

紫外-真空紫外光谱反射率测试系统

汪龙祺^{1,2} 匡海鹏^{1,2} 曹小涛²

(1. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 为获取紫外-真空紫外光学元件的光谱反射率,构建了一套反射率测试系统。该反射率测试系统主要由 Seya-Namioka 紫外-真空紫外单色仪、样品精密转台为主体的光机结构和电子学系统组成。首先,介绍了系统测量原理,采用双光路补偿法消除了光源随时间的飘移,通过改变系统光路进行两次测量来获取反射光与入射光数据,进而得到光谱反射率。接着对电子学硬件系统进行描述,给出了驱动控制单元与信号处理采集单元的硬件设计与组成。因紫外-真空紫外光谱信号微弱,采用了锁相放大的方法提高了测量精度。该反射率测试系统测试结果表明波长重复性 0.05 nm,反射率测量重复精度为 1.8%,系统功能完备稳定性好,能够实现光学元件的高精度测量。

关键词: 光谱反射率;光谱分辨率;紫外-真空紫外;锁相放大

中图分类号: TH741 TN23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral reflectance measurement system

Wang Longqi^{1,2} Kuang Haipeng^{1,2} Cao Xiaotao²

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and

Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics

and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to obtain the spectral reflectance of ultraviolet and vacuum ultraviolet optical components, a set of reflectance measurement system is constructed. The reflectivity measurement system is composed of Seya-Namioka ultraviolet and vacuum ultraviolet monochromator, a sample turntable as the main body of the optic and electronic system. First, the system principle of measurement is introduced, the elimination of the light source with the time drift is by double light path compensation method, to obtain the reflected light and incident light data by changing the system optical path of two measurements, and then obtain the spectral reflectance. Then carries on the description to the electronics hardware system, gives the hardware design and the composition of the driver control unit and the acquisition signal processing unit. Because ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral signal is weak, lock in amplifier is applied in the electronics system to improve the measurement accuracy. The test results show that the reflectivity measurement system repeatability of wavelength is 0.05 nm, measurement repeatability is 1.8%. The system stability is good, can realize high precision measurement of optical elements.

Keywords: spectral reflectance; spectral resolution; ultraviolet and vacuum ultraviolet; lock-in amplifier

1 引言

随着经济及工业化发展,全球性大气环境面临的形势非常严峻,大气污染防治、探测,已成为世界性的焦点。地外紫外波段光谱在空间探测领域有独特优势,可对大气中

某些痕量气体成分进行探测,可为地球大气环境变化和预测提供信息和相应数据^[1-2]。光谱信息的获取依靠高性能紫外光谱遥感仪器和紫外成像仪器。而光学元件光谱传输特性是光学应用中的重要参数,其精确测量结果将对光学薄膜质量评价和改善、光学仪器设计和性能提高,提供

收稿日期:2015-04

参考依据^[3]。目前,国际已有分光光度计在真空紫外波段的光谱传输测试方面还存在着一定的局限性。此波段内的球面镜光谱反射率及半球反射率等不易测量。国内外许多厂家推出了各种型号的分光光度计,但在紫外-真空紫外波段测试的系统较少^[4]。普通真空紫外波段光度计无法消除光源的不稳定性,对真空紫外波段极弱的单色光探测能力差,杂光抑制水平不足,极大限制了真空紫外光学计量测试的研究及相关领域的发展。

为满足当前研制的高性能紫外遥感仪器的需求,本文提出了一套高精度紫外-真空紫外反射率测试系统,以真空紫外分光光度计和精密二维转台为光机结构主体,用双光路测试法消除了光源的不稳定性,通过电子学驱动和锁相放大器弱信号采集处理实现了紫外-真空紫外反射率的高精度测量。

2 光机组成及测量原理

该测试系统光机部分,由真空室、氘灯光源、聚光镜、Seya-Namioka型紫外-真空紫外单色仪、准直器、反射/透射调制器、精密位移转台等组成^[5],如图1所示。

