射率对选择合适的镀膜材料、改进镀膜工艺, 提高样品的反射率具有一定的指导作用。正因为如此, 国外早就报道了这方面的工作^[1-5]。为了提高测量反射率的精度, H. E. Bennett 采用二次反射的方法, 使仪器能在 $0.32\sim 32\ \mu\text{m}$ 波长范围内测量样品的反射率, 精度达到 1×10^{-3} 。众所周知, 许多红外遥感仪器的工作波段是在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$, 不少激光器和辐射致冷系统也都工作在红外区。这就需要在很宽的波段范围内对样品的反射率进行精确测量, 为此我们用钨带灯和能斯特灯等连续光源作为仪器的光源, 并用 SPM-2 型单色仪进行分光。为了达到精确测量之目的, 我们用稳流的方法使光源的辐射功率保持恒定; 在光学上采用四次反射的方法; 又选用光谱选择性较小的热释电探测器作为接收元件; 在电路上对探测器输出的信号用高线性和高稳定性的放大器放大, 最后经交直流转换, 用直流数字电压表显示信号。误差分析的结果表明, JF-1 型红外高反射率测量仪在 $0.65\sim 15\ \mu\text{m}$ 的波长范围内, 对于近似垂直入射(平均入射角为 4°) 时镜面的平均反射率的测量精度优于 1×10^{-3} 。

二、测量原理

JF-1 型红外高反射率测量仪应用光束在样品上反射四次的方法进行测量, 原理如下: 在样品不进入光路时, 光路如图 1 所示。此时数字电压表上显示的电压信号为

本文 1983 年 4 月 15 日收到。

* 该仪器的原名为“JF-1 型红外绝对反射率测量仪”

$$V_0 = \alpha I_0 R_3^2 R_4, \quad (1)$$

其中 α 为比例常数, I_0 为入射光强, R_3 、 R_4 分别为反射镜 M_3 、 M_4 的反射率。我们让 M_4 向纸面里边倾斜一个角度, 这样光束在 M_3 的两个不同位置上分别反射一次。当样品 M_p 进入光路时, 光路如图 2 所示, 它是由 M_3 绕通过 M_p 表面的轴转过 180° 来达到的, 此时在样品 M_p 上的四个光斑的位置如图 3 所示。这时数字电压表所显示的电压信号为

$$V_p = \alpha I_0 R_3^2 R_p^4 R_4, \quad (2)$$

其中 R_p 为样品 M_p 的反射率。

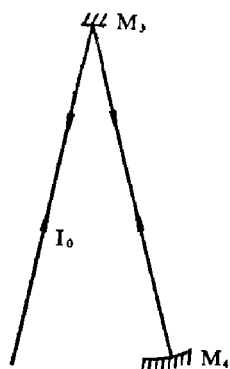


图 1 样品不进入光路时的光路图

M_3 —平面反射镜;
 M_4 —球面反射镜

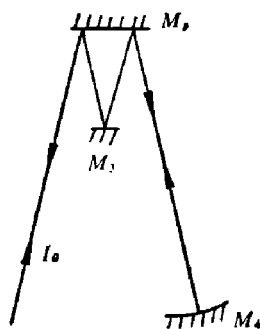


图 2 样品进入光路时的光路图

M_3 —平面反射镜; M_4 —球面反射镜; M_p —样品

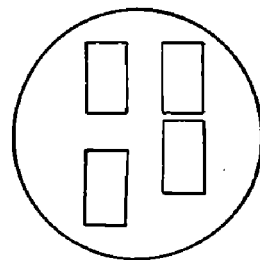


图 3 在样品表面上四个光斑的位置

假如在这两次测量过程中, 入射光强不变, 放大器和探测器等具有优良的线性, 参考镜 M_3 转动 180° 后光路仍保持对称。则

$$R_p = \sqrt[4]{\frac{V_p}{V_0}}, \quad (3)$$

因此, 样品反射率 R_p 的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta R_p}{R_p} \right| = \frac{1}{4} \left| \frac{\Delta V_0}{V_0} \right| + \frac{1}{4} \left| \frac{\Delta V_p}{V_p} \right|. \quad (4)$$

由公式(4)显而易见, 采用四次反射方法可以比采用一次反射方法提高测量精度。但是实际上, 由于样品的尺寸不能做得很大, 仪器的结构也不宜过于庞杂, 因此在样品表面的反射次数不能任意增多。另外, 多次反射方法对机械加工和光学装调的要求较高。

三、仪器结构

JF-1 型红外高反射率测量仪采用组合式结构, 由外光路系统、SPM-2 型单色仪、反射计和电子仪器四部分组成。其中外光路系统通过一个球面反射镜把光源成象于单色仪入射狭缝上, 光束用一个十周调制器调制。下面主要介绍反射计和电子仪器两部分。

