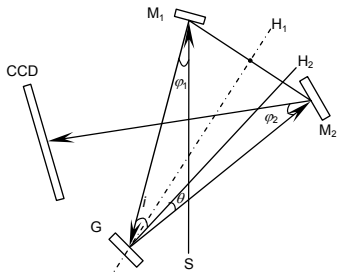
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程

Article

2018 年，第 45 卷，第 11 期

DOI: 10.12086/oee.2018.180152

基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光谱仪的设计与实现



徐丹阳*，杜春年

浙江工业大学理学院，浙江 杭州 310023

摘要：面阵 CCD 具有灵敏度高、动态范围大的优点，适用于荧光测量、DNA 测序、拉曼光谱分析和低光度检测，因此，研制基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光纤光谱仪具有重要的实际价值。光学系统采用了优化后的交叉非对称型 Czerny-Turner 结构，并获得了 1 nm 的光学分辨率。结合 DC-DC 和 LDO 的设计方法，通过 USB 供电实现了 6 路电压输出的复杂电源系统设计；通过 Verilog HDL 完成了 CCD 驱动时序设计；采用 Altera 公司的 EPM7064 芯片实现了驱动信号输出。CCD 输出的视频信号经双相关采样的高速 16 位 AD 芯片 AD9826 转换后存储在独立的静态 RAM 中，使得数据的采集和读取分离。所设计与实现的微型高灵敏度光纤光谱仪的灵敏度是通常基于线阵 CCD 的微型光谱仪的 11 倍左右，动态范围 20000:1，信噪比达到 500:1，很大程度地提高了微型光纤光谱仪的性能。

关键词：光谱仪；面阵 CCD；高灵敏度；CPLD；双相关采样

中图分类号：TH741　　**文献标志码：**A

引用格式：徐丹阳，杜春年. 基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光谱仪的设计与实现[J]. 光电工程，2018，**45**(11): 180152

Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD

Xu Danyang*, Du Chunnian

College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract: The area array CCD has the advantages of high sensitivity and wide dynamic range, which is suitable for fluorescence measurement, DNA sequencing, Raman spectroscopy and low photometric detection. Therefore, it is of great practical value to develop high sensitivity micro fiber spectrometer based on area array CCD. The optical resolution of 1 nm is obtained by using an optimized cross-asymmetric Czerny-Turner optical system structure. By combining the design methods of DC-DC and LDO, the complex power system with 6 voltage outputs is realized through USB power supply. The CCD drive timing design is achieved by Verilog HDL language and the signals are output through Altera's EPM7064 chip. After the CCD output video signal is converted by high-speed 16 bit AD chip AD9826, digital signals are stored in a separate static RAM, allowing dacquisition and reading of data to be separated. The sensitivity of designed micro-high sensitivity spectrometer is 11 times of that of spectrometer based on linear array CCD. Furthermore, it has a dynamic range of 20000: 1 and a signal-to-noise ratio of 500: 1. This work greatly improves the microfiber spectrometer performance.

Keywords: spectrometer; area array CCD; high sensitivity; complex programmable logic device(CPLD); correlated double sample

Citation: Xu D Y, Du C N. Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(11): 180152

收稿日期：2018-03-27；　收到修改稿日期：2018-05-21

基金项目：国家自然科学基金资助项目(11604295)；浙江省自然科学基金资助项目(LQ17C100002)

作者简介：徐丹阳(1983-)，男，硕士，实验师，主要从事光电探测技术方面的研究。E-mail：xudanyang@zjut.edu.cn

1　引　言

光谱仪是光谱检测的重要仪器，通过对光谱的测量分析来完成对物质成分和结构等的测量，具有测量速度快、精度高、无损测量等优点，已经广泛应用于材料化学、石油化工、光学检测、天文研究、环境检测及航空航天等领域[1-3]。传统的光谱仪器，其庞大的体积，高昂的价格几乎将此类仪器设备限制在实验室中。近年来，一方面生物医学、科技农业等应用领域的迫切需求，要求分析仪器向着小型化、智能化的方向发展；另一方面得益于微型光机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)的发展和光纤器件的大批量生产，以及微型光电探测器件的出现，使得光谱仪的微型化成为了可能[4-6]。