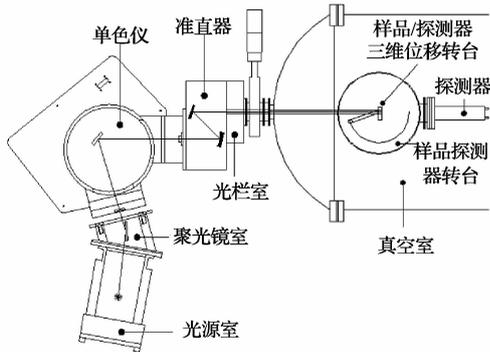


图1 系统光机组成

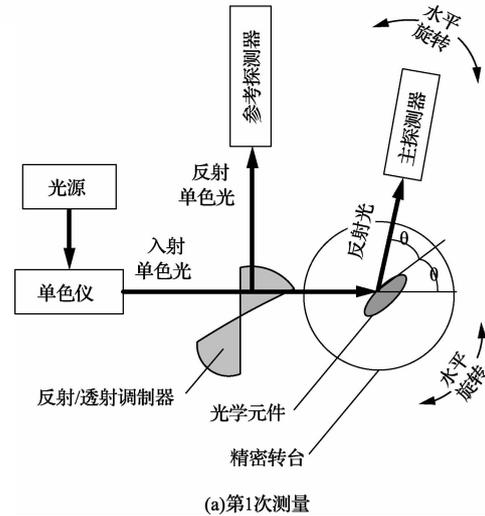
在真空紫外环境下,为消除光源及光学系统光谱效率时间漂移,提高测量精度和稳定性,该系统采用双光路光学补偿方法。即用具有4个扇面每个扇面相隔45°的反射/透射调制器对来自单色仪入射光进行分光,反射光进入参考探测器,透射光照射到光学元件再反射进入主探测器。主参两路同时进行采集测量,两路调制频率相同。

测量时光样品放置于精密位移台上,通过改变样品和围绕样品旋转的探测器的位置实现反射率的测试。测量共分两次进行测量。

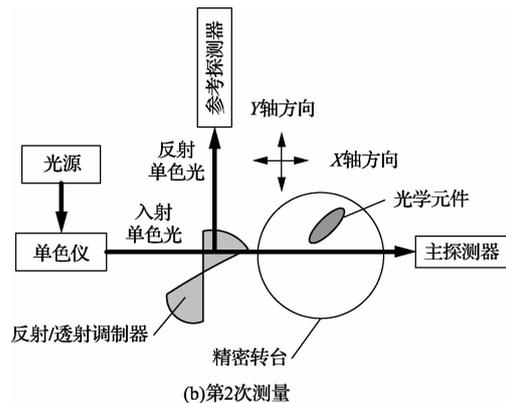
第1次,将光学元件置于转台中心,垂直入射单色光。顺时针旋转 θ 角($\theta < 10^\circ$),主探测器旋转 2θ 角以接收光学元件反射 θ 角度的反射光,得到光学元件反射光 $I_\theta(\lambda)$,和光学元件参考光 $I'_\theta(\lambda)$,如图2(a)用 $I'_\theta(\lambda)$ 归一化 $I_\theta(\lambda)$ 来消除光源的不稳定性,即 $I_\theta(\lambda)/I'_\theta(\lambda)$ 视为反射光。第2次,将主探测器旋转到与入射单色光夹角为零位置,并以Y轴方向移动光学元件,移出入射单色光光路,入射光

$I_0(\lambda)$;参考光 $I'_0(\lambda)$ 如图2(b),同理,以 $I_0(\lambda)/I'_0(\lambda)$ 视为入射光,由此可得待测样品光谱反射率待测样品光谱反射率 $R(\lambda)$:

$$R(\lambda) = (I_\theta(\lambda)/I'_\theta(\lambda))/(I_0(\lambda)/I'_0(\lambda)) \quad (1)$$



(a)第1次测量



(b)第2次测量

图2 反射率测量原理

3 系统电子学硬件

紫外光谱反射率测试系统的测量方式和测量结果的获得是由电子学系统完成的。依据系统的功能,所需的电控系统应包括该驱动控制单元与信号处理采集单元两部分^[6]。

3.1 驱动控制单元

驱动控制单元负责系统中所有与运动控制有关部分:单色仪波长选择机构驱动和成样品室精密转台驱动中的探测器电机、样品电机、水平移动电机、垂直移动电机的驱动。单元组成如图3所示^[7]。

对这些机构的驱动控制如果采用嵌入式电路方式,则存在着部件多,同步控制较困难,与人机交互界面通信设计复杂、不易实现。所以采用了一种现今较流行的以界面软件编程驱动运动控制卡的方案。系统采用两块PCI总线式运动控制卡,每块运动控制卡可以驱动控制4路电

