

10.6 微米高反射率绝对测量的研究

邵桂英 曹银花

摘要 介绍一种新的红外高反射率绝对测量方法。这是采用双光路和可转动 180° 的双球镜反射谐振腔光路,测量反射率高次方的光学方法。反射率测量准确度达到 5×10^{-4} ,重复精度好于 2×10^{-4} 。

一、前言

随着红外遥感、红外激光、辐射致冷、及激光加工技术的迅速发展,精确测量反射镜红外高反射率已是光学与激光应用中的一个很重要的方面。

二、高反射率测量原理

反射率测量从理论上讲是比较简单的,通常采用比较法,但是,对于高反射率($R > 98\%$ 以上)而言,要精确到千分之几的测量结果,用比较法是难以完成的。因为光的入射角、偏振状态、光斑在探测面上的方位、电子学系统的线性等因素都会给测量结果带来误差。为减少这些误差影响,须探求新的测量方法。

为了解决上述矛盾,我们采用了测量反射率高次方(R^N)的光学方法^[1]来精确测得反射率 R 。国外已有过这方面的报导^[2, 3],但测量程序都比较复杂,要几块样品进行绝对测量,解方程求得 R 值。我们确定采用一种比较简单的有一定自补偿性能的双球镜反射腔,八次反射的方法,样品尺寸和反射角都可以设计的比较小,只需要一块样品作绝对测量,可以得到较为理想的高反射率测量结果。双球反射镜系统测量高反射率原理如图1所示。

M_1 和 M_2 是曲率半径相等的球面反射镜,在曲率中心连线两侧各开 $2.5 \times 20\text{mm}$ 的长条狭孔, S 为被测样品的表面,置于两球面镜的共焦点处,曲率半径和两镜之间的距离应满足下列关系式^[1]:

$$L = r[1 - \cos(2\pi/N)] \quad (1)$$

式中 N 表示光线在被测样品表面反射的次数。当一束光成像在 M_2 的入射长孔处,射入双球镜内,在 M_1 上反射次数为 $N/2$,光在 M_2 上反射次数为 $N/2-1$ 次。最后成像光仍由原入射孔射出。

我们取 $N = 8$,按公式(1)计算出 $D = 78\text{mm}$ 时, $r = 266.3\text{mm}$ 。把待测样品表面置于 M_1 与 M_2 的共焦点处,则 M_1 作用由 M_2 代替,光在样品表面反射8次,在 M_2 上反射7次($N-1$),光最后由原入射孔出射,出射光的方向与不加样品时出射光的方向完全一致。

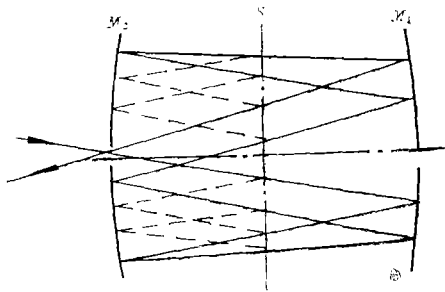


图1 测量 R^8 反射光路图

假设入射光的强度为 E_0 , M_1 反射镜反射率为 R_1 , M_2 反射镜反射率为 R_2 , 被测量样品反射率为 R , 不加样品时出射光强度为 $E_{.0}$, 加样品 S 时出射光的强度为 $E_{.}$ 。

$$\text{则 } E_{.0} = E_0 \times R_1^4 \times R_2^8 \quad (2)$$

$$E_{.} = E_0 \times R^8 \times R_2^7 \quad (3)$$

让 (3) / (2) 则有:

$$\begin{aligned} E_{.}/E_{.0} &= (E_0 R^8 R_2^7) / (E_0 R_1^4 R_2^8) \\ &= R^8 (R_2^4 / R_1^4) \end{aligned} \quad (4)$$

如果 $R_1 = R_2$, (同一次镀的反射镜) 则,

$$\begin{aligned} R^8 &= E_{.}/E_{.0} \\ R &= \sqrt[8]{E_{.}/E_{.0}} \end{aligned} \quad (5)$$