1. 反射计

反射计的光学系统如图 4 所示, 从单色仪出射狭缝 E 射出的光束, 经平面反射镜 M_1 反射后, 由球面反射镜 M_2 把 E 成象于平面反射镜 M_3 上, 后由球面反射镜 M_4 把此狭缝象再成象于 M_3 的下部。其中, 为了使球面反射镜 M_5 脱离纸面所在的光路, 将反射镜 M_4 的光轴向纸面里边倾斜一个角度, 最后由 M_5 把单色仪出射狭缝成象于热释电探测器 D 上。

当样品进入光路时, 参考镜 M_3 从位置(一)绕通过样品 M_p 表面的轴旋转 180° 到位置

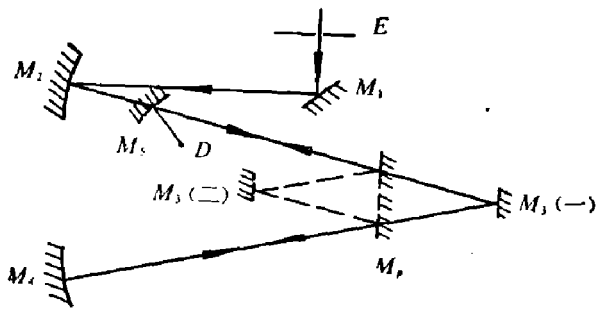


图4 反射计的光学系统

E —单色仪出射狭缝; M_1, M_3, M_p —平面反射镜;
 M_2, M_4, M_5 —球面反射镜; D —热释电探测器

(二)(如图4中的虚线所示)。由于 M_3 和 M_p 都是平面反射镜, 因此除了光线在样品 M_p 上多了四次反射外, 其余的都和样品不在光路时的情况相同。

2. 电子仪器

电子仪器部分的方框图如图5所示。

仪器在近红外区用 6V 、 108W 钨带灯作为光源, 用上海第二电表厂生产的 JWL-30 型晶体管稳流器进行稳流, 电流稳定度为 1×10^{-4} 。在红外区用能斯特灯

作为光源, 用集成运算放大器和大功率高压悬浮法进行稳流, 电流稳定度优于 5×10^{-4} 。

由于测量时照射到探测器上的光强变化比较大, 这就要求与热释电探测器配合的电路有较大的动态范围。因此我们全部采用高增益集成运算放大器作闭环使用, 组成各种组态放大器, 并置于屏蔽盒中, 使电路具有优良的线性度和稳定性。在交直流转换电路中的直线检波器也利用运算放大器的高增益特点来降低二极管的非线性及热敏特性。从直线检波器检出的直流信号由数字电压表显示。

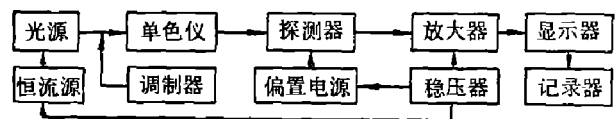


图5 电子仪器的方框图

从直线检波器检出的直流信号由数字电压表显示。

四、误差分析

JF-1 型红外高反射率测量仪的主要误差来源有: 系统的不稳定性、“参考”光路和“测量”光路的不对称性、单色仪和反射计联接时的相对移动、系统的非线性和杂散光的影响。

1. 系统的不稳定性

仪器中的钨带灯和能斯特灯两光源经稳流后, 由它们发出的光经单色仪、反射计、探测器、放大器和交直流转换后, 在直流数字电压表上显示出信号的不稳定性, 它对测量反射率的影响为 8×10^{-4} 。

2. “参考”光路和“测量”光路的不对称性

“参考”光路和“测量”光路的不对称性是由两种因素造成的。首先, 主要由于在仪器装校过程中测距误差和支撑样品框的三个定位螺钉的磨损, 使参考镜 M_3 的转动轴不在样品表面, 这相当于样品发生前后平移, 其偏差经实测不大于 0.045mm 。我们测量了反射率的变化(见表1)。其次, 主要由于样品表面有灰尘, 引起样品倾斜。为了模拟这个因素, 我们

表1 样品的平移和倾斜对反射率测量的影响

波 长 (μm)	0.9	4	12
样品前后平移 0.045mm 反射率的变化值(%)	± 0.023	± 0.037	± 0.047
样品倾斜 0.025° 反射率的变化值(%)	-0.050	-0.096	-0.095

在样品表面和样品框之间垫上 0.015 mm 厚的垫片, 使样品倾斜 0.025°, 测量了反射率的变化(见表 1)。产生这两个变化的原因在于: 成在探测器上的象的位置发生了变化; 探测器面灵敏度不均匀。从表 1 中也可看到, 在测量时样品的清洁度是十分重要的。

