

基于 Android 系统的微型光谱仪总体设计

周海彬^{1,2} 雷新卓^{1,2} 周望^{1,2} 许峰^{1,2}

¹苏州大学物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006

²江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 为满足光谱仪微型化、便携化的要求,并克服基于台式电脑处理系统的光谱仪在户外使用不便的缺点,研制了一种基于 Android 系统的微型光谱仪。介绍了仪器研制过程中的光学、机械、电子学以及应用软件(APP)的设计。光学系统利用平场全息凹面光栅简化系统光路结构,机械结构使用 3D 打印技术一体化成型。选用线阵 CCD (TCD1304DG)作为光电探测器,用全新的 STC15 系列嵌入式微控制单元(MCU)为控制核心,采用 Android USB (系统通用串行总线)接口用于通信,完成了 Android 系统下高分辨率光谱数据采集系统的设计。编制 APP 用于实时处理光谱数据。运用电子快门技术,实现了 Android 设备对 CCD 积分时间的实时在线可调,满足了便携式光谱仪在不同环境下的工作要求。设计方案以 Android 系统作为数据处理平台,代替了传统台式电脑处理系统,体现了较好的便携性优势。

关键词 光谱学; 微型光谱仪; Android; 线阵 CCD; 积分时间; Android USB 通信

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.063001

Overall Design of Miniature Spectrometer Based on Android

Zhou Haibin^{1,2} Lei Xinzhao^{1,2} Zhou Wang^{1,2} Xu Feng^{1,2}

¹ College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

² Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Optical Technology, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract A spectrometer based on the Android processing system instead of the traditional personal computer system is developed in order to overcome the inconvenience in outdoor using and satisfy the needs of miniaturization and portability. The design of the optical system, mechanical structure, electronics and application program (APP) is introduced. To simplify the structure of the optical system, a plane holographic concave grating is used in the system, and the 3D printing technology is used to shape the mechanical structure. With a linear CCD array (TCD1304DG) as the photoelectric detector and an STC15 microcontroller unit (MCU) as the core, a high resolution spectrum data acquisition system based on the Android system is designed with Android USB (universal serial bus) communication. APP is developed for real-time processing of spectral data. The electronic shutter technology is utilized to realize the real-time adjustment of CCD integral time and satisfy the requirement on the portable spectrometer working in different environmental conditions. The design scheme uses the Android system as the data processing platform instead of the traditional personal computer system, exhibiting portability advantage.

Key words spectroscopy; miniature spectrometer; Android; linear CCD array; integral time; Android USB communication

OCIS codes 300.6190; 040.1520; 050.2770

1 引言

光谱仪作为一种应用广泛的光学仪器,常用于测量分析物质的结构及成分,分析精度高,测量范围大,响

收稿日期: 2015-12-29; **收到修改稿日期:** 2016-02-03; **网络出版日期:** 2016-05-16

基金项目: 国家级计算机及信息技术实验教学中心项目(50118003)、江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)

作者简介: 周海彬(1991—),男,硕士研究生,主要从事智能化光电类仪器等方面的研究。E-mail: chouhaibin@163.com

导师简介: 周望(1958—),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事智能仪器仪表等方面的研究。

E-mail: wang58@suda.edu.cn(通信联系人)

应速度快^[1]。随着科学技术的发展,许多研究和应用领域,如地质矿藏勘探、环境监测、海洋监测等,要求光谱仪器能够便携、智能、使用方便灵活并具有高性价比^[2]。传统的微型光谱仪在台式电脑的支持下,可对物质进行快速、直观、实时在线的定性或定量分析,但在室外,尤其是野外使用则不太便利。

