

高反射率测量中的测量精度与误差分析

庄大奎 黄永楷 杨天立

(中国科学院上海光机所)

摘要: 本文介绍了在研制红外高反射率测量仪过程中分析测量精度和误差的方法, 使其总体性能达到并超过了预期的研制要求。

The measuring precision and analysis error of high-reflectivity-measuring instrument

Zhang Dakui, Huan Yongkai, Yang Tianli

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: A description is given of a method of analysis measuring precision and instrumental error in developing infrared high-reflectivity-measuring instrument. The overall performance achieved and exceeded expectations.

红外高反射率测量仪, 以光学共振腔结构为基础, 采用激光光源双光路系统、积分球技术以及锁相放大电路等技术措施, 仪器测量精度达 $4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ 。

一、测量原理与电路结构

入射于光学共振腔内的光线可用 $ABCD$ 光学矩阵表征。在满足离轴共振方程条件下, 光线在共振腔内经几次来回反射, 从入射口处射出腔外。设入射光束的光强为 I_0 , 则出射光束的光强 I_n 为:

$$I_n = KI_0 R_1^{n-1} R_2^n \quad (1)$$

式中, K 为系统因子; R_1 、 R_2 分别为两镜面的反射率。若移开反射镜 M (见图1), 则光束经过一次反射以后的光强为:

$$I_1 = K' I_0 R_2 \quad (2)$$

若 $K = K'$, 可求出:

$$R_1 \cdot R_2 = (I_n / I_1)^{\frac{1}{n-1}} \quad (3)$$

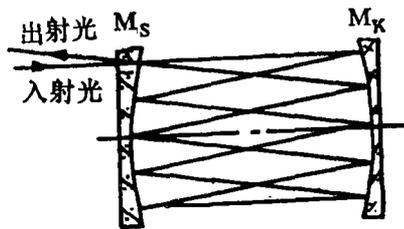


图1 光线在光学共振腔内的行径

若 R_1 已知(标准镜), 则可求出相对反射率值 R_2 。若 R_1 、 R_2 均未知, 则可以三块膜片两组组合, 进行三组测量, 通过解方程组, 分别求得 R_1 、 R_2 、 R_3 的绝对反射率数值。其中 R_1 的表示式为:

$$R_1 = \left[\left(\frac{I_n}{I_1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \left(\frac{I_q}{I_1} \right)^{\frac{1}{q-1}} \middle/ \left(\frac{I_p}{I_1} \right)^{\frac{1}{p-1}} \right]^{1/2} \quad (4a)$$

考虑双光路“归一” R 值为:

$$R_1 = \left\{ \left(\frac{I_N/I_0^1}{I_1^1/I_0^1} \right)^{\frac{1}{N-1}} \left(\frac{I_q/I_0^2}{I_1^2/I_0^2} \right) \middle/ \left(\frac{I_p/I_0^3}{I_1^3/I_0^3} \right) \right\}^{1/2} \quad (4b)$$

式中, N 、 q 、 p 分别代表各组测量中的来回反射次数, 上下脚注表明不同时刻单多次反射的测量值。 R_2 、 R_3 值亦依此类推。图2为总体系统和电路方框示意图。调节腔间距可满足共振条件。

