

宽波段光纤光谱仪

郑宝华^{1,3}, 程德福¹, 郑志忠², 修连存²

1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026
2. 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016
3. 吉林化工学院, 吉林 吉林 132022

摘要 为满足野外现场矿物分析、遥感地面验证光谱分析等的需要, 研制了实现光谱覆盖范围在 400 ~ 2 500 nm 的宽波段光纤光谱仪, 介绍了仪器研制过程中的光学、机械与电子学设计。光学系统采用了光栅分光的水平反射式光路, 对于不同的光谱探测谱段, 采用了三路线阵探测器在光谱面的 3 个方向立体交错放置进行探测; 用 CPLD (complex programmable logic device) 实现对三路线阵光电器件时序逻辑信号的发生与驱动; 采用 14 位高速 ADC 进行数模转换; 采用 USB2.0 实现通讯。仪器体积小、光谱分辨率高、信号质量和测量速度等方面均达到了满意效果, 测试结果表明, 仪器实现了宽谱测量, 光谱数据理想。

关键词 光纤光谱仪; 光栅; 光谱; CPLD; USB2.0; CCD

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)05-1417-05

引言

400 ~ 2 500 nm 光谱范围覆盖了可见至近红外的宽谱段, 采用光栅分光很难在宽谱段都有高的效率。在实验室使用的可见至近红外光谱仪都是采用多块光栅切换扫描和多个单点探测器进行光谱测量。随着 CCD 线阵、CMOS 线阵等阵列器件的广泛应用, 出现了基于线阵列探测器的光谱仪。如美国 Ocean Optics 公司的 USB2000 型光纤光谱仪, 其光谱范围覆盖在 200 ~ 1 100 nm 之间, 且体积小测量速度快, 很受市场欢迎^[1]。为满足野外现场矿物、环境及土壤等测试及遥感地面验证仪器的需求, 光谱范围需达到 400 ~ 2 500 nm, 同时要求仪器体积小、重量轻和测量速度快。目前, 满足上述要求的只有美国 ASD 公司生产的 Field Spec-3 光谱仪, 该谱仪采用一套摄谱仪和两套近红外扫描光栅光谱仪进行拼装实现宽谱段的测量, 主要存在问题是多个谱仪拼装造成仪器笨重; 输入光采用 3 根光纤分别导入, 导致测量点的代表性差; 光栅扫描方式导致测量速度较慢^[2]。本文所述宽波段光纤光谱仪是基于一套摄谱仪光路实现宽谱覆盖, 测量代表性强。文中叙述了如何用一块光栅实现宽谱的高效率和探测器光谱响应不能宽谱覆盖的两个核心问题。

1 光机系统

仪器由光源系统、样品反射测量系统、分光系统、电路系统和计算机控制分析系统 5 部分组成^[3]。其中反射样品光经过光纤耦合进入分光系统, 分光系统采用平面光栅分光的摄谱方式。探测器采用 Si 线阵器件探测 400 ~ 900 nm 范围的光谱, 2 个 InGaAs 线阵器件分别探测 900 ~ 1 700 和 1 700 ~ 2 500 nm 范围的光谱。分光系统中的光栅衍射效率选择在长波近红外区域, 在短波近红外及可见光区域由于采用高灵敏的 Si 线阵器件, 从而弥补了光栅效率低的缺陷, 另外, 还可提高积分时间来增加信号强度和信噪比^[4]。在光谱面上, 采用探测器像面立体交错拼接的方法。

1.1 光学参数计算

光学设计要求指标: 光谱范围为 400 ~ 2 500 nm; 相对孔径为 $f/4$ (焦距 90 mm); 杂散光为小于 0.1%; 光栅为平面, 刻线 177; 带宽优于 7 nm; 光传输方式为光纤耦合。

根据应用要求, 优先考虑 1 700 ~ 2 500 nm 光谱区域的性能, 选择 1 700 ~ 2 500 nm 区域为设计初始基础, 选择的 InGaAs 探测器像元个数 256, 像元大小 50 × 50 μm。则像面长度 l 等于 256 × 50 = 12.8 mm。此区域对应的线色散

$$\frac{\Delta\lambda}{l} = \frac{2\,500 - 1\,700}{12.8} = 62.5 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-11-11, 修订日期: 2010-02-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011560704)资助