机,用两块卡可控制单色仪、探测器、样品等共5路步进电机。由界面软件编程控制运动控制卡输出脱机、方向、速度脉冲信号给步进电机驱动器,再由步进电机驱动器细分后输出相脉冲到步进电机使其带动机构运动。为保证机构运行精度采用了霍尔传感器作为定位信号,即当机械部件到达指定位置时,安装在机构上的磁钢与霍尔传感器接近到可以感应时,霍尔传感器输出低电平,由运动控制卡的I/O口读取霍尔传感器信号即可达到定位的目的^[8]。

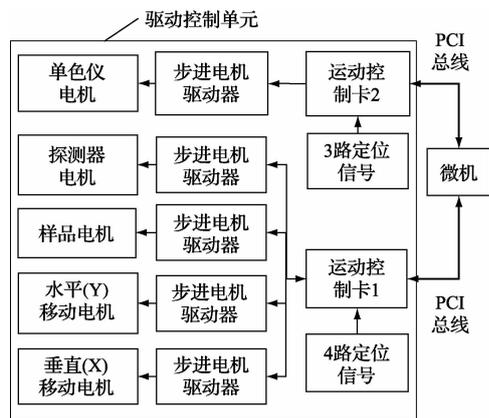


图3 驱动控制单元

运动控制卡板上的输入输出接口采用了光耦隔离处理,提高了可靠性。驱动器选用与步进电机相匹配的二相驱动,采用CW/CCW方式工作,并设置了细分数,提高驱动精度。

3.2 信号处理采集单元

该单元负责对主光路和参考光路的光信号进行处理和采集^[9-10]。如图4所示,主参光路光电倍增管信号经前置放大器后,进入相应的锁相放大器,由微机控制锁相放大器进行采集控制,微机与锁相放大器之间通过 GPIB 总线接口通信。

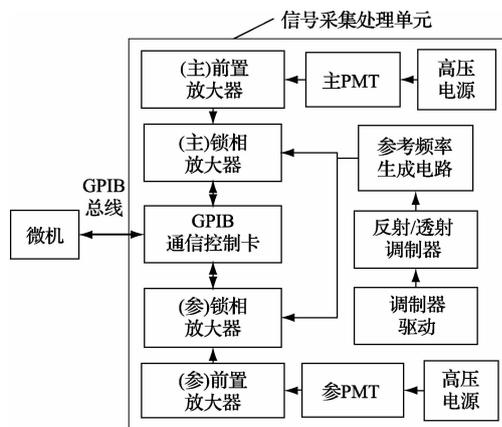


图4 信号处理采集单元

主参光路的信号采集与处理的核心是锁相放大器,采用的是斯坦福 SR810 型数字锁相放大器,通过半反半透调制扇对光路调制的参考信号进行工作,采用测速光耦 MCHO25A 提供转速频率,并设置锁相放大器自动相位调整后,主参两路锁相放大器均可工作。

为使光电倍增管工作,需要提供外部高压电源,从 800~1 100 V 范围,步进 0.1 V 可调。光电倍增管输出的电流信号为 fA~ μ A 级,无法直接接入锁相放大器,通过如图5的前置放大器,将信号转为电压信号,满足锁相放大器 2 nV~1 V 测量范围。

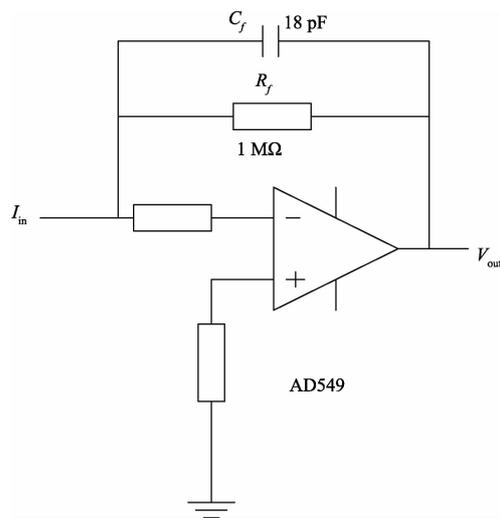


图5 前置放大器

4 测试系统控制软件

测试单元控制软件,分为机构调整、反射率采集,数据处理功能模块。实现方式是通过对运动控制卡编程完成样品机构、探测器机构、单色仪波长机构的驱动控制,以及通过 GPIB 接口通信控制锁相放大器进行数据采集。对系统的控制和操作,由使用者人机界面输入。软件界面如图6所示,将测试数据进行曲线显示、样品、探测器等相对角度关系也以图形方式处理,力求使用者直观判读系统工作状态。

