

基于电荷耦合器件的数字光谱分析仪的研究

刘冬梅¹ 夏日辉¹ 潘永刚¹ 沈 羿¹ 何 昕²

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 光谱仪器是光学仪器中一种重要的组成类型。主要研究和搭建了基于电荷耦合器件(CCD)的数字光谱分析仪,将光学系统、CCD、数据采集卡和光谱分析软件组成完整的数字光谱分析系统,实现了系统的数字化、自动化、小型化和便携化。设计了光谱分析软件以实现光谱信号的采集、显示、处理、寻峰、标定和存取,开发了光谱分析类库(SAL),提高了软件的可移植性,简化了后继软件开发。使用标准汞灯对数字光谱分析仪进行了标定,并使用激光笔发出的红光对软件的正确性进行了验证。该系统主要适用于现场远距离军用目标的实时探测,同时也可兼顾民用。实验结果表明,该数字光谱分析仪有较好的准确性及可重复性。

关键词 信号处理;电荷耦合器件;数字光谱分析仪;光谱分析类库;软件可移植性

中图分类号 TG115.3⁺39 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0107003

Study of Digital Spectrometer Based on Charge Coupled Device

Liu Dongmei¹ Xia Rihui¹ Pan Yonggang¹ Shen Yi¹ He Xin²

(¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Spectrometer is one of the most important optical instruments. A digital spectrum analysis system based on charge coupled device (CCD) is set up. The optical system, CCD, data acquisition board and spectrum analysis software are integrated to implement the digitization, automation, miniaturization and portability of the system. Spectrum analysis software is developed to realize the function of collecting, analyzing, displaying, peak-seeking, calibration and storage of spectral signal. Spectrum analysis library (SAL) is designed, which greatly simplifies the procedure of software development and increases software portability. The digital spectrometer is calibrated by standard mercury lamp and the software is verified by the laser test. The system is mainly used for remote-site real-time detection of military targets, at the same time, it can be considered for civil use. The experimental results show that the digital spectrum analyzer has a good accuracy and repeatability.

Key words signal processing; charge coupled device; digital spectrometer; spectrum analysis library; software portability

OCIS codes 070.4560; 070.4790; 070.6110; 070.7145

1 引 言

光谱仪器是对物质结构、成分进行测量和分析处理的光学设备,广泛应用于物质分析、金属工业和食品卫生等领域^[1~3]。使用电荷耦合器件(CCD)作为光谱仪器接收器件能够实现光谱信息的快速采样、传输和处理等^[4]。目前美国、德国、日本等国家已开发出多种功能强大、操作灵活的光谱分析仪器,

如分光光度计、可见光光谱仪等,但此类光谱分析仪多限于民用,其使用条件、应用领域受到很大限制。我国利用 CCD 作为接收器进行光谱分析的研究已有近 20 年的经验^[5,6],在此期间光谱分析仪器的数字化、自动化也得到了一定程度的发展,并能够对采集的数据进行一些相关的处理,但基本仍限于近距离检测。且由于计算机技术发展迅速从而导致数字

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-08-12

作者简介: 刘冬梅(1970—),女,副教授,主要从事光学信息处理、光学设计及光学工艺等方面的研究。

E-mail: sjx8811@sohu.com(中国光学学会会员号:2009017)

光谱分析软件可移植性不够,扩展功能不强^[7~9]。虽然近几年安徽理工大学、清华大学等单位对各自原有的光谱仪器(棱镜摄谱仪)进行了升级改造,但从可查询的文献中发现其应用仍仅限于实验室之中^[6]。

本文研究在搭建硬件平台的基础上,实现现场复杂条件下对远距离军用目标(可见、近红外)的实时探测功能;实现仪器的自动、便携功能;创建光谱分析类库,设计光谱分析软件,提高软件的可移植性,增强其扩展功能。根据需求正确、合理地选择各组成部件,搭建一个直读式的数字光谱采集平台(具有透镜切换功能,配备长焦距、大口径光学系统);设计开发光谱分析软件,实现目标对象谱线的采集、显示、处理和存取,实现光谱数据分析的准确性、稳定性,对光谱仪进行标定,并对采集到的数据进行分析以实现目标探测。