作者简介: 郑宝华, 1963 年生, 吉林化工学院副教授, 吉林大学仪器科学与电气工程学院博士生 e-mail: j17789006@126.com

取此处分辨率为 6 nm, 对于采用水平对称式光路, 焦距 $f_1 = f_2$, 放大倍数 $\beta = 1$, 入射狭缝取 s , 则有 $s \times \frac{1}{l} = 6 \text{ nm}$, 算得 $s = 0.096 \text{ mm}$, 可取 0.1 mm 。

由色散公式^[3]

$$\frac{d}{dl} = \frac{\cos \theta}{kfb} \quad (2)$$

其中: k 为衍射级次(取 1 级), f 为焦距, b 为光栅每毫米刻线数, θ 为衍射角(角度较小, $\cos \theta \approx 1$)。取焦距 $f = 90$, 则 $b = \frac{16000}{90} = 177 \text{ lines} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

(1) 光路选型: 光路采用水平对称光路, 采用全息平面光栅作为分光元件。

(2) 光学参数表(见表 1)。

Table 1 Optical parameters

| surf. | Radius / mm | Thickness / mm | Glass | Others |
|-------|-------------|----------------|--------|--|
| OBJ | Infinity | 89 | | |
| STO * | - 180 | - 62 | MIRROR | |
| 2 | Infinity | 60 | MIRROR | 150 lines · mm ⁻¹ , first order |
| 3 | - 180 | - 89 | MIRROR | |
| IMA | Infinity | 0 | | |

(3) 光路效果图(见图 1)。

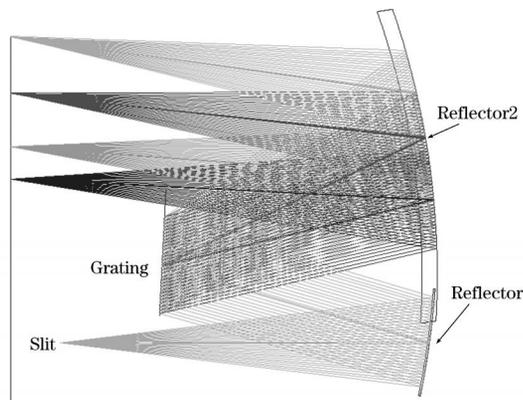


Fig 1 Model picture of the light route

(4) 光学系统优化后计算机仿真结果

900 和 905 nm 处分辨的点阵列图如图 2 所示。



Fig 2 Pixel array at 900 and 905 nm

2 494 和 2 500 nm 处的分辨图如图 3 所示。



Fig 3 Pixel array at 2 494 and 2 500 nm

从图 2 和图 3 可以看出, 光学系统在 900 nm 处分辨率

优于 5 nm, 在 2 500 nm 处分辨率达到 6 nm, 达到了总体设计要求。

1.2 像面拼接设计

在上述光学系统中要实现宽谱段瞬间测量, 须对线阵探测器进行像面拼接。像面拼接有光学透镜拼接、不同视场机械交错拼接和不同空间的立体交错拼接。本系统不涉及不同视场, 所以只能选择光学透镜拼接或不同空间的立体交错拼接。在本系统中, 采用不同空间的立体交错拼接, 采用的是全反射光学反光方法, 将 400 ~ 900, 900 ~ 1 700 和 1 700 ~ 2 500 nm 三个光谱段的光谱面分为 3 个区域, 分别反射到不同的 3 个立体面, 可将器件分别布置在 3 个立体面上, 设计方案如图 4 所示。

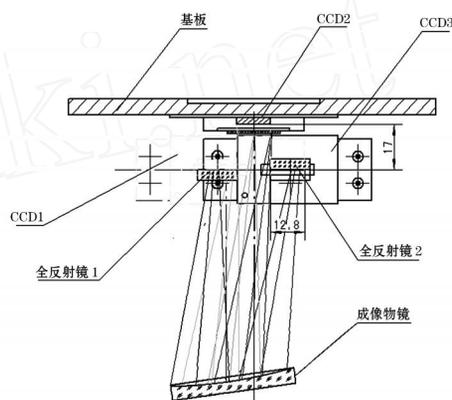


Fig 4 Structural picture of the intercrossing prisms

为消除光栅衍射的二级光谱, 在 CCD1 上粘贴起始波长为 400 nm 的长波通滤光片, CCD2 上粘贴起始波长为 900 nm 的长波通滤光片, CCD3 上粘贴起始波长为 1 700 nm 的长波通滤光片。