近年来,Android 系统发展迅速,很多测控系统和仪器设备都尝试使用基于 Android 操作系统的移动设备(如手机、平板电脑)代替厚重的计算机装备,从而具有体积小、功耗低、处理能力强、轻便易携等优点^[3]。为满足微型光谱仪在野外、战场等特殊环境下便携、智能、操作简单的使用要求,本文将微处理器和 Android 平台相结合,提出了基于 Android 系统的微型光谱仪设计方案,实现了微型光谱仪的信号采集与处理。介绍了微型光谱仪的总体设计,以及前端光栅分光系统、CCD 光电转换系统、微处理器及 Android 数据处理系统等模块的工程设计。

2 光谱仪系统的组成

基于 Android 系统的微型光谱仪的功能结构和系统总体设计如图 1 所示。微型光谱仪主要由石英导入光纤、狭缝、平场凹面光栅分光系统、线阵 CCD 及驱动电路、视频信号模拟/数字转换(ADC)电路、Android 移动设备及数据通信等模块组成。

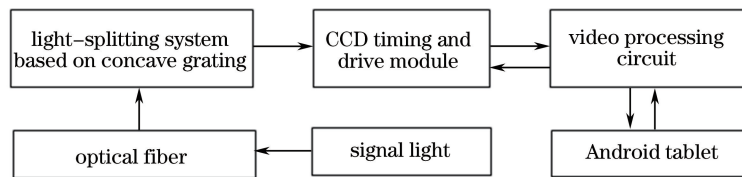


图 1 微型光谱仪基本功能模块

Fig. 1 Structure diagram of miniature spectrometer

光谱仪对光信号的处理过程为:1) 待测光通过石英光纤进入光学系统,经过平场全息凹面光栅分光并聚焦到线阵 CCD 上;2) 线阵 CCD 所需的驱动时序由微控制单元(MCU)产生,使其采集已色散的光谱线,并输出视频电压信号;3) 在 MCU 基础上,视频信号处理电路进行模拟信号的处理、A/D(模拟/数字)转换和数字信号的缓存等,之后通过通用串行总线(USB)接口将数据实时传输至 Android 移动设备,如平板电脑或手机;4) 利用 Android 移动设备上的光谱分析应用软件(APP)分析和处理光谱数据,同时,Android 移动设备提供光谱仪电路所需的电能。研究人员可通过 Android 移动设备方便、快捷地修改和设置光谱仪参数,如积分时间和工作模式。

3 微型光谱仪光机系统

光谱仪器的分光元件根据不同的结构,可采用棱镜、平面光栅或凹面光栅^[4-7]。设计系统采用平场全息凹面光栅作为核心分光元件^[8],分光光路如图 2 所示。图中信号光耦合到石英光纤中,光纤内径为 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22,光谱仪导光入口处采用 SMA905 接口法兰盘,石英光纤通过法兰盘接入并紧贴狭缝,狭缝宽度调整为 $50\ \mu\text{m}$ 。经过狭缝后的光被视为线光源,发散到凹面光栅表面,经过凹面光栅色散并会聚于线阵 CCD 感光像元上。系统采用日本岛津 P0508-01 光栅,适用波段为 $340\sim 850\ \text{nm}$,闪耀波长为 $360\ \text{nm}$,外形尺寸为 $30\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}\times 7.5\ \text{mm}$,刻线数为 $580\ \text{line/mm}$,整个光学系统的光谱分辨率为 $0.62\ \text{nm}$ 。

光谱仪整体机械结构如图 3 所示,机械结构的设计尝试采用基于熔融沉积制造(FDM)的 3D 打印机加工制作。3D 打印技术以三维 CAD 模型数据为基础,运用粉末状金属或塑料材料,采用逐层增加材料的方式进行加工制造,目前已广泛应用于工业设计、模具制造等领域^[9-10]。光谱仪内部零件结构复杂,不适用于传统加工方式,采用 3D 打印技术更加方便、快捷。实验证明 3D 打印技术可用于某些光学结构的加工。