2 数字光谱分析仪的总体结构及器件选择

2.1 数字光谱分析仪的总体结构

光谱仪器的作用是测定被研究物质的光谱组

成,其应具备分解光波、测定能量、显示及保存光谱等功能。通常光谱分析仪器由照明系统、准直及色散系统、成像系统、接收及分析系统等组成^[10,11]。在接收及分析系统中本课题选用 CCD 作为接收器件,利用采集卡采集信号,通过设计相关软件对光谱信号进行分析,以满足系统远距离、数字化、自动化和小型便携化的需求,其系统示意图如图 1 所示。

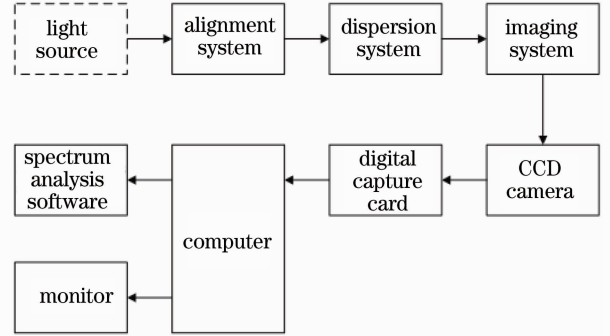


图 1 数字光谱分析仪系统示意图

Fig. 1 System diagram of digital spectrometer

光谱仪的光学结构如图 2 所示,光源发出的光线经光学系统到达入射狭缝处,通过凹面镜、衍射光栅到达出射口处,经光学系统及 CCD 后实现信号接收及转换,系统中还包括微调装置和读数装置。

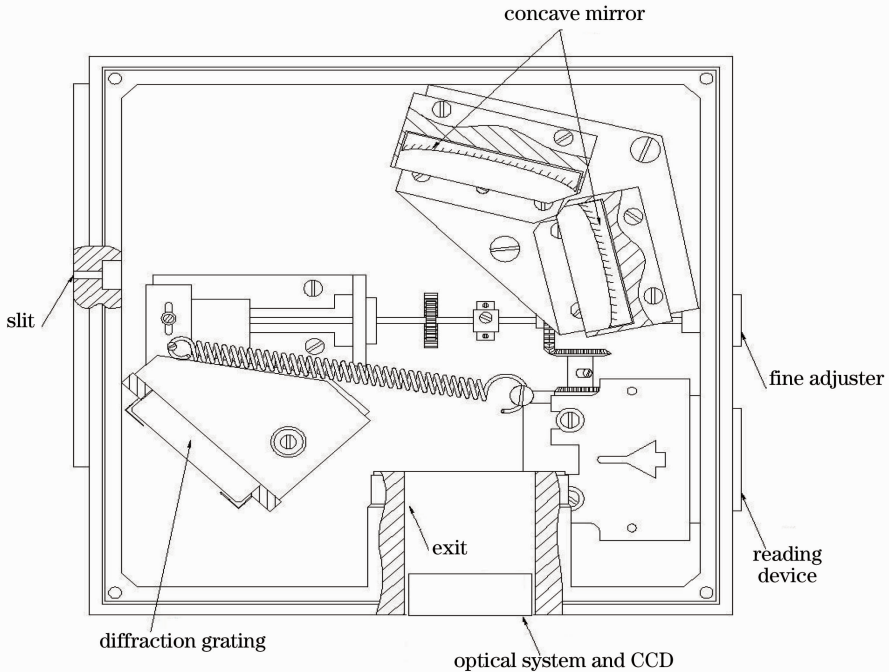


图 2 光谱仪结构图

Fig. 2 Structural graph of spectrometer

衍射光栅是光谱仪的核心元件,它起到分光的作用,其分光原理可用光栅方程来描述,即

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = k\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, i 为入射角, θ 为衍射角, k 为衍射级次。由(1)式可知,除零级外不同波长的同一级衍射对应不同的衍射角。