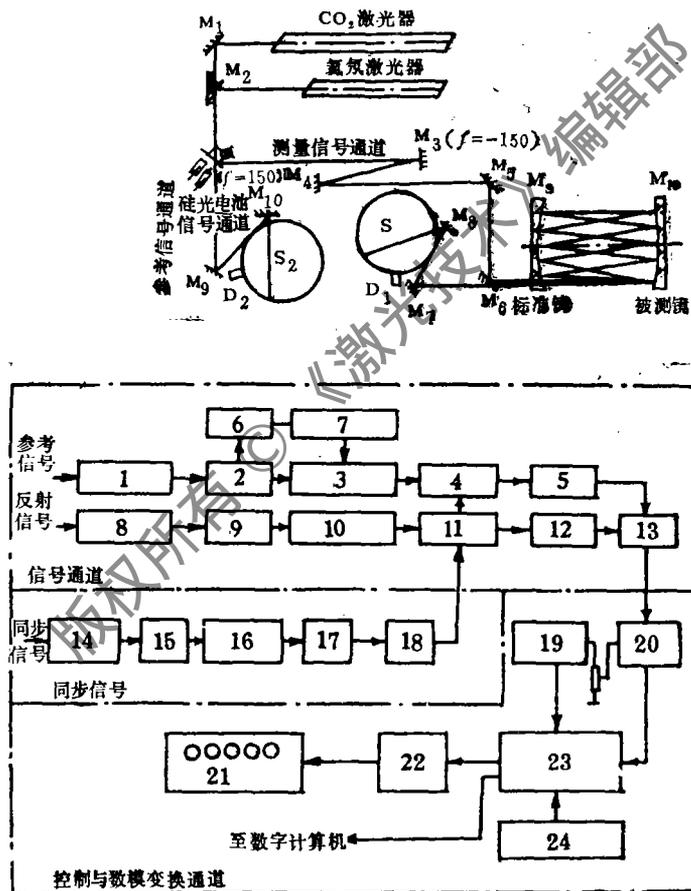


图2 测量系统与电路方框示意图

- 1—红外探测器 2—带通滤波 3—增益选择放大 4—相敏检波低通滤波 5—取样保持
 6—幅度甄别 7—增益开关控制 8—红外探测器 9—带通滤波 10—增益选择放大
 11—相敏检波低通滤波 12—取样保持 13—模拟选通 14—硅光电池接收器 15—前置放大
 16— 90° 移相器 17—整形 18—输出放大 19—基准电压 $V_R = -4.096\text{V}$
 20—比例加法器 21—数码显示 22—译码 23—14位二进制模数变换器 24—测量控制器

二、测量精度分析

仪器设计精度指标为 $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ ，选取读数的有效位数为四位，第五位为参考值。已测得的大量数据表明，仪器的重复精度优于万分之一（标准误差值）。这里我们重点讨论影响仪器绝对精度即准确度的几种主要因素及其检验绝对精度的主要方法。

考察反射率 R_1 值的精度，并注意到，仪器设计时已采用同时刻采样的双光路系统归一法，不难求得其误差为：

$$\delta R_1 = \frac{1}{2(n-1)} \left[\left| \frac{\delta I_N}{I_N} \right| + \left| \frac{\delta I_1^1}{I_1^1} \right| \right] + \frac{1}{2(q-1)} \left[\left| \frac{\delta I_q}{I_q} \right| + \left| \frac{\delta I_1^2}{I_1^2} \right| \right] + \frac{1}{2(p-1)} \left[\left| \frac{\delta I_p}{I_p} \right| + \left| \frac{\delta I_1^3}{I_1^3} \right| \right] \quad (5)$$

式中，上下脚码分别为不同单次测量标记。可见 R_1 的误差来源于六项测量参数的误差值， δI_N 、 δI_q 、 δI_p 、 δI_1^1 、 δI_1^2 、 δI_1^3 ，并与反射次数 $2(N-1)$ 、 $2(p-1)$ 、 $2(q-1)$ 成反比。因此，为了减少测量误差，增加反射次数是提高测量精度的有效途径。对膜层不均匀性所引起的测量精度误差已包括在偶然误差之中（因样品放置位置随机），其系统误差来源于下列诸方面：

1. 光源

采用双光路同时刻采样锁相技术系统，减少了对光强稳定性的要求。若光强起伏较大，会使测量动态范围扩大，并减少时间常数（快速取样）。这样既增加了系统的等效噪声带宽，也加大了系统漂移，从而影响仪器测量精度。为此，我们采取若干稳定措施，使得单模激光输出短期(3min)涨落小于1.5%。考虑到 n 次反射对反射率的平均，光源起伏的影响已小于 1×10^{-4} 。

2. 光路系统

(1) 共振腔调整精度的影响 在测量过程中，必须注意光束出入共振腔楔槽时不被部分遮掩，由这须共振腔长 d 的调整精度保证。

光学共振腔可由薄透镜序列矩阵来处理，若一束光以某一 ξ 角离轴射入腔距为 d 的球面共振腔，并在腔体内来回反射 n 次，则光线离开腔体时与轴相距为 X_n ，与轴成 ξ_n 角的矩阵表式为：

$$\begin{pmatrix} X_n \\ \xi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^n \begin{pmatrix} X_0 \\ \xi_0 \end{pmatrix}$$