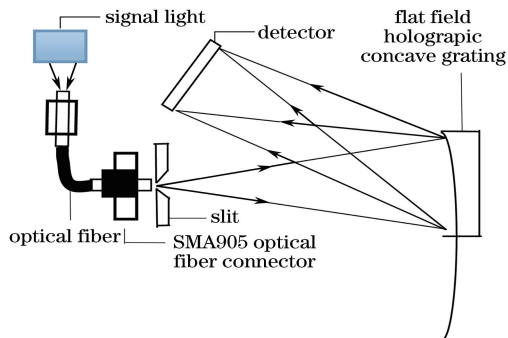


图2 平场全息凹面光栅分光系统图
Fig. 2 Light-splitting system based on flat field holographic concave grating

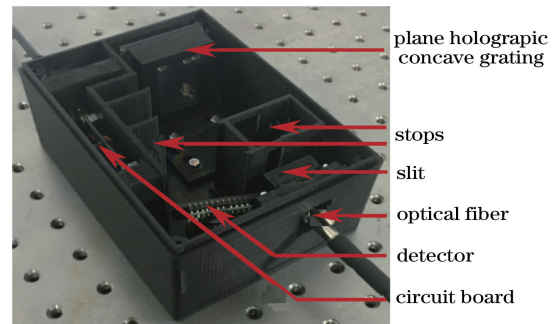


图3 光谱仪机械结构图
Fig. 3 Mechanical structure schematic of spectrometer

4 光谱数据采集系统设计

4.1 微型光谱仪数据采集系统

微型光谱仪数据采集系统由4部分组成：

- 1) CCD驱动,产生TCD1304DG所需的时序,使其输出视频信号;
- 2) 视频信号处理和采集,包括视频信号的放大,视频信号的模数转换以及光谱数据的缓存;
- 3) Android USB数据通信,用于光谱数据的传输;
- 4) Android APP光谱数据处理,可实时处理光谱数据。

在光谱仪探测系统硬件设计中,不但要考虑电路板体积的微型化,还要兼顾电路功能的丰富性。针对其结构特点,系统设计考虑了各方面因素,处理系统的整体结构如图4所示。

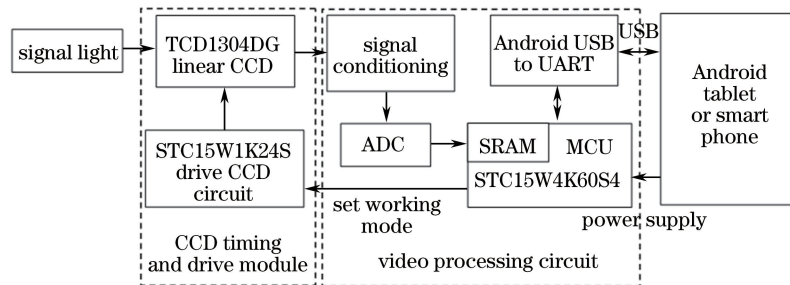


图4 光谱数据采集系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of spectral data acquisition system

光谱线转换为电信号的具体工作过程为:1) 信号光经过分光系统后,照射到CCD探测像元面;2) CCD输出的视频信号经过模数转换后,缓存到MCU内部存储容量为4 kB的静态随机存取存储器(SRAM)中,完成的每一帧视频信号经过MCU处理后,通过Android USB转至通用异步收发传输器(UART)通信模块并发送到Android移动设备,再进行后续光谱图像的分析 and 显示。为实现电路微型化,上述驱动线阵CCD的芯片选用STC公司的8位增强型MCU,体积小,无需外接晶振,用户可自定义内置晶振频率,使得电路设计更为简洁。

4.2 器件的选用

设计采用STC公司的STC15W1K24S和STC15W4K60S4单片机作为驱动和控制芯片。STC15系列单片机为一款单时钟/机器周期的新一代8051单片机,指令代码与传统8051完全兼容,但速度快8~12倍。运用内部集成电阻/电容振荡电路(R/C时钟),最高时钟频率为33.1776 MHz。在线系统编程(ISP)时,时钟频率在5~33.1776 MHz内可设置,可省去外部晶振和复位电路,节约成本的同时也为电路板设计节省了很大的空间。A/D芯片选用8位采样精度的高速视频模数转换芯片TLC5540,输出方式为并行总线数据接