与现有测试系统相比而言,该测量系统软件实现了智能化测试方式,即采用了多线程技术、动态数据空间分配技术进行处理反射率测量,使用者只需设定波段,样品角度,积分时间,采样次数等参数后,可一键式完成反射率光谱数据获取、曲线显示、最终数据存储等,自动化程度高,便于提高工作效率,特别是在希望获取样品多个角度反射率的数据、精细步距波长时,更为显著。

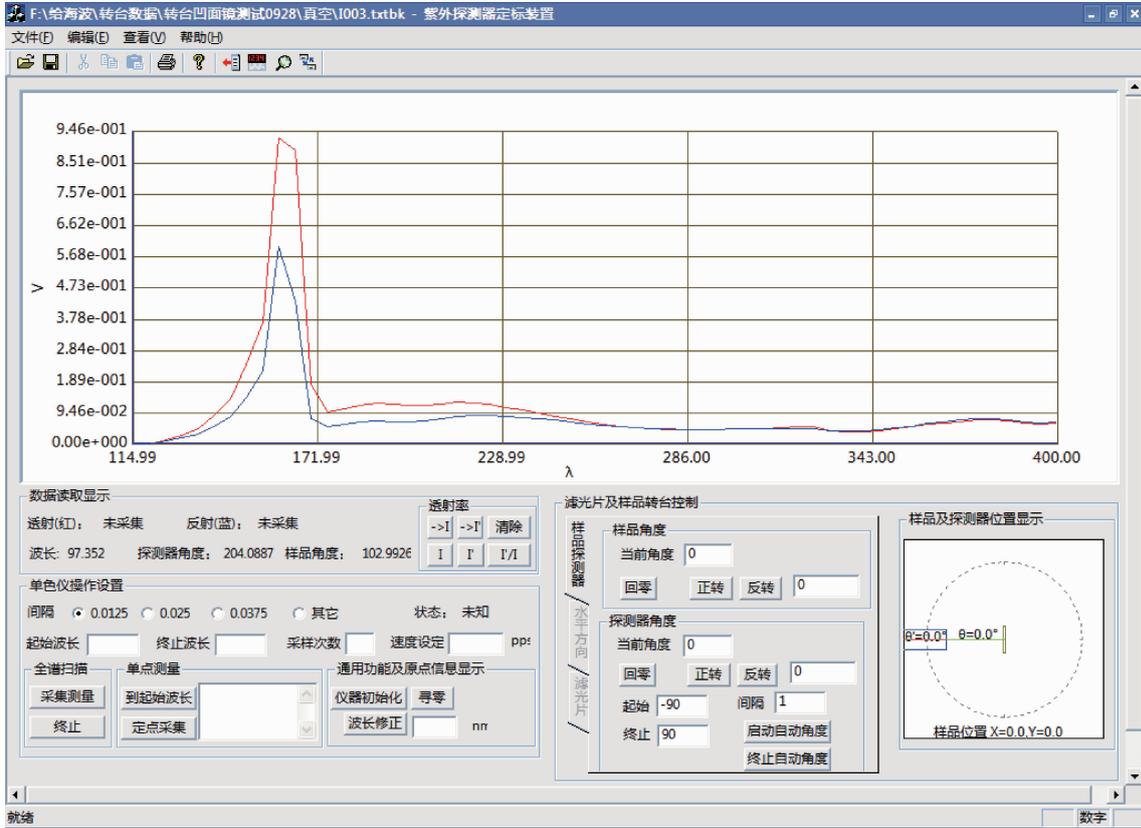


图6 人机对话界面

5 仪器测试结果及性能分析

根据光谱分辨率的通用测量方法,利用仪器测量汞灯激发的原子谱线半高宽即可。测试过程需要在大气下,直接利用单色仪对汞灯光源进行测试,测量的汞灯 253 nm 谱线结果如图 7 所示,光学系统理论光谱分辨率 0.5 nm,实际测量汞灯谱线半宽约为 0.48 nm。根据汞灯谱线重心位置确定光学系统每次测量的波长位置,多次测量结果表明,光学系统波长重复性优于 0.05 nm,满足设计指标要求。

