

远紫外及真空紫外反射率测量的研究

庄大奎 施懿范 刘亚淑 杨天立 刘 华

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了一种采用成象式折叠腔测量真空紫外区域绝对反射率的方法,测量准确度为 $\pm 5 \times 10^{-3}$, 精度为 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 。

关键词: 绝对反射率, 真空紫外。

一、引 言

远紫外及真空紫外区域反射率的测量对于紫外激光的研制、紫外光学薄膜技术、无机材料的研究等具有推动作用。本文报道了一种采用成象式折叠腔结构, 多次反射、双光路补偿以及锁相放大技术等综合措施, 在测量波段 110 nm ~ 300 nm 范围内, 获高精度的测量结果。

二、测量原理及总体结构

该系统采用改进的 1:1 成象折叠式 white 腔^[1~2]。图 1 示出了由镜 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 等组成的曲率半径相等的共焦腔, 在 S_0 处的光, 离轴入射共振腔体上建立一个多次反射系统, 光被物镜 M_1 、 M_3 交替成象于场镜 M_2 上, 对应象为 F_1 、 F_2 、 F_3 ... 落点代表光束来回穿过腔体的次数。反射次数及点的位置与光线初始入射条件和共振腔的调整有关。设入射光束强度为 I_0 。经过腔体后的出射光强 I_n 为:

$$I_n = I_0 \left(\frac{1}{R_2} \right) (R_1 R_2^2 R_3)^n \quad (1)$$

式中, R_1 、 R_2 、 R_3 分别代表镜 $M_1 M_2 M_3$ 的反射率, n 代表落于镜 M_1 、 M_3 上的次数, 令腔体的平均反射率为 \bar{R} , 则

$$\bar{R} = (R_1 R_2^2 R_3)^{1/4} \quad (2)$$

$$\log I_n = 4n \log \bar{R} + C \quad (3)$$

显然 $4n$ 代表光束在腔体内总反射次数, 常数项 C 值与入射光强有关。若腔体插入待测镜 M_4 , 并改变为折叠腔式(见图 2)原出入光束的光学行径将保持不变, 此时光束出射强度为 I'_n

$$I'_n = I_0 \frac{1}{R_2} \bar{R}^{4n} R_4^{4n} \quad (4)$$

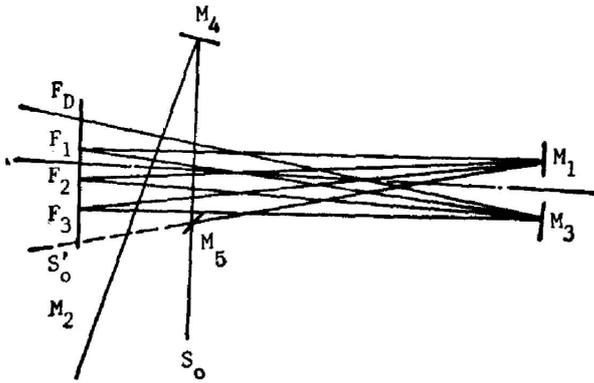


Fig. 1 Imaging white cavity

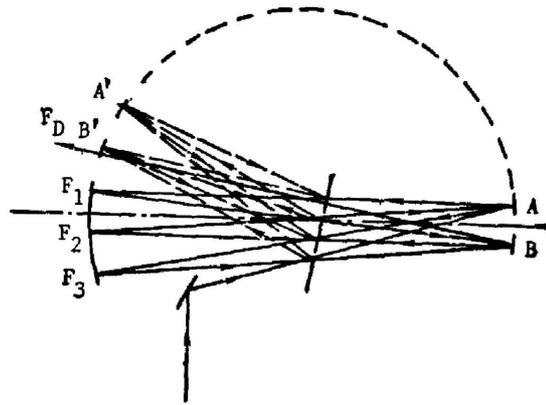


Fig. 2 Folding cavity

由此可得:

$$R_4 = (I_n / I_n)^{4(n/n)} \quad (5)$$

由(5)式可见待测镜 R_4 值与腔体反射镜的反射率值无关, 腔体在反射率测量中仅起参考作用, 而且测量结果为绝对反射率值。光束入射至待测镜片的入射角调节范围较宽, 约为 $5^\circ \sim 70^\circ$ 。