2 电子学系统

仪器电子学系统由前置放大、CPLD 时序发生、ADC 和基于 CY7C68013 单片机的 USB2.0 数据传输 4 部分组成。以 CY7C68013 单片机为中心, 通过该器件向 CPLD 发送启动和积分时间脉冲, CPLD 器件发出探测器所需的时序信号并同时提供前置放大器的采样时钟和 ADC 时钟, ADC 输出的数字信号通过 CY7C68013 单片机内部的 FIFO 进行数据交换, 在 CY7C68013 单片机内部的 USB2.0 控制器自动将 FIFO 中的数据通过数据线和上位机进行通讯, 实现数据传输。

2.1 探测器时序发生与 ADC

整个时序是由 CPLD 产生, 在设计中选用 Altera 公司的 EPM7128E, 时序驱动分 3 个模块。(1) 时序分频模块, 将晶体产生 4 MHz 时钟进行分配, 其中一路作为 ADC 的采样脉冲, 另一路输入可控计数器进行分频, 由单片机控制获得 2, 1, 0.5 和 0.25 MHz 的时钟, 作为读出速率控制。(2) 一帧周期计数模块。采用两个双 8 位计数器, 当计数到 512 时计数结束。同时采用该计数器计数产生 512 个 16 bit 的 FIFO 所需的地址选择信号 ADR0 和 ADR1。(3) 探测器所需的驱动

信号 $\phi_1, \phi_2, \phi_{st}$ 。

ADC 采用 AD 公司推出的 AD9243, AD9243 是单电源供电、3MHz 采样率、14 位分辨率的模数转换器, 作为探测器光谱数据采集, 其采样速率和动态范围都能满足要求。由于 ADC 采集速度快, 合理的布线尤其地线电平面对采集精度影响较大。

2.2 测控通讯系统及上位机驱动程序的编写

测控通讯以 CY7C68013A 单片机为核心, 它既负责 USB 事务处理也兼具微处理器的控制功能, 可作为 USB 外部芯片的主控芯片。系统将 ADC 变换过来的数据导入 CY7C68013A 的内部 FIFO 中, 通过对 CY7C68013A 的固件编程, 将 FIFO 的数据实时传到上位机^[5]。

USB 总线设备驱动程序使用标准 Windows 系统 USB 类驱动程序访问 USBDI(USB 驱动程序接口)。编制的驱动程序功能模块有 5 个部分组成: 入口例程, 即插即用例程, 分发例程, 电源管理例程和卸载例程, 另外还有一个 .inf 文件用于驱动程序的安装。用户使用 DriverEntry 函数传递一个 I/O 控制代码 (IOCTL) 的 32 位长度参数, I/O 管理器将

IOCTL 放在 IRP 的 Parameters. DeviceIoControl. IoControl Code 域中, 在功能驱动程序中由 IoControl 例程使用该参数执行该功能。

3 仪器系统测试

谱仪重量为 2 kg, 体积 240 mm × 160 mm × 110 mm, 一次全谱数据测量时间小于 10 ms。

3.1 仪器分辨率测试

目前, 国际上一般采用谱线轮廓法对光谱带宽进行测试, 选用某些光源的特征谱线, 对它进行光谱测量, 绘出光谱线的轮廓, 再测出该谱线的半峰高的光谱宽度即为光谱带宽, 光谱带宽等效于光谱分辨率^[6]。本系统测试时采用自制单色器发出的单色光源来进行测量, 波长覆盖范围 400 ~ 2 500 nm, 带宽优于 7 nm。将单色器发出的单色光通过光纤耦合入仪器, 选取了 700, 1 200, 2 000 nm 三个波长进行带宽测试, 近似代表 400 ~ 900, 900 ~ 1 700 和 1 700 ~ 2 500 nm 三个区域的分辨率。测试的结果如图 5。