其 n 次幂又可表为：

$$\begin{pmatrix} X_n \\ \xi_n \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin \theta} \begin{pmatrix} A \sin \theta - \sin(n-1)\theta & B \sin \theta \\ C \sin \theta & D \sin \theta - \sin(n-1)\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ \xi_0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中， θ 由下式决定其实数（稳腔）

$$\cos \theta = \frac{1}{2}(A+D) \quad (7)$$

由此得：

$$X_n = \frac{1}{\sin\theta} \{ [A \sin\theta - \sin(n-1)\theta] X_0 + B \sin n\theta \cdot \xi_0 \} \quad (8)$$

对于 $r_1 = r_2 = r$ 的凹-凹腔, 其 A 、 B 、 C 、 D 矩阵为

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{2d}{r} & 2d - \frac{2d^2}{r} \\ -\frac{4}{r} - \frac{4d}{r^2} & 1 + \frac{4d^2}{r^2} - \frac{6d}{r} \end{pmatrix}$$

由此计算 X_n 的变化:

$$\begin{aligned} \Delta X_n = & \frac{4}{r \sin^2\theta} \left(1 - \frac{d}{r} \right) \left\{ \left[\sin(n-1)\theta - \left(1 - \frac{2d}{r} \right) \sin n\theta \right] \cdot \text{ctg}\theta \right. \\ & + n \left(1 - \frac{2d}{r} \right) \cos n\theta - (n-1) \cos(n-1)\theta \left. \right\} X_0 + 2d \left(1 - \frac{d}{r} \right) \\ & \cdot \left[n \cos n\theta - \sin n\theta \cdot \text{ctg}\theta \right] \xi_0 \left\{ \Delta d + \frac{1}{\sin\theta} \left\{ \left(2 - \frac{4d}{r} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot \sin n\theta \cdot \xi_0 - \frac{2}{r} \sin n\theta \cdot X_0 \right\} \Delta d \right. \end{aligned} \quad (9)$$

对10m腔, $N=20$, ΔX_n 允许变化范围为0.5mm, 则 Δd 为0.46mm。

同样对于平凹腔 ($r_1 = 10\text{m}$, $r_2 = \infty$), $N=20$ 亦可算得 $\Delta d = 0.5\text{mm}$ 。

可见, 对于各种腔型, 满足光线出入共振腔引入槽不被部分遮拦的条件, 对共振腔腔距的调整精度要求较低。这给机械设计加工带来较大方便, 是本方案的优点之一。

(2) 大气吸收的影响 由于作多次反射与单次反射测量时光程不等, 因此对大气吸收亦异, 从而带来测量系统误差, 如对凹-凹腔有:

$$d = r \left(1 \pm \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (10)$$

式中, $\theta = \frac{2\pi k}{N}$, 对10m腔 $N=20$, 则 $d = 123\text{mm}$ 。可计算得多次反射增加的光程为2.5m,

若以大气对 $10.6\mu\text{m}$ 的吸收系数 $\alpha = 2.4 \times 10^3/\text{km}$ 计算, 得: $\Delta I/I_0 = 6 \times 10^{-6}$ 。显见, 在正常使用条件下, 该项误差可忽略。

(3) 偏振光束对于反射率的影响 金属对偏振光束反射本领可以下式表示:

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{I_p^2}{E_p^2} = \frac{(n - \cos\varphi)^2 + k_0^2}{(n + \cos\varphi)^2 + k_0^2} \\ R_s &= \frac{I_s^2}{E_s^2} = \frac{(n + \cos\varphi)^2 + k_0^2}{(n - \cos\varphi)^2 + k_0^2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, E_p 为与入射面平行偏振光束的振幅, E_s 为与入射面垂直偏振光束的振幅, I_p 、 I_s 分别为平行和垂直偏振光束经过反射以后的振幅, n 为折射率, k_0 为消光系数, φ 为入射角。

对于金膜, 波长 $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ 处的折射率 $n = 7.41$, $k_0 = 53.4$, 当 $\varphi = 3^\circ$ 时, 可算出:

$$R_p = 0.989843 \quad R_s = 0.989871 \quad R_{p-s} = 0.989857$$

R_p 与 R_s 的百分偏差 $\frac{R_p - R_s}{R} = 1.5 \times 10^{-6}$ 。可见对于小角度入射，偏振对反射率影响甚微。