$E_{.}$ 与 $E_{.0}$ 是实测光强度。

然而, 很难使 $R_1 = R_2$, 这样测得的反射率值会带来系统误差, 为了消除它, 我们把双球镜旋转 180° , 让光束从 M_1 的长条孔入射, 重复上述测量过程。可以得到以下结果。

$$\begin{aligned} E'_{.}/E'_{.0} &= (E_0 \times R^8 \times R_1^7) / (E_0 \times R_2^4 \times R_1^3) \\ &= R^8 (R_1^4 R_2^4) \end{aligned} \quad (6)$$

让 (4) 式乘 (6) 式则有:

$$\begin{aligned} E_{.} \times E'_{.} / E_{.0} \times E'_{.0} &= R^8 (R_2^4 / R_1^4) \times R^8 (R_1^4 \times R_2^4) \\ &= R^{16} \\ R &= \sqrt[16]{(E_{.} \times E'_{.}) / (E_{.0} \times E'_{.0})} \end{aligned} \quad (7)$$

由 (7) 式可见, 测量反射率只与光强度有关, 为消除激光涨落的影响。采取了参考与样品光路同时采样相比的方法。该测量方法的优点是光斑分布在样品的整面上, 而不是一个点, 而且测量的反射率值不是八个点的算术平均值, 而是它们的乘积再开八次方的结果, 能代表被测样品大面积上的平均反射率。另外采用多次反射测量反射率可以明显地提高测量精度。测量反射率的相对误差为 $^{[2]}$ 。

$$\Delta R/R = 1/[\sqrt{2}(N-1)](\Delta E/E) \quad (8)$$

(8) 式表明反射率测量误差与光在反射面上反射次数成反比。我们采用的双球镜保持了多次反射提高测量精度的优点, 又克服了一般多次反射光路中样品放置精度要求过高的缺点, 容易操作。

三、测量装置结构

10.6 μm 高反射率精密测量装置由三部分组成: 第一部分是 CO_2 激光与He-Ne激光高压电源与循环水系统; 第二部分是光学机械系统; 第三部分是电子学控制、显示、打印输出系统。

图 2 是装置的光路示意图。光源由 CO_2 激光器与同轴指示光源He-Ne激光器组成。 CO_2 激光光斑为 $\phi 2\text{mm}$ 的平行光束。模式为单模。Ge分束片将 CO_2 激光分成参考与测量两路光, 测量光束入射到 M_3 与 M_4 双球反射镜系统中, 形成八次反射后, 由原入射孔处出射, 射入激光探测器。入射光的入射角设计成 7° , 在被测反射面上其余 7 次反射的入射角依次是, 3.74° , 1.60° , 6.13° , 6.98° , 3.70° , 1.70° , 6.14° 。样品尺寸为 $28 \times 32\text{mm}$, 八个光点分布在 32mm 宽的面上。另一种样品尺寸为 $\phi 35\text{mm}$ 。 M_3 、 M_4 两反射镜装在同一个正方

形镜座上，镜座中心为旋转台的轴线，轴线与 M_3 、 M_4 曲率中心连线相垂直。镜座中心安装空框型样品槽，被测样品反射面位于 M_3 与 M_4 的对称面处，与转动轴线重合。

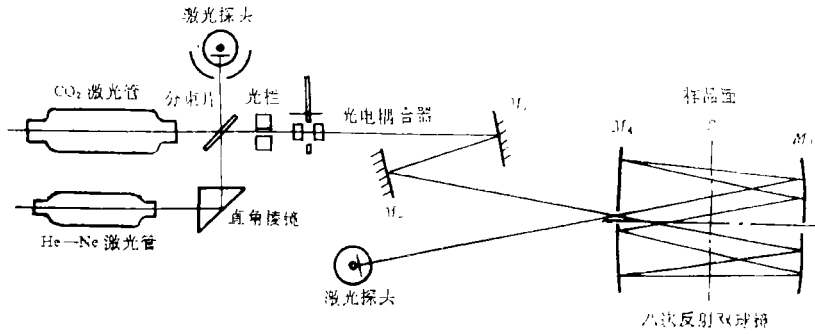


图2 反射率测量装置光路示意图

探测器选用中科院北京物理所专利产品 IP-210 型激光探测器，稳定可靠、温漂很小。

图3是电子学控制系统总体逻辑框图，电子学放大器采用全双光路结构，由于参考电路补偿，使得信号匹配精度得到提高。消除了光源起伏在测量中的影响，前放采用了斩波自稳零器件，消除前级温漂对测量的影响。专用计算机软件功能完善，采用了先进的实时自动校零技术和误差检测技术、有效地消除了直流回路中的零漂和光源噪声干扰。在数据处理中引入了时域多点平均技术，使信噪比得到改善。此外软件中设置了自检功能，可随时监视仪器的运行状况，确保仪器运行的可靠性和高效率。