口,最大转换时钟频率为 40 MHz。

Android USB 通信接口的设计采用 PL2303HXD 芯片,其内部自带时钟频率为 96 MHz 的时钟发生器,无需外接晶振。芯片内部设有稳压模块,固定电压为 3.3 V。考虑到电源电压的波动会对 ADC 的结果造成影响,将芯片内部稳压模块的输出电压作为 ADC 的参考电压,实验已经证明该设计可保证 ADC 结果的稳定。PL2303HXD 芯片是专门为移动设备和嵌入式解决方案而设计的,采用小型贴片式封装,很容易实现任何连接器 and 手持设备间的匹配。由于 PL2303HXD 芯片与 Android 系统兼容性较好,最高传输速率为 12 Mbit/s,在设计中被选为光谱采集数据通信的硬件载体,通信接口电路如图 5 所示。

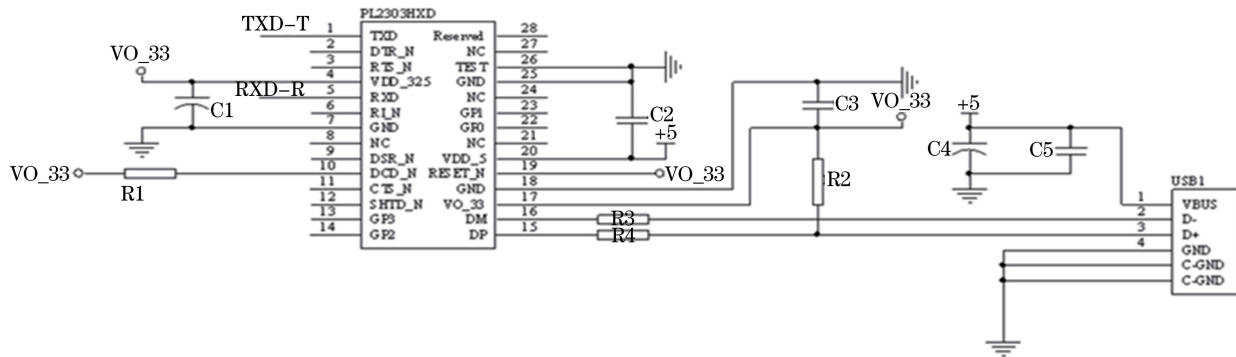


图 5 Android USB 通信接口电路图

Fig. 5 Schematic of Android USB communication interface circuit

4.3 CCD 时序驱动及积分时间可调算法设计

根据测量光谱覆盖的可见光范围和分辨率要求,选用日本 TOSHIBA 公司的 TCD1304DG 二相线阵 CCD,光谱响应范围为 200~1100 nm,峰值响应波长为 550 nm。该 CCD 由光电二极管和电荷转移电极组成的光敏单元、两个 CCD 模拟移位寄存器、两个转移栅、输出缓存机构和驱动信号内部逻辑电路 5 个部分组成。TCD1304DG 采用 3 路工作驱动时序脉冲,分别为主时钟(ΦM)、帧转移信号(SH)、积分栅(ICG),CCD 驱动时序必须严格符合时序图中的时序关系,CCD 才能输出正确的视频信号。

TCD1304DG 的驱动时序由一片主频为 33.1776 MHz 的 MCU 产生,驱动程序由 C 语言编制,在 Keil uVision4 集成开发环境下仿真出的 CCD 驱动时序如图 6 所示,符合 TCD1304DG 的时序要求。TCD1304DG 有非电子快门和电子快门两种工作模式。采用电子快门工作模式的 TCD1304DG 中的积分控制栅,由驱动脉冲 ICG 控制,只有当 ICG 为高电平时,感光像元阵列产生的光电荷才能积累到存储阵列中。所以通过控制 ICG 即可控制 CCD 的曝光时间。