测量系统的总体结构示于图 3。壁稳氩弧光源经过掠入式光栅谱仪衍射分光以后经过狭缝 S_0 射入光度测量系统。入射光束先经斩波器调制为交变光讯号, 并被镜 M_5 分为二束光, 一部分光束穿过镜 M_5 , 落于镜 M_6 上, 经 M_6 会聚的光束通过透射样品池落于探测器

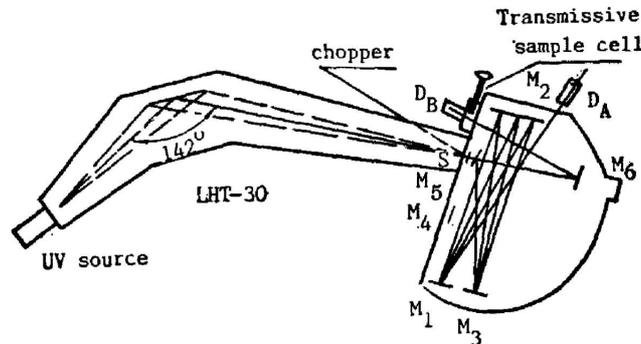


Fig. 3(a) Two-beam system configuration

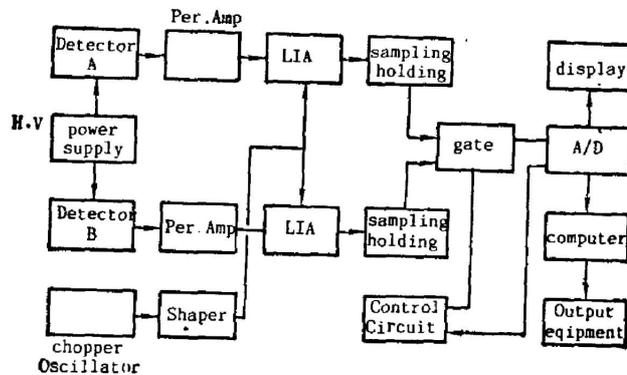


Fig. 3(b) Block diagram of the detection system

D_B 上, D_B 接收的信号可以作为透射信号通道或反射参考通道信息输入电路测量系统, 另一部分被 M_5 反射的光束进入腔体, 经多次来回反射后由探测器 D_A 接收作为反射信号通道或透射参考通道的信息进入测量系统。测量电路系统框图示于图 3(b) 由探测器光电转换获得电讯号经前置放大器取最佳匹配放大, 并对通带外的噪声初步滤除, 然后分别送至两台锁相放大器进行相关检测、放大, 输出的模拟信号同时被取样和保持。两组模拟量由控制器控制, 先后用同一模数变换器变换成数字量送入计算机进行数据处理, 最终打印输出结果。

三、系统分析

本实验方案从设计思想上力求结构合理、方法简便, 由于系统环节较多、技术难度较大, 因此要取得较高的测量精度需考虑下述措施:

1. 光源稳定性和多点测量技术。从测量误差分析, 解式(5)可得最大百分误差:

$$\left| \frac{\delta R_4}{R_4} \right| = \frac{1}{4n} \left\{ \left| \frac{\delta I'_n}{I'_n} \right| + \left| \frac{\delta I_n}{I_n} \right| \right\}. \quad (6)$$

因此提高测量精度的主要途径应是提高光源稳定性, 本系统选用具有电流反馈系统的氩离子光源, 其工作电流稳定度为千分之一。其次应适当提高反射次数。由于紫外光源辐射强度比可见光源较弱, 接收器灵敏度随波长变短而下降, 紫外区域光损耗增大等诸因素, 因此不能无限制增加反射次数, 但可以适当选择数次。