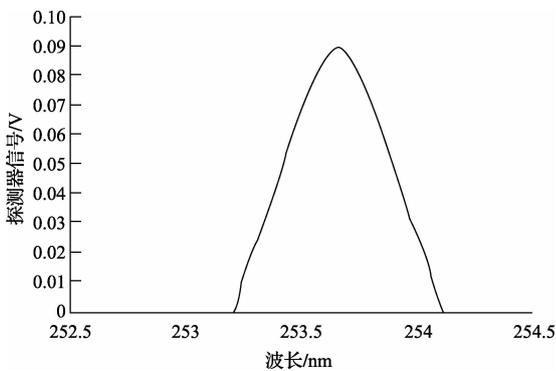


图7 光谱分辨率

为获得仪器测量重复性,利用光谱反射率测试系统测量镀有 Al+Mg F2 反射镜的反射率,反射镜样品尺寸 $\Phi 35$ mm。经多次测量该样品,对测试结果进行了总结分析,如表 1 所示。从表 1 中可见反射率测量系统多次的测量结果的差值是 1.8%,最小差值为 0.5%。系统在真空紫外波段重复性较差,在紫外波段重复性较好,产生这个结果的主要原因是光学系统在真空紫外波段信号较弱,而且探测器在该波段灵敏度略低,这将导致系统测量误差较大、重复性较差。在紫外波段光学系统传输效率较高,探测器灵敏度略高,系统重复性略好。

表1 系统测量重复性

波长/nm	第 1 次(%)	第 2 次(%)	第 3 次(%)	重复性%
120	18.2	17.4	19.2	1.8
150	50.6	49.8	50.9	1.1
180	82.9	82.3	83.6	1.3
210	83.6	82.8	83.4	0.8
240	86.7	86.3	87.1	0.6
270	86.4	86.4	87.2	0.8
300	85.7	85.4	86.7	1
330	87	87.1	86.2	0.9
360	87.5	87.1	87.6	0.5
390	86.5	86.3	86.9	0.6

6 结论

构建了一种紫外-真空紫外光谱反射率测试系统,系统采用双光路光学补偿方法,有效的避免了时间漂移对测量精度的影响,通过移动光路中的测试样品分别测量反射光、入射光的比值来获取反射率。采用了锁相放大方法,对系统噪声进行了抑制,使系统可测量和处理的探测器输出的 $fA \sim \mu A$ 级电流信号,改善了信噪比。并且系统软件系统的设计,使其具有高度自动化,可提高测量时的工作效率,适合密集步距的光谱反射率数据获取。测试结果表明,系统光谱反射率的重复性优于 1.8%,波长重复性优于 0.05 nm。整机性能满足紫外-真空紫外反射率测试要求,可为日后的紫外遥感仪器研制及性能评估奠定基础。

参考文献

- [1] 王永成. 紫外成像光谱仪主动热控系统的设计与实现[J]. 宇航学报, 2014, 35(8): 977-984.
- [2] 张晶, 王淑荣, 李博, 等. 一种用于大气探测的紫外成像仪光学系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 843-846.
- [3] 王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3212-3216.
- [4] 李博. 真空紫外光谱传输特性测试研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.
- [5] 薛庆生, 王淑荣, 宋克非, 等. 一种单光束紫外-真空紫

外分光光度计的设计[J]. 光电工程, 2008, 35(10): 102-106.

- [6] 刘晓光, 门晓金, 窦曼莉, 等. 智能近红外光谱数据采集与处理系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 319-325.
- [7] 高飞. 共聚焦显微镜光谱扫描控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 108-112.
- [8] 汪龙祺. 一种光谱仪器波长定标电控系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(5): 52-56.
- [9] 李磊, 王莹, 李春良. 一种双光谱的矿用瓦斯管路火焰探测器设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 46-49.
- [10] 朱维娜. 基于随机共振和人工鱼群算法的微弱信号智能检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2464-2470.

作者简介

汪龙祺, 1978 年出生, 工学博士, 副研究员。主要研究方向为光电探测领域与航空机载设备设计。

E-mail: fygo@yahoo. cn

匡海鹏, 1971 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为航空光学遥感总体技术研究。

E-mail: kuanghp@163. com

曹小涛, 1980 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为航天电子学系统、航天遥感技术。

E-mail: caoxiaotao@ciomp. ac. cn