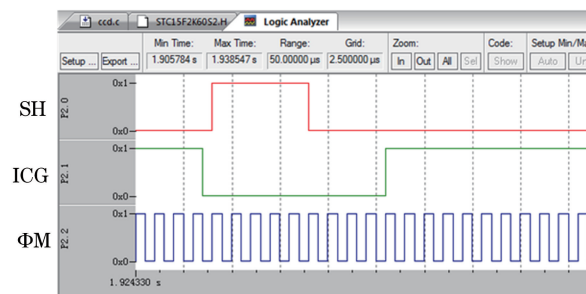


图 6 TCD1304DG 驱动时序仿真图

Fig. 6 TCD1304DG drive timing diagram simulation

如果在一个扫描周期内将 ICG 常置高,可利用 SH 的时序控制 CCD 的积分时间,相当于在一个扫描周期内将 SH 最后一对高低电平之前的信号电荷清除,只留下最后一段时间积累的电荷,即实现该 CCD 芯片的电子快门功能。

当积分时间为 100、300、500、700 μs 时,CCD 视频信号输出如图 7 所示。实验表明,随着积分时间的加长,光生电荷逐渐增多,输出电压发生明显变化,运用电子快门技术达到积分时间实时在线可调的目的。

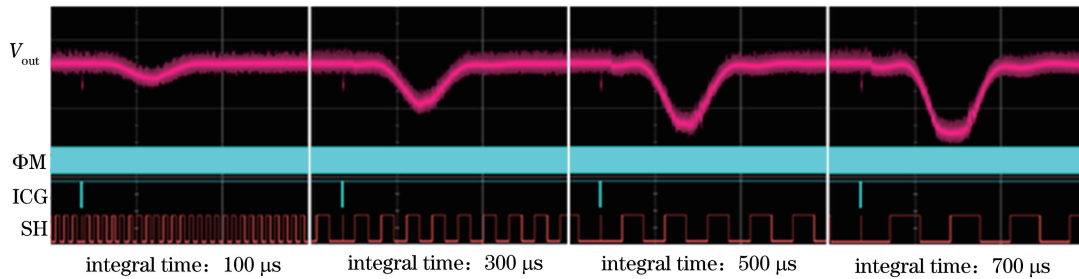


图 7 驱动时序和 CCD 视频信号图

Fig. 7 Schematic of drive timing and CCD video signal

5 Android 光谱分析 APP 设计

APP 主要分为两个模块,Android 设备与光谱仪之间的 USB 通信与光谱图的实时显示。

5.1 Android USB 数据通信的实现

Prolific 公司提供了专用的 Android USB 应用程序接口 (API) 和驱动解决方案,开发者可以根据 Prolific 所提供的 PL2303 Android Java Driver Library 来开发相应的 Android APP,用于实现 Android 设备和其他设备的 USB 通信。PL2303 Android Java Driver Library 包含以下类:

- 1) PL2303Driver Class;
- 2) PL2303Driver.BaudRate Class;
- 3) PL2303Driver.DataBits Class;
- 4) PL2303Driver.FlowControl Class;
- 5) PL2303Driver.Parity Class;
- 6) PL2303Driver.StopBits Class。

使用 Eclipse 集成开发环境 (IDE) 将以上类导入 APP 工程文件中,读取 USB 数据部分代码为

```
Private void readDataFromSerial(){
...
if(! mSerial.isConnected()) return; //检验端口是否打开
len = mSerial.read(rbuf); //读取数据,将其存放至 rbuf 数组中,并返回数据长度
...
}。
```