(4) 积分球的影响 一束光射入积分球内，除直接投射面以外，球壁内任意一点的照度为：

$$E = \frac{\rho \Phi}{4\pi R^2 [1 - \rho(1-f)]}$$

式中， ρ 为涂层绝对光谱漫反射率， f 为球几何尺寸与开口面积比， R 为球内壁。事实上，由于涂层工艺缺陷，当光束单次与多次反射后射入球体内，约有 $5^\circ \sim 14^\circ$ 的夹角变化，球内表面照度将因光束照明位置不同而产生差异，最大读数误差为 $\pm 1.8\%$ 。采用四象限伺服系统，自动调整反射镜使其固定照于球内壁某一点上，可使读数误差值减少到 $\pm 2.2 \times 10^{-4}$ ，换算为反射率测量误差 $< 3 \times 10^{-5}$ 。

3. 测量系统

(1) 线性度 a. 仪器总体线性。采用小孔法可以检测测量系统的总体线性，光强变化可以从两方面实现：①调节激光放电电流改变输出功率；②调限制激光束通量的小孔数目（四孔不同组合），在光强变化动态范围为16倍下，测得接收系统的平均线性偏差为 2×10^{-3} ，考虑到多次反射对反射率的平均，该项误差小于万分之一。b. 系统漂移。增益变化、相位变化、零点漂移等将引起系统漂移。

仪器使用热释电探测器，其复阻抗为：

$$\dot{Z} = \frac{R - j\omega CR^2}{1 - \omega^2 R^2 C^2}$$

复相角： $\varphi = \text{tg}^{-1} \omega CR$ 。

相变化量 $\Delta\varphi = \frac{\omega R}{1 + \omega^2 R^2 C^2} dC + \frac{CdC}{1 + \omega^2 R^2 C^2} dR$

式中， ω 为角频率， R 为阻抗， C 为容抗。

仪器调制频率 $f = 226\text{Hz}$ ， $C = 50\text{pF}$ ， $R \approx 10^3 \Omega$ 。热释电探测器的热释电电流为：

$$i_s = AP \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中， A 为垂直于自发极化 P 的晶体有效面积， P 为热释电系数， T 为温度。该式表明，热释电电流随温度的变化成比例。环境温度的变化一般表现为漫漂，它与调制光源引起辐照温度变化的频率无关，经锁相技术处理后，可免除接收器对温度的反应。

电路设计带滤波器的 Q 值较低，使滤波网络的温漂对增益影响较小，仪器采用晶振分频控制斩波器，调制频率稳定度优于千分之一，保证了电路的稳定性。计算表明若频率变化1%、温度变化 10°C 下的相漂也仅为 10^{-5} 量级。

由于选用激光光源，信噪比较高，采用锁相技术压缩等效噪声带宽(0.83Hz)，从而又改善了信噪比，对于来自外界的干扰信号均被较大程度地抑制，仪器本身有零点补偿措施，故而系统零漂较小。

从公式(4)可知，反射率值是双光路系统“归一”比值，它的形式为：

$$k = \frac{I_N/I_0}{I_1/I_0}$$

式中, I_1 、 I_n 为单次、多次反射后的光强测量值, 使用同一信号通道, I_0 、 I_0' 分别为多次和单次同时刻测量的光源强度值, 使用另一参考通道, 二路系统可能有相对漫漂移, 但是计算“归一”比值, 在很大程度上抵消了漫移的影响。

大量数据测试表明, 测量值离散度较小, 说明系统快漂并不严重, 在光路不变条件下, 重复测量某一镜面反射率, 经50余组每组10次的测试, 其均方差小于 3×10^{-4} , 每组方差 $\leq 1 \times 10^{-4}$ 。

三、验证绝对反射率方法

为进一步验证本仪器的准确度, 我们采用另一种测量方法予以相互校对, 该方法的要点是将共振腔变为折叠式共振腔, 待测片即是该折叠平板(见图3)。当共振腔为非折叠腔时, 入射光经 n 次反射后 $I_1 = I_0 R_1^n R_2^{n-1}$, 若经折叠腔 n 次反射后 $I_2 = I_0' R_1^n R_2^{n-1}$, 考虑到光强归一效应, R_n 为:

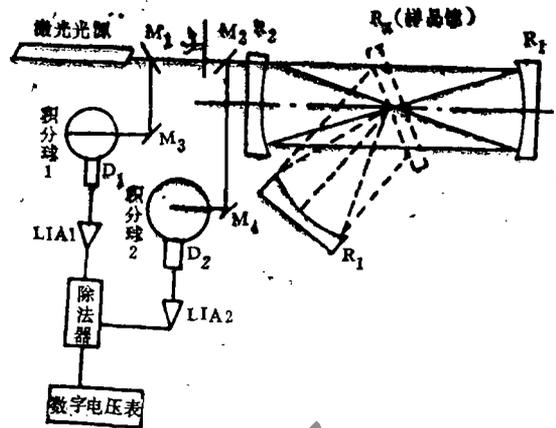


图3 折叠腔式绝对反射率测量方法示意图
LIA—锁相放大器 D_1 、 D_2 —接收器
 M —分束镜 R —反射镜

$$R_n = \left(\frac{I_2}{I_0'} \right)^{1/n} \left(\frac{I_1}{I_0} \right)^{n-1}$$

四、结 论

用三块镀Al膜片, 其中二块曲率半径为10m, 第三块为平板膜, 调节反射次数为 $N = 25$, 并且将平板膜置于折叠腔中进行校验, 获得测量结果如下(波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 处),

R_1 (10m)	R_2 (10m)	R_3 (平板)	R_3 (折叠腔中)
0.98553	0.98459	0.98526	0.98537
0.98560	0.98455	0.98534	0.98536
0.98555	0.98456	0.98526	0.98526
0.98559	0.98455	0.98532	0.98527
0.98557	0.98436	0.98517	0.98528
0.98579	0.98451	0.98518	0.98520
0.98561	0.98465	0.98528	0.98512
0.98565	0.98458	0.98512	0.98522
0.98566	0.98457	0.98538	0.98530
0.98549	0.98462	0.98522	0.98529
$\bar{R}_1 = 0.98560$	$\bar{R}_2 = 0.98455$	$\bar{R}_3 = 0.98525$	$\bar{R}_3 = 0.98527$
$\sigma_{n-1} = 8.1 \times 10^{-5}$	$\sigma_{n-1} = 7.5 \times 10^{-5}$	$\sigma_{n-1} = 7.9 \times 10^{-5}$	$\sigma_{n-1} = 7.2 \times 10^{-5}$

详细论证与大量测试表明,仪器的测量精度已达到或超过预定的设计指标,

绝对精度: $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$

重复测量精度: $\leq 10^{-4}$

参加项目的还有孙晶矾、柴洪钧、孙伯荣、施一范、陶瑞天等同志,作者一并致谢。

参 考 文 献

- [1] H.Kogelnik, Bell Syst.Tech.J.,1965, Vol.44, P. 455.
- [2] D. Kelsall.,Appl. Opt.,1970, Vol. 9, P. 85.
- [3] 10.6微米高反仪研制组,《仪器仪表学报》,1982年,第3卷,第2期,第267页。
- [4] 黄永楷、庄大奎,《光学学报》,1982年,第2卷,第1期,第67页。
- [5] F. A. Jenkins, H. E. White., Fundamental of physics of optics, 1937.

*

*

*

作者简介:庄大奎,男,1941年7月出生,助理研究员。从事激光物理研究。

杨天立,男,1935年10月出生,高级工程师,室主任。从事激光电子学研究。

收稿日期:1988年10月29日。

· 简 讯 ·

美国国家航空航天局在发射台上安装光纤视频系统

数百个光纤视频、音频和信息数据传输系统将在佛罗里达州的肯尼迪宇航中心使用,监测发射台上的航天飞机运载工具。宇航局与加利福尼亚州Chatsworth的PCO公司签订了一项合同,由公司提供300台PCO-5000型光纤数据传输装置,今后再有选择地购买额外的300台。合同总价值估计为160万美元。

据PCO公司消息来源说,光纤系统将补充目前用于肯尼迪宇航中心的现有宽带铜质电缆传输线路。一经安装之后,PCO-5000型系统在预先发射前倒数时间当中,就将监测有效负载和传送从不同传感器来的遥测信号。PCO公司计划本月开始提供生产设备。

译自L. F. /E-O., 1988, Vol. 24, No.8, P.10.

张贤义 译 刘建卿 校

相干公司和光谱物理公司签署许可证合同

相干公司和光谱物理公司最终结束了他们的长达4年的专利纷争,按照新签订协定的条款,加州帕洛阿尔托的相干公司同意加州圣何塞的光谱物理公司在全世界范围内使用它的金属陶瓷激光器专利权,光谱物理公司将为此付出200万美元的费用。协定还要求光谱物理公司准许相干公司使用有关用于冷却金属陶瓷等离子管的金属圆盘铜焊技术。

译自L. & O., 1988, Dec., P.8.

张贤义 译 刘建卿 校