光栅的色分辨本领 A 可表示为

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为光栅能分辨的最小波长差, m 为光谱级次, N 为光栅线数, (2) 式表明光栅的色分辨本领正比于光谱级次 m 及光栅线数 N , 由于光栅的 N 值通常是个很大的数, 故光栅具有很高的分辨本领。而光栅的自由光谱范围为

$$R_{fs} = \lambda/m, \quad (3)$$

由于光栅使用的级次 m 很小, 所以具有较大的自由光谱范围。

2.2 器件选择

选用 DSC_AViiVA_SM2_CL 相机, 该相机的灵敏度和信噪比较高, 其线阵 CCD 含 2048 pixel, 像元尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 响应范围为 $200 \sim 1100 \text{ nm}$, 最大数据率达到 $6 \times 10^7 \text{ pixel/s}$, 并且曝光时间可调。

选用 Helios XCL 图像采集卡 (Matrox 公司), 它充分利用了 PCI-X 技术, 在单板方案下能够获得较高的视频信号采集率。

3 数字光谱分析仪应用软件设计

3.1 光谱分析软件的功能

选择 C++ 编程语言和 VC++ 6.0 开发环境设计光谱分析软件。光谱分析软件的功能模块如图 3 所示。

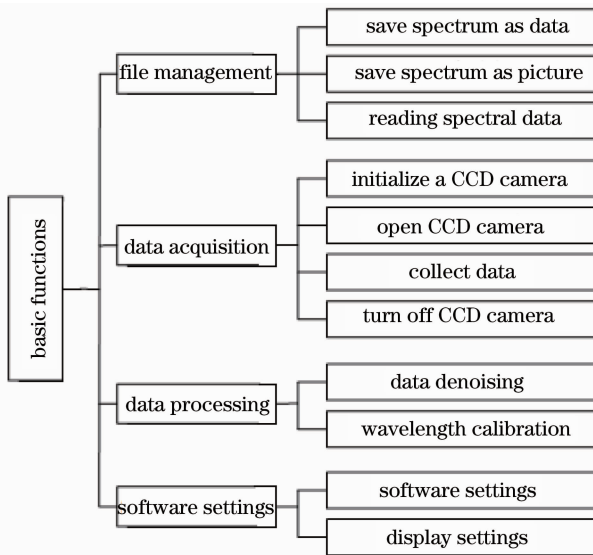


图 3 光谱分析软件功能模块

Fig. 3 Software function modules of spectrum analysis

3.2 光谱分析类库的设计

为了更好地实现软件的可移植性, 需在光谱分析软件设计中设计一新的类库, 即光谱分析类库 (SAL)。SAL 应具有数据的采集、数据的显示及缩放、数据的处理和标定、文件的保存及读取等功能。

在 SAL 类库中共定义了三十余个函数, 这对于简化将来的软件设计开发过程, 实现功能扩展, 提高软件的可移植性均起到了至关重要的作用。图 4 为 SAL 类的数据采集函数流程图。

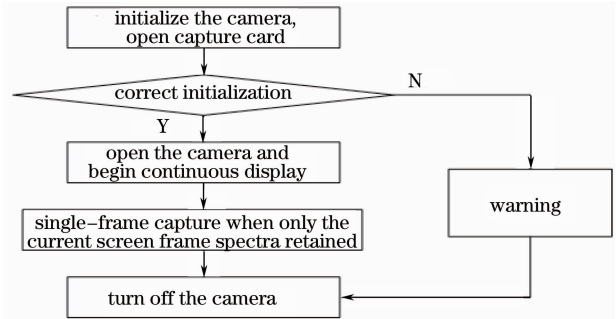


图 4 相机采集控制流程图

Fig. 4 Flow chart of camera acquisition and control

相机上电以及初始化完毕后进行数据捕捉, 其部分代码如下:

```

BOOL SAL::SOpenCam(BYTE * DisDate)
{
    MdigGrab(MilDigitizer, MilImage[0]);
    MbufGet2d ( MilImage [ 0 ], 0, 1, 2048, 1,
DisDate);
    return TRUE;
}
    
```