5.2 光谱数据的显示

基于 Android 系统的图表绘制主要包括两种方式:1) 使用 Android SDK 内部提供的绘图;2) 直接使用绘图引擎。Android SDK 内部提供了图形处理相关的 Canvas、ColorFilter、Point、RectF 等。以图形处理来说,最常见的设计是在一个 View 上画一些图片、形状或者自定义的文本内容,本设计使用 Canvas 方法实现绘图。先获取 View 中的 Canvas 对象,绘制一些自定义形状,然后调用 View.invalidate 方法,令 View 重新刷新,最后绘制出新的形状。但该方法占用大量开发编程时间,由于使用绘图引擎可以简单方便地帮助用户绘制出高效、美观、多样化的图表,编程选用图形库来绘制光谱图^[11]。目前具有绘制图表功能的引擎有 GraphView、AFreeChart 和 AChartEngine^[12],本程序设计选用 AChartEngine 图形库绘制光谱折线图。

6 光谱标定

设计中光谱标定选用天津天光光学仪器有限公司的低压汞灯(型号为 GY-4,功率为 20 W)作为系统光谱图的标定光源,Android 设备使用台电 P80 平板电脑,由电流为 4000 mA 的聚合物锂电池供电,USB 最大输出电流为 500 mA,实验装置如图 8 所示。光谱仪的最大工作电流为 119.6 mA,功耗约为 0.598 W,由平板电脑直接供电,达到低功耗的设计要求。

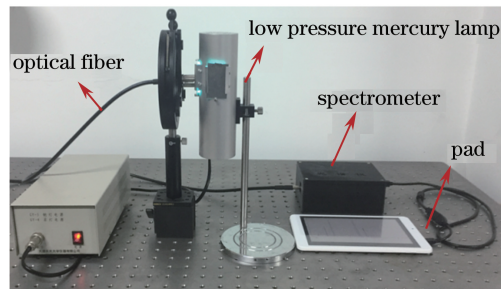


图 8 测试汞灯光谱实验图

Fig. 8 Experimental setup to measure mercury lamp spectrum

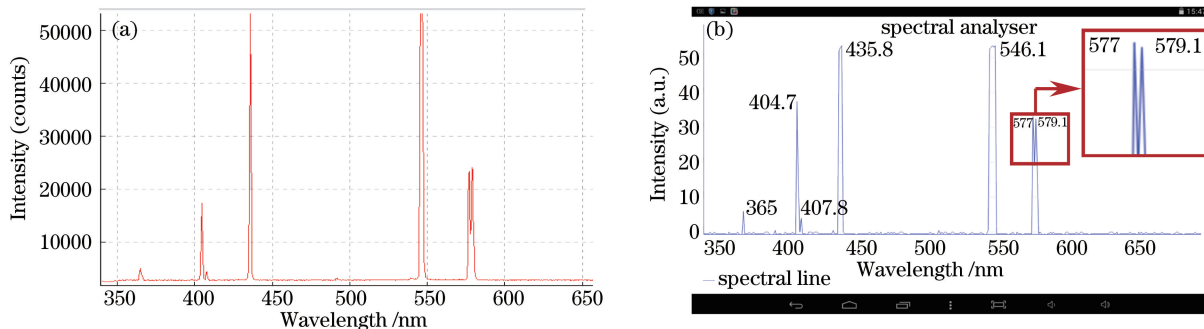


图 9 (a) 海洋光学 USB2000 光谱仪测试的汞灯光谱图; (b) Android APP 绘制的汞灯光谱图

Fig. 9 (a) Ocean Optics USB2000 spectrometer displayed mercury lamp spectrum;

(b) Android APP displayed mercury lamp spectrum

图 9(a)所示为使用美国海洋光学 USB2000 光纤光谱仪测定得到的低压汞灯特征光谱,图 9(b)所示为设计的光谱仪测定得到的低压汞灯特征光谱。通过海洋光谱仪进行光谱标定。APP 显示的谱图中,汞灯光谱特征波长分别为 365、404.7、407.8、435.8、546.1、577、579.1 nm,均可区分清楚,尤其是 577 nm 和 579.1 nm 两个波段,分辨率达到光谱测量要求。