2. 为进一步减少光源不稳给测量系统带来的影响, 系统采用“双光路归一”参数补偿方法。现以 $n=2$ 、光束来回 $4n=8$ 次为例说明。

设光束经腔体来回反射后的出射光强为:

$$I_1 = I_0^A R_1^2 R_2^2 R_3^2. \quad (7)$$

当待测片置入腔体并转为折叠腔后的光束出射光强为:

$$I_2 = I_0^A R_1^2 R_2^2 R_3^2 R_4^2. \quad (8)$$

与测量 I_1 、 I_2 值的同时分别测量参考信号光强:

$$I_1 = I_0^B R_6, \quad I_2 = I_0^B R_6. \quad (9)$$

其中 I_0^A 、 I_0^B 分别代表经镜 M_5 分束后的二束光强, I_0^A 、 I_0^B 代表不同时刻的二束光强。由归一比可得:

$$R_4 = \left[\frac{I_1/I_1'}{I_2/I_2'} \right]^{\frac{1}{8}}. \quad (10)$$

3. 为使腔体折叠前后光学行径不变, 应注意待测镜置入后的共振腔长保持不变。若一束光离开光轴为 X_0 以某一角斜率为 ξ_0 离轴射入腔长为 d 的共振腔体内时, 利用薄透镜序列光线矩阵可描述光线在腔内经 N 次来回后的矩阵表式为^[3]:

$$\begin{bmatrix} X_N \\ \xi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^N \begin{bmatrix} X_0 \\ \xi_0 \end{bmatrix}.$$

其 N 次幂为,

$$\begin{bmatrix} X_N \\ \xi_N \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin \theta} \begin{bmatrix} A \sin N\theta - \sin(N-1)\theta & B \sin N\theta \\ C \sin N\theta & D \sin N\theta - \sin(N-1)\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ \xi_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 θ 由下式决定

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

由(11)式解得

$$X_n = \frac{1}{\sin \theta} \{ [A \sin N\theta - \sin(N-1)\theta] X_0 + B \sin N\theta \cdot \xi_0 \}. \quad (12)$$

对于曲率相等的凹-凹腔,其 A 、 B 、 C 、 D 矩阵表式为:

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{2d}{r} & 2d - \frac{2d^2}{r} \\ -\frac{4}{r} + \frac{4d}{r^2} & 1 + \frac{4d^2}{r^2} - \frac{6d}{r} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由此计算 X_N 的变化

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

计算结果表明,对于 0.36 米的腔 $4n=8$ 次若落于探测器接收面元允许变化范围小于 0.1mm,则腔长变化量应不大于 0.75 mm。这在调整技术中是可以做到的。

4. 仪器的信噪比及其改善。为拾取信号,光源辐射强度应足够强。本系统采用的光源为 1kW 壁稳氩弧光源,基本满足要求。由于紫外光源强度分布随波长变短而急剧下降,光电接收器波长响应也随之降低,光学元件损耗增大等因素,最终转换的电信号的信噪比较低。为了改善信噪比,系统采用相关检测锁相放大技术,并且在设计时考虑下列因素:动态范围与共模抑制、工作频率、线性度、增益稳定性与系统漂移、阻抗匹配等。

5. 采用数字计算机系统进行处理,不仅可大大简化测量手续,而且可长期多次测量平均以提高测量精度。

四、测量精度分析及实验结果

1. 检测系统的非线性

由于测量系统在真空紫外及远紫外区域,我们采用调节光束在腔体内来回反射次数,以验证不同反射次数条件下的反射率测量值。实验对同一块样品在八次及四次反射条件下分别作了反射率测量,以进行自洽校对,结果(见表 1)表明,两者很接近。此外,我们对可见、紫外、远紫外区域用多孔法检测了测量系统的非线性,当入射光强度变化 22 倍时,系统平均线性偏差为 1.4×10^{-3} 。最大线性偏差为 1.6×10^{-3} 。

Table 1

反射次数	反射率值	平均值
八次	0.8669, 0.8670, 0.8671, 0.8671, 0.8670	0.8670
四次	0.8666, 0.8673, 0.8668, 0.8673, 0.8671, 0.8667	0.8669