在光谱分析类库的基础上, 通过开发设计软件实现了光谱数据的采集、光谱图和光谱数据的显示与存储、信号数据的处理等功能。

光谱分析软件界面如图 5 所示。

4 实验及运行结果

4.1 数字光谱分析仪

自行搭建的数字光谱分析仪实物图如图 6 所示, 该系统由光学系统、CCD 相机、计算机 (装有数据采集卡) 以及开发的光谱分析软件组成。该光谱仪适用于可见光波段 ($380 \sim 800 \text{ nm}$) 的光谱检测。

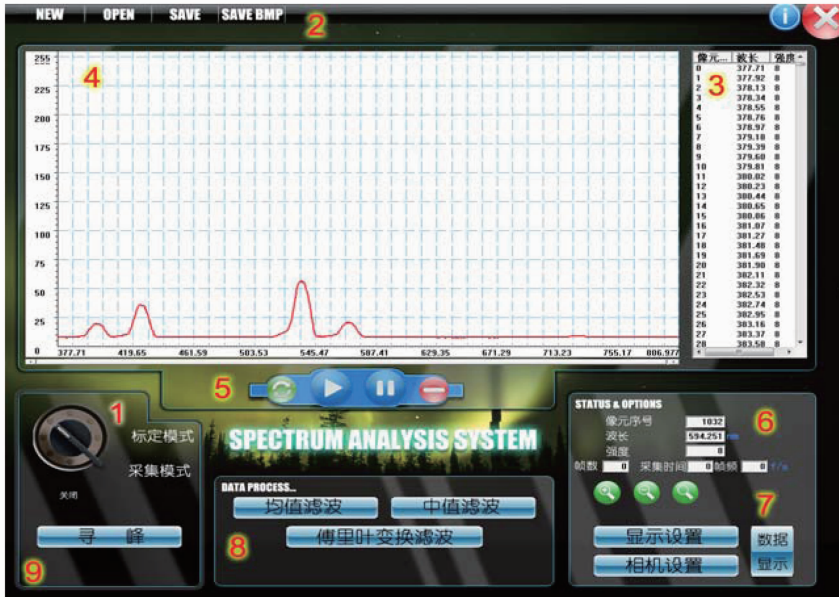


图 5 光谱分析软件运行界面

Fig. 5 Running interface of spectrum analysis software



图 6 数字光谱分析仪实物图

Fig. 6 Picture of digital spectrum analyzer

4.2 光谱数据的标定

使用高压汞灯对光谱仪进行标定,高压汞灯工作时辐射的可见光谱波长主要有404.7,435.8,546.1,577~579 nm。将汞灯置于光谱仪前,将软件模式选择为“标定模式”,初始化相机,进行数据采集。采集到的数据如图7所示,图中横坐标为 CCD 像元序号,纵坐标为信号强度。

进入寻峰与标定对话框,经过标定后的汞灯光谱如图8所示,图中横坐标为波长,纵坐标为信号强度。结果显示该灯在404.32,435.59,546.52 nm等处有峰值,可见经过数字光谱分析仪标定后的汞灯光谱与标准汞灯光谱相一致。