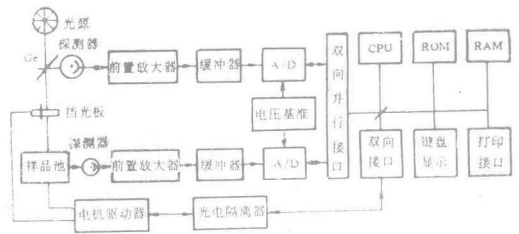


图3 电子学系统总体逻辑图

四、测量结果与误差分析

(一) 测量结果

为了考查测量装置的精密度和测量结果的可信度，我们对大量样品在不同时间做了多次重复测量。具体方法是每块样品插入、拔出测量三个反射率读数，样品再重新装夹，重复上述测量三次。经过二个月的测量考查，测量反射率重复精度好于 0.0002，均方差 $\sigma \leq \pm 0.0003$ 。

表1 铝反射镜反射率测量结果

次数 \ 读数	R_1	R_2	R_3	平均值	三次平均	偏差	均方差 σ
第一次	0.9847	0.9849	0.9847	0.9848	0.9847	+0.0001	1.8×10^{-4}
第二次	0.9847	0.9847	0.9847	0.9847		0	
第三次	0.9846	0.9843	0.9847	0.9845		-0.0002	
第一次	0.9849	0.9848	0.9844	0.9847	0.9848	-0.0001	1.46×10^{-4}
第二次	0.9848	0.9848	0.9848	0.9848		0	
第三次	0.9848	0.9848	0.9848	0.9848		0	

表2 银反射镜反射率测量结果

次数 \ 读数	R_1	R_2	R_3	平均值	三次平均	偏差	均方差 σ
第一次	0.9937	0.9936	0.9936	0.9936	0.9935	+0.0001	1.0×10^{-4}
第二次	0.9936	0.9935	0.9935	0.9935		0	
第三次	0.9935	0.9936	0.9935	0.9935		0	
第一次	0.9934	0.9935	0.9938	0.9936	0.9935	+0.0001	1.5×10^{-4}
第二次	0.9933	0.9933	0.9935	0.9934		-0.0001	
第三次	0.9935	0.9934	0.9933	0.9934		-0.0001	

(二) 误差分析

本测量系统误差来源主要有以下几方面。

(1) CO_2 激光强度起伏引起的误差

CO_2 激光强度起伏是随机的，我们采用了补偿电路控制光强的变化量，在光路中分出一部分光作参考光，每测一个值都用这个参考信号去除。除得的比值原则上是可以消除光源的起伏的。而且在采样中采用了实时自动校零和误差检测技术，再经过八次反射的光学方法和数据处理措施，使得光源强度起伏影响减少到万分之几。

(2) 光的偏振引起的测量误差

当测量光为完全偏振光时，偏振引进的误差按下式计算

$$\Delta R_{\text{偏}} = 1/2(R_s - R_p) \quad (9)$$

根据经典理论^[4]可以计算出不同入射角下的 R_s 与 R_p 。

$$R_p = r_p^2/E_p^2 = [(n - 1/\cos\phi)^2 + k^2]/[(n + 1/\cos\phi)^2 + k^2] \quad (10)$$

$$R_s = r_s^2/E_s^2 = [(n - \cos\phi)^2 + k^2]/[(n + \cos\phi)^2 + k^2] \quad (11)$$

式中 E_p 与入射面平行偏振光束的振幅， E_s 是与入射面垂直偏振光束的振幅， r_p 与 r_s 分别是平

表3

		2°	4°	6°	8°	10°	$\Delta R_{s0} = 1/2(R_s - R_p)$
Au	R_p	0.98985	0.98983	0.98980	0.98976	0.98970	9.5×10^{-6}
	R_s	0.98986	0.98988	0.98991	0.98995	0.99001	
Al	R_p	0.98055	0.98051	0.98045	0.98037	0.98026	1.8×10^{-4}
	R_s	0.98057	0.98061	0.98066	0.98074	0.98085	
Ag	R_p	0.99126	0.99125	0.99122	0.99118	0.99114	8.5×10^{-6}
	R_s	0.99127	0.99129	0.99132	0.99135	0.99140	