2. 调整精度的影响

如前述,经精确反复调整,将被测镜置入和退出腔体的两次过程中,用肉眼观察已分辨不出出射光束位置的变化。

3. 系统漂移及稳定度

系统漂移可能来自增益变化、相位变化、零漂等。由于系统带通滤波器 Q 值选择较低,滤波网络的温漂对增益影响较小。仪器采用深度负反馈,则其线性度和增益稳定性均可得到保证,仪器零漂亦较小,采用的音叉调制器,调制频率为 90 Hz、频率稳定度 10^{-5} 级,由此计及即使温度变化 10°C ,相漂亦小于 10^{-5} 量级。

对两路测量系统进行长期稳定性试验表明,在约 40 分钟观测时间内,进行 40 次取样(每隔一分钟取样一次),其读数稳定性为 10^{-4} 量级。

4. 杂散光的影响

对于部分透射的反射膜片,已考虑到防止第二界面反射光的干扰。实验中可利用 He-Ne 激光器监视光路的调整予以解决。对于其它的光干扰,实验用加试干涉滤光片来判断其大小。例如对于 2756 \AA 实测表明杂散光影响为 1×10^{-3} 。

5. 光偏振效应

反射膜对不同偏振光在不同入射角下反射率不同。本系统采用的是自然光,因此给出的是两种偏振光的平均值(入射角小于 10°)。

上述几种可能出现的系统误差对仪器的测量结果无需进行修正,均在设计精度(准确度: $\pm 5 \times 10^{-3}$)以内。

实验实例:

例一:对一块 Al 膜在五天内进行九组测量,每组十次,波长 3000 \AA 。其平均反射率值为: \bar{R} : 0.8681、标准方差: $\sigma_{n-1} = 1.95 \times 10^{-4}$ 。

例二:对一介质膜片测量不同角度下的反射率:

波长 (nm)	300	290	280	270	260	255	250	255
反射率	0.9826	0.9867	0.9836	0.9714	0.9022	0.6721	0.4362	0.5019

例三:入射角 50° 时,不同波长下的反射率值:

波长 (nm)	300	290	280	270	260	250
反射率	0.8563	0.9083	0.9733	0.9749	0.9654	0.9207

例四:真空紫外及远紫外区域 Al+保护膜反射率值:

波长 (nm)	110	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
反射率	0.8343	0.8101	0.8333	0.8065	0.7126	0.7542	0.8077	0.8430	0.8594	0.8666	0.8645

综上所述可见:

1. 仪器测量精密度 $\pm 5 \times 10^{-4}$ 、准确度 $\pm 5 \times 10^{-3}$ 。
2. 仪器具有测量不同入射角度绝对反射率值和测量透射率的功能。
3. 仪器的真空度为 1×10^{-5} Torr, 测量波段范围为: 110~300 nm。

在研制过程中,曾得到黄永楷、邹海兴、袁幼龙、王秀芬、孙国华等同志在方案论证、光学和机械设计、监护光源、提供测试样品等方面的热情帮助和支持,作者表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] J. U. White; *J. O. S. A.*, 1942, **32**, 285.
[2] O. Arnon, P. Baumeister; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 18 (Sep), 2913.
[3] H. Kogelrik, T. Li; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 10 (Oct), 1550.

A study of reflectivity-measurement in far ultraviolet and vacuum ultraviolet

ZHUANG DAKUI, SHI YIFAN, LIU YASHU, YANG TIANLI AND LIU HUA
(*Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 21 May 1988)

Abstract

A new method for measuring reflectivity in the spectrum of far ultraviolet and vacuum ultraviolet is described in this paper. The instrument designed features an optical system, a lock-in amplifying detection technique in connexion with a data processing computer. The accuracy is better than $\pm 5 \times 10^{-3}$ and the precision better than $\pm 5 \times 10^{-4}$.

Key words: absolute reflectivity; vacuum ultraviolet.