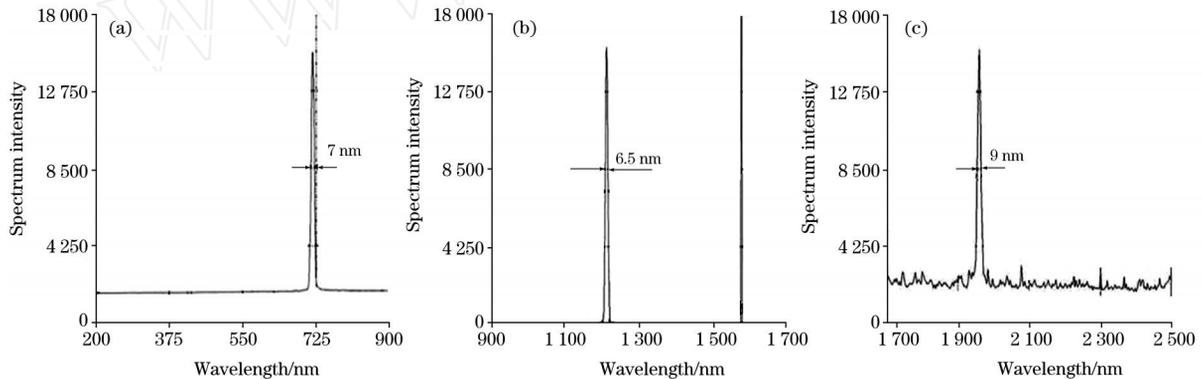


Fig 5 Test of width

(a) : 700 nm; (b) : 1 200 nm; (c) : 2 000 nm

从测试图可看出测试的结果接近了设计的要求。需要说明的是, 测量长波近红外区域 InGaAs 器件, 受目前材料的限制, 暗电流较大, 这点可以从图 5(c) 的基线看出。