$\lambda = 10\mu\text{m}$, Au: $n = 7.41$, $k = 53.4$; Al: $n = 25$, $k = 67.3$. Ag: $n = 10.69$, $k = 69.0$

行与垂直偏振光束反射后的振幅。 n 为被测物的折射率, k 为消光系数, ϕ 为入射角。根据(10)和(11)式,我们计算了金、铝、银三种金属材料反射镜在 $\lambda=10\mu\text{m}$ 时的小角度入射时偏振反射。列于表3中。由表3列出的数据表明,当入射角很小时,偏振光引进的误差在万分之二左右,可忽略不计,本装置采用 7° 入射角。测量反射率可以视为垂直入射反射率。

(3) 系统线性对测量结果的影响:

我们采用双孔法检测系统线性^[5],在测量光出射处,加一个双孔光栏,改变光通量的变化,分别测量双孔光栏打开一个时的电压信号和全开时的电压信号,分别测出的电压为 V_1 、 V_2 ,全开时测得的值为 V_{13} ,从而计算出线性偏差为 1.9×10^{-3} 。再经八次反射后,这项偏差小于万分之三。

(4) 放大系统稳定度与探测器灵敏面均匀性引进的误差

本测量装置采用激光探测器,最大温漂小于 10^{-4} 。探测面的不均匀度用光学方法保证了光斑在每次测量中落入同一探测区内,光斑面积小于探测器面积,在测量中几乎不引起偏差。对放大器的温漂和稳定度进行了实测,在一小时内,最大漂移量为 $\pm 0.14\%$,经过八次反射后,稳定度变化量小于万分之几。

(5) 样品装夹引进的误差

样品表面不平度及镀膜不均匀性和装夹样品的松紧,会造成反射面微小变化量,引起微量误差。只要每次样品装的认真,一般测量偏差都很小。

(6) 测量装置精度分析

综上所述误差来源分析和大量实验数据(表1、表2)表明:本测量装置的重复精度好于0.0002。

装置测量准确度用系统误差和测量精密度来定义,对测量数据离散状态,取可信系数 C 为3,于是装置测量准确度可以表示为 U

$$U = \sqrt{\Delta R_{\text{系}}^2 + (3\sigma)^2} \quad (12)$$

从(8)式可以推导出系统测量误差

$$\Delta R_{\text{系}} \approx [1/\sqrt{2}(N-1)][(\Delta E/E)R]$$

其中 $\Delta E = \sqrt{\Delta E_{\text{线偏}}^2 + \Delta E_{\text{偏振}}^2}$

测量准确度达到 $3 \sim 5 \times 10^{-4}$ 。反射率越高,测量系统误差越小。

五、结 束 语

1. 本测量装置采用双球镜系统,实现多次反射,测量程序简单,体积小、精度高、减轻了对电子学的高要求,属于绝对测量方法,不需要标准样品校定。

2. 电子学系统采用全双光路结构,消除了激光起伏对测量的影响。若增加一个红外单色仪,可以研制成红外全波段的反射测量仪。

参 考 文 献

- [1] 王占清; 激光与光学, 1980年, 第四期 52页
- [2] D. Kelsall; Appl. Opt., (1970), No. 9, 85
- [3] R. S. Herez, D. P. Diwitt; App. Opt., (1973), No. 12, 2454
- [4] F. A. Jenkins, H. E. White; Fundamentals of Physical Optics, (1937), 433
- [5] 徐世秋等; 红外研究, 1984年, 第三期, 8页

A Study of Absolute Measurement of High-Reflectance at $10.6\mu\text{m}$

Shao Guiying, Cao Yinhua

Abstract

This paper presents a new method of absolute measurement for infrared high-reflectance. Double beam are used and reflecting cavity of two spherical mirrors are constructed and rotated by 180° . Measuring beam is reflected light times on the surface of sample. The accuracy of measurement reflectance is 5×10^{-4} and the precision better than 2×10^{-4} ,