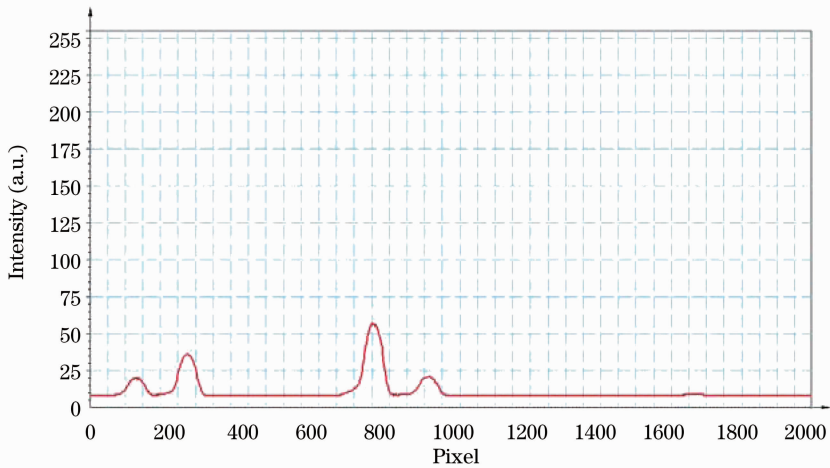


图 7 采集到的汞灯光谱

Fig. 7 Collected mercury lamp spectrum

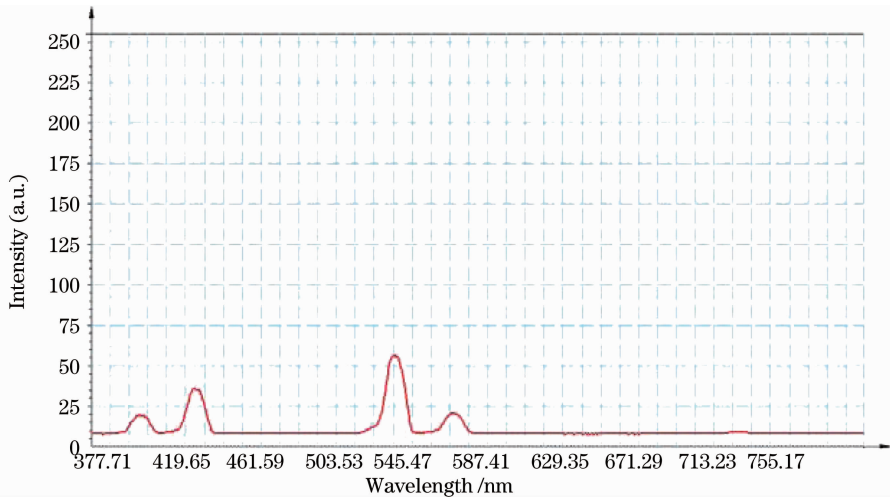


图8 经过标定后的汞灯光谱

Fig. 8 Mercury lamp spectrum after calibration

4.3 红光的光谱检测

为进一步验证数字光谱分析仪的准确性及稳定性,利用自行搭建的光谱仪及自主设计的光谱分析软件检测未知光线波长的光谱图,如图9所示,该未

知波长由激光笔发出。结果显示激光笔光谱范围在650.76~677.88 nm之间,符合该厂家提供的光谱范围,且检测出其峰值波长为663.11 nm。

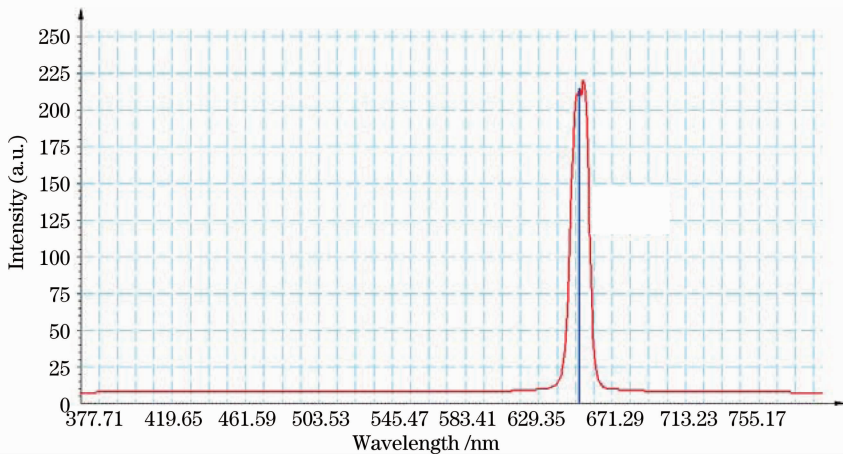


图9 红光光谱以及寻峰计算

Fig. 9 Red spectrum and peak-seeking

5 结 论

近20年来,光谱测试及分析仪器迈入了向数字化、自动化、微型化发展的新阶段。本项目不仅成功搭建了一个适用于远距离军用目标探测的数字光谱分析的硬件平台(兼顾民用),而且在此基础上设计开发出界面友好、测试方便、检测精度较高的直读式光谱分析软件,该软件能够实现信号采集、显示、去噪、标定、寻峰和保存等功能;并且在软件开发过程中设计了光谱分析类函数库,提供了光谱数据处理的各类相关函数共计30余个,有利于简化后继软件的开发过程,方便其功能扩展,提高了软件的可移植

性。标准汞灯标定结果显示,该数字光谱分析仪有较好的准确性(± 0.5 nm)及可重复性(± 0.1 nm)。该系统具有投入小、精度高、搭建容易、数字化、自动化和便携式等特点,在军事上具有很强的实用性。

参 考 文 献

- 1 Liang Shuang, An Zhiyong, Feng Yutao *et al.*. Scenery radiation acquisition features of short-wave infrared imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1304~1307
梁爽,安志勇,冯玉涛等. 短波红外成像光谱仪的景物辐射采集特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1304~1307
- 2 Yu Bin, Chen Danni, Sun Qiang *et al.*. Design and analysis of new diffractive optic imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1260~1263

- 于 斌, 陈丹妮, 孙 强 等. 新型衍射光学成像光谱仪的设计和分折[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1260~1263
- 3 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 熊 伟, 施海亮, 汪元钧 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 4 Zhang Quanfa, Yang Haibin, He Jintian *et al.*. Developing linear CCD data-collect program under Windows 95[J]. *J. Zhengzhou University*, 2000, **32**(1): 61~64
- 张全法, 杨海彬, 何金田 等. 基于 Windows 95 的线阵 CCD 数据采集程序的开发[J]. 郑州大学学报, 2000, **32**(1): 61~64