3. 单色仪和反射计联接时的相对移动

考虑到单色仪是一种常用的测量仪器, 因而单色仪和反射计之间采用了组合式联接结构。尽管每次将它们联接时, 均使光束处在反射镜的中间, 但由于视差和机械结构的原因, 两个仪器之间总有一定的相对位移。我们通过多次联接, 测得样品反射率的平均偏差, 见表 2。

表 2 单色仪和反射计联接时的相对移动对反射率测量的影响

波 长 (μm)	0.9	4	12
反射率的平均偏差(%)	± 0.02	± 0.004	± 0.057

4. 系统的线性

采用双孔法来检验系统的线性^[6,7]。在单色仪入射狭缝前面加上双孔光阑, 它们分别为 A 孔和 B 孔。开 A 孔时测得信号为 V_A , 开 B 孔时测得信号为 V_B , 开 A 和 B 两孔时测得信号为 V_{AB} , 则

$$1 + \alpha = \frac{V_A + V_B}{V_{AB}},$$

其中 α 为非线性系数。

应用上述方法, 测得系统的非线性系数 α 列于表 3 中。

表 3 不同波长和不同信号大小时系统的非线性系数 α (%)

电压信号 V_{AB} (V)	波 长 (μm)		
	0.9	4	10
6.0	0.06	1.14	0.58
5.5	0.04	-0.18	0.002
4.5	-0.07	-0.15	-0.10
3.5	-0.22	-0.3	-0.16
2.5	-0.23	-0.71	-0.49

表 4 加不同滤光片时反射率的相对变化值(%)

波 长 (μm)	1.78	4	7	11
加 0.75~2.7 μm 带通滤光片	0.006	—	—	—
加 1.1~2.7 μm 带通滤光片	0.012	—	—	—
加 1.78 μm 窄带滤光片	-0.010	—	—	—
加 3~14 μm 带通滤光片	—	0.012	-0.004	-0.018
加 5~14 μm 带通滤光片	—	—	-0.005	-0.008
加 8~14 μm 带通滤光片	—	—	—	-0.001

由表 3 可知,当数字电压表上的读数在 3.5~5.5V 时,系统的线性较好。

5. 杂散光的影响

为了尽量消除杂散光对测量结果的影响,我们将反射计内部的零件全部发黑。同时对 1.78 μm 、4 μm 、7 μm 、11 μm 四种波长,测量了光路中加与不加滤光片时样品反射率的相对变化。详见表 4。从表中可以看到,杂散光对测量结果的影响很小,可忽略不计。

五、结 论

1. 样品的反射率与入射光的偏振状态有关。对于本仪器,入射光的平均入射角略小于 4° ,可以认为,样品的反射率与入射光的偏振状态无关。

2. 本仪器要求样品的反射率不小于 90%、样品尺寸为 $\phi 35 \text{ mm}$ 。对于其他尺寸的样品可以用比较法测量。

3. 本仪器采用全反射式光学系统。因此,原则上可以测量样品在紫外、可见区的反射率。

致谢——在我们的研制工作中,得到了复旦大学章志鸣教授的帮助,又得到了上海光机所苏锴隆、刘海清、长春光机所王占清、上海技术物理研究所张文德、许步云、藏松才、徐青等同志的热情帮助,深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Bennett H. E., *J. Opt. Soc. Amer.*, **50** (1960), 1.
- [2] Hernicz R. S., *Appl. Opt.*, **12** (1973), 2454.
- [3] Petru F., *Opt. Acta*, **21** (1974), 293.
- [4] Bennett H. E., *J. Opt. Soc. Amer.*, **52** (1962), 1245; **53** (1963), 1089.
- [5] Kelsall D., *Appl. Opt.*, **9** (1970), 85.
- [6] Mielenz K. D. *Appl. Opt.*, **11** (1972), 2294.
- [7] 苏锴隆等, *光学学报*, **2** (1982), 57.

**PRECISION MEASUREMENT OF HIGH REFLECTANCE IN
THE INFRARED RANGE FOR SPECULAR MATERIALS
—JF-1 TYPE REFLECTOMETER**

XU SHIQIU, TAO FENGXIANG, CHEN WEITANG,
XUE KUIWU, ZHU HONGBING
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The JF-1 type reflectometer for measuring high reflectance in the infrared range of $0.65\ \mu\text{m} \sim 15\ \mu\text{m}$ is described. In the optical design the incident beam is reflected 4 times from the surface of a sample to increase measurement precision. In the electrical circuit, the integrated operational amplifiers with high gain are used to form amplifiers with various configurations to increase linearity and stability. This instrument can measure high reflectance of samples in the infrared range of $0.65\ \mu\text{m} \sim 15\ \mu\text{m}$ with better precision than 1×10^{-3} .