7 结 论

设计了一种基于 Android 系统的微型光谱仪整机系统,已完成样机制造并经过项目出资方验收。光谱仪测定光谱范围为 340~850 nm,整机尺寸为 150 mm×109 mm×63 mm,最大工作电流为 119.6 mA,功耗约为 0.598 W,曝光时间可调,调节范围为 50~3×10⁶ μs,精度为 50 μs。经汞灯测试和标定,分辨率达到设计的预期目标,具有成本低廉、体积小、功耗低、无需外接电源、处理能力强、操作界面友好、轻便易于携带等优点,适用于野外实时光谱测量,有一定的推广应用价值。

参 考 文 献

- Xu Danyang, Tong Jianping, Gao Jianxun, *et al.*. Fiber spectrometer optical simulation optimization and calibration[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0516003.
徐丹阳, 童建平, 高建勋, 等. 光纤光谱仪光路模拟优化及波长标定[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0516003.
- Hu Song, Wen Zhiyu, Chen Weimin, *et al.*. Design of a novel mini-spectrometer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2000, 22(6): 363-366.
胡 松, 温志渝, 陈伟民, 等. 一种新型微型光谱仪的设计[J]. 压电与声光, 2000, 22(6): 363-366.
- Wang Jing, Ruan Linbo, Qu Hongguang, *et al.*. Portable wireless multi-channel spectrometer based on Android platform [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(12): 124004.
王 晶, 阮林波, 渠红光, 等. 基于安卓的便携式无线多道能谱测量系统[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(12): 124004.
- Tang Yi, Zheng Cheng, Nan Yibing, *et al.*. Study of anamorphose correction of astigmatism-corrected Czerny-Turner

- imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112007.
- 唐 义, 郑 成, 南一冰, 等. 消像散型 Czerny-Turner 成像光谱仪图像变形校正研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112007.
- 5 Kong Peng, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Effect of spherical aberration on design of flat-field holographic concave grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010501.
- 孔 鹏, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 球差在平场全息凹面光栅设计中的作用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010501.
- 6 Sun Yanping, Gao Jun. Investigation on dispersion characteristics for prism spectrograph[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1999, 20(4): 23-26.
- 孙燕萍, 高 军. 棱镜成像光谱仪色散特性研究[J]. *航天返回与遥感*, 1999, 20(4): 23-26.
- 7 Sun Zhenhua, Huang Meizhen, Yu Zhengang, *et al.*. Status and development of portable Raman spectrometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 070001.
- 孙振华, 黄梅珍, 余镇岗, 等. 便携式拉曼光谱仪现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 070001.
- 8 Jin Xinghuan, Chen He, Dong Jianing, *et al.*. Optical design of concave grating Raman spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0930001.
- 金星焕, 陈 和, 董家宁, 等. 凹面光栅拉曼光谱仪的光学设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0930001.
- 9 Tang Tongming, Zhang Zheng, Deng Jiawen, *et al.*. Research status and trend of 3D printing technology based on FDM[J]. *New Chemical Materials*, 2015, 43(6): 228-234.
- 唐通鸣, 张 政, 邓佳文, 等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J]. *化工新型材料*, 2015, 43(6): 228-234.
- 10 Hu Zhixiong, Liu Wenli, Hong Baoyu, *et al.*. A physical model eye with 3D resolution test targets for optical coherence tomography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(12): 28-32.
- 胡志雄, 刘文丽, 洪宝玉, 等. 光学相干层析成像三维分辨率测试模拟眼[J]. *光电工程*, 2014, 41(12): 28-32.
- 11 Zhu Yuqing, Hu Qi, Gao Pengfei. Design of a miniature spectrometer data transmission and graphical display based on the Android system[J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(6): 78-81.
- 朱玉清, 瑚 琦, 高鹏飞. 基于 Android 系统的微型光谱仪数据传输及图形化显示[J]. *光学仪器*, 2013, 35(6): 78-81.
- 12 Evans M J, Clemens G, Casey C, *et al.*. Developing a mobile App for remote access to and data analysis of spectra[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2014, 72(3): 37-43.