- 5 Yang Junwei, Hu Zhongxiang, Shi Xiaojun *et al.*. Error analysis of on-line temperature field measurement by infrared CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1281~1284
- 杨军伟, 胡仲翔, 时小军 等. 红外 CCD 在线温度场测量误差分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1281~1284
- 6 Wu Xiaodi, Huang Yongtao, Ma Xingkun. Data processing and software realization of wavelengths of spectrum during CCD measurement [J]. *Experimental Technology and Management*, 2007, (4): 49~51
- 伍骁迪, 黄用韬, 马兴坤. CCD 测光谱波长的数据处理的研究和程序编制[J]. 实验技术与管理, 2007, (4): 49~51
- 7 Liu Mingguang, Jiang Dongqing, Guo Husen *et al.*. Microcomputer control and data processing system for spectrometers [J]. *Analytical Instrumentation*, 2000, (3): 15~17
- 刘明光, 江东清, 郭虎森 等. 光谱分析仪器的微机控制和数据处理系统[J]. 分析仪器, 2000, (3): 15~17
- 8 Li Quanchen, Xia Liang. Information capture and data process of imaging spectrum technology[J]. *Optical Technique*, 1999, (3): 69~72
- 李全臣, 夏 亮. 成像光谱的信息采集与数据处理[J]. 光学技术, 1991, (3): 69~72
- 9 Cai Kun. Development and application of software in EDXRF spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2001, **21**(5): 673~675
- 蔡 鲲. X 荧光光谱分析软件的开发与应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2001, **21**(5): 673~675
- 10 Li Quanchen. Principle of Spectrometer [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999
- 李全臣. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999
- 11 Gao Minghui, Lin Jieqiong, Lian Fenghui *et al.*. Portable NIR spectrometer based on AOTF [J]. *J. Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **29**(3): 314~318
- 高明辉, 林洁琼, 廉凤慧 等. 基于 AOTF 的便携式近红外光谱测量仪的研制[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2008, **29**(3): 314~318

栏目编辑: 李文喆