3.2 常见矿物光谱测试

选择具有代表性的矿物叶蜡石和滑石进行光谱测试, 测

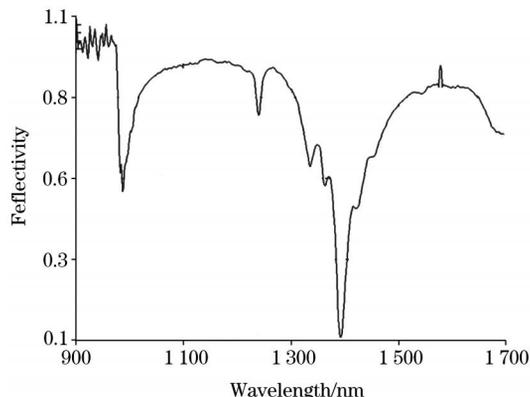


Fig 6 Test of pyrophyllite spectrum in 900 ~ 1 700 nm

试到的光谱如图 6 和图 7。与标准图谱一致。

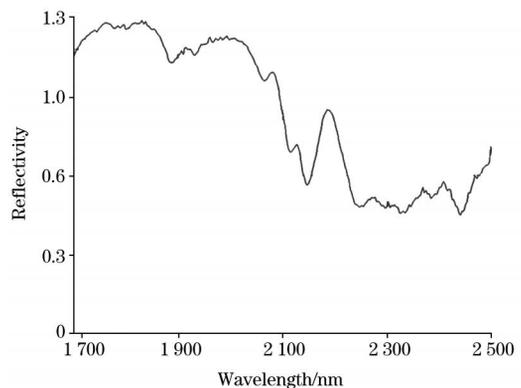


Fig 7 Test of talcum spectrum in 1 700 ~ 2 500 nm

3.3 太阳光谱测试

将太阳光耦合入仪器, 测量光谱, 如图 8, 吸收峰与标准太阳光谱基本一致^[7]。

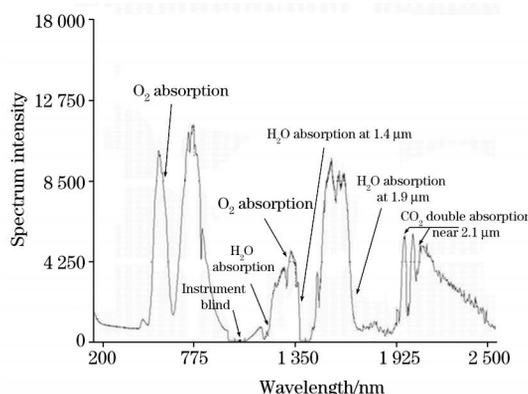


Fig 8 Test of sun spectrum in the full range of the instrument

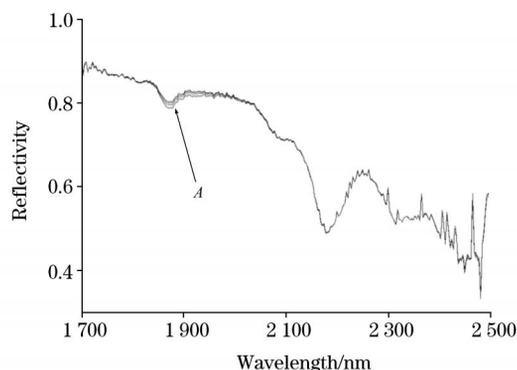


Fig 9 Four overlapping spectra of dolomite in 1700 ~ 2500 nm

3.4 光谱数据重复性测试

光谱数据精度是仪器性能的重要指标, 本系统通过测量一个样品(白云母)的反射光谱, 多次测量, 叠加光谱, 分析叠加效果进行评价(见图9)。

图中A为1900 nm附近, 由于样品放在光源附近, 受热辐射的影响, 样品测量表面温度升高, A处恰为的吸收位置^[8], 所以随着温度升高此处峰位发生漂移。从图中可以看出, 数据完全棕叠, 体现了仪器有较高的数据质量。至于后部的尖峰, 是由于探测器像元的非均匀性所致, 可以经过数据处理或校正消除。

4 结论

仪器采用一套光路和3个探测器拼接实现400~2500 nm光谱范围的测量, 测量速度快、体积小、重量轻和代表性好。从测试结果分析, 光谱分辨率达到9 nm, 局部可达到6 nm, 仪器数据稳定。由于光栅炫耀波长选择在2000 nm, 导致900~1100 nm区域效率盲区, 因此需要选择适合的光栅, 适当将炫耀波长前移来避免该缺陷。另外, 线阵InGaAs探测器像元响应的不均匀性需要校正, 这些都是仪器下一步需要改进的地方。

参 考 文 献

- [1] LU Wan-zhen, YUAN Hong-fu, XU Guang-tong, et al(陆婉珍, 袁洪福, 徐广通, 等). Modern Analysis Technique of NIR(现代近红外光谱分析技术). Beijing: China Petrochemical Press(北京: 中国石化出版社), 2000.
- [2] SONG Qiong, MA Guo-xin(宋琼, 马国欣). Infrared(红外), 2006, 27(11): 31.
- [3] LI Chang-hou(李昌厚). Instrument Theory and Practice(仪器学理论与实践). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2008.
- [4] CHU Xiao-li, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen(褚小立, 袁洪福, 陆婉珍). Progress in Chemistry(化学进展), 2004, 16(4): 528.
- [5] ZHANG Xi-kang, ZHENG Zhi-zhong, XIU Lian-cun, et al(张熙康, 郑志忠, 修连存, 等). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2009, (1): 12.
- [6] CHU Xiao-li, YUAN Hong-fu, LU Wan-zhen(褚小立, 袁洪福, 陆婉珍). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2005, (4): 18.
- [7] WEN Zhi-yu, CHEN Gang, WEN Zhong-quan, et al(温志渝, 陈刚, 温中泉, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2003, 23(6): 740.
- [8] XIU Lian-cun, ZHENG Zhi-zhong, YU Zheng-kui, et al(修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等). Geological Sinica(地质学报), 2007, 81(11): 1584.

Wide-Range Fiber Spectral Instrument Covering

ZHENG Bao-hua^{1,3}, CHENG De-fu¹, ZHENG Zhi-zhong², XIU Lian-cun²

1. College of Instrument Science and Electronic Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China

3. Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China

Abstract To meet the requirements of outdoor field mineral analysis and remote sensing ground verification spectral analysis, the wide-range fiber spectral instrument covering 400 nm~2500 nm was developed. The present article illustrates the design of

the optical , mechanical and electrical parts of the instrument. The optical system utilizes grating horizontal-reflecting light route to implement the full coverage of the spectrum. Three line-array sensors are intercrossed in three directions on the spectrum surface to sense different spectrum ranges. CPLD device generates the sampling and driving temporal logic signals to the three line-array photoelectrical devices. Fourteen bits high speed AD converts the analog signals into digital ones. USB 2.0 is used for communication. The final results demonstrate that while implementing the measurement of wide spectrum , the instrument is improved in size , spectrum resolving power , signal quality and measuring speed. Ideal spectrum data were acquired.

Keywords Fiber spectrum instrument ; Grating ; Spectrum ; CPLD ; USB2.0 ; CCD

(Received Nov. 11 , 2009 ; accepted Feb. 16 , 2010)

www.cnki.net