微型光纤光谱仪的面世使得分析仪器的发展进入了一个新的时代，基于小型光谱仪的其他仪器设备也迎来了各自的高速发展期。由于相比线阵 CCD，面阵 CCD 对光谱响应的灵敏度更高，非常适合要求高量子效率的应用，例如：农药残留检测、DNA 检测、荧光检测和拉曼光谱检测等领域。因此，研发高灵敏度的微型光纤光谱仪能够拓宽光谱仪的应用，具有重要实际意义。目前，国内外研究微型光谱仪的技术大都采用：1) 利用 MEMS 技术、二元光学和集成光学等技术；2) 利用元件和系统的微型化来实现，该方法是目前主流方法。美国 Brimrose 公司和 Jet Propulsion 实验室采用新型滤光技术研制出基于声光可调滤波片(acousto-optic tunable filter, AOTF)的微型电晶体 NIR 光谱仪，分辨率可达 0.0125 nm。美国亚利桑那州立大学基于调制原理研制了一种基于傅里叶变换的微型热发射光谱仪。国内进行相关研究的有浙江大学、重庆大学以及长春光机所等科研机构[7-9]。

日本滨松公司生产的 S11510 近红外增强型面阵 CCD 光谱响应范围为 200 nm~1100 nm，在近红外波段 1000 nm 处有较高的量子效率，其量子效率达到 40%，CCD 节点灵敏度为 6.5 μV/e⁻，典型动态范围 50000:1。因此，选用日本滨松公司的 S11510 面阵 CCD 作为探测器，16 位 AD9826 和 STM32 分别作为 AD 转换芯片与主控芯片，采用交叉非对称型 Czerny-Turner 光学系统结构，研发了一台高灵敏度微型光纤光谱仪。设计实现的样机和采用线阵 CCD 的海洋公司的 USB2000+光纤光谱仪进行了性能对比测试，设计的微型高灵敏度光纤光谱仪的灵敏度是 USB2000+光纤光谱仪的 11 倍，实现了设计目的。

2　系统组成

2.1　系统结构

本文所设计的高灵敏度微型光纤光谱仪的系统结构如图 1 所示，主要包括：由准直透镜、光栅和聚焦透镜组成的交叉非对称型 Czerny-Turner 光学系统结构以及自主研发的 CCD 驱动系统和数据采集处理与通信系统[10-13]。其中 STM32 作为主控芯片，配合 Altera 公司的 CPLD 产生驱动 CCD 的时序信号，数据的模数转换则由具有双相关采样的 AD9826 完成，经由 AD 转换得到的数字信号存储在外部 RAM 中。系统的工作过程如下：待测光源经过光纤耦合进入光谱仪的光学系统，经过光栅的分光作用，光源按照波长从长到短分布开来，聚焦透镜将得到的分光汇聚到 CCD 探测器的感光表面，当给 CCD 提供合适的工作电压和时序信号使其正常工作，实现光电信号的转换。CCD 采集到的电信号经过前端处理送入 16 位 AD 进行模数

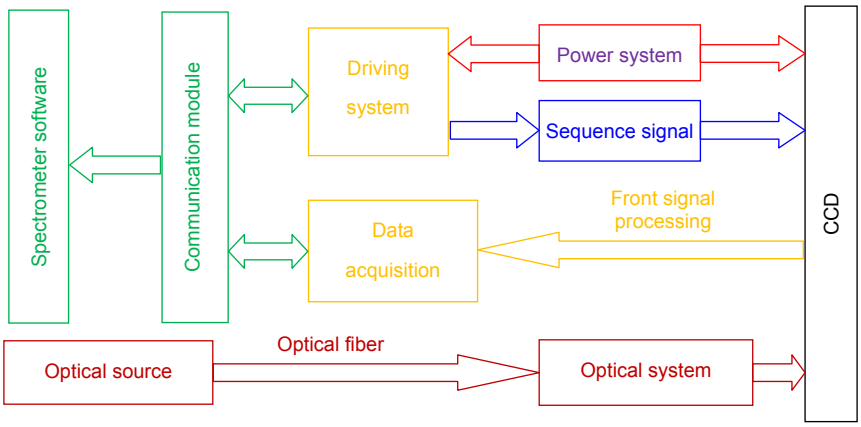


图 1　微型光谱仪系统结构图

Fig. 1　Structure of micro spectrometer system

转换，转换得到的数字信号由 CPLD 提供存储地址存储在容量为 512 k 的静态 RAM 中。上位机可以通过 USB 2.0 或 RS232 方式和下位机通讯进行发送命令和读取数据的操作。

2.2 光学系统的设计

光学系统的微型化设计是实现光谱仪微型化的关键技术之一，为了满足实际需要采用了交叉非对称型 Czerny-Turner 结构，如图 2 所示，入射光束经凹面反射镜 M_1 准直后，入射到闪耀光栅 G 上，经光栅 G 分光入射到凹面反射镜 M_2 最后聚焦在 CCD 上，进行相应的信号采集，其中 S 为入射光线，H_1 为光轴，H_2 为光栅法向量，反射镜 M_1 为准直物镜，反射镜 M_2 为聚焦成像物镜[14-15]。该系统不但可以实现较小的体积，还能有效地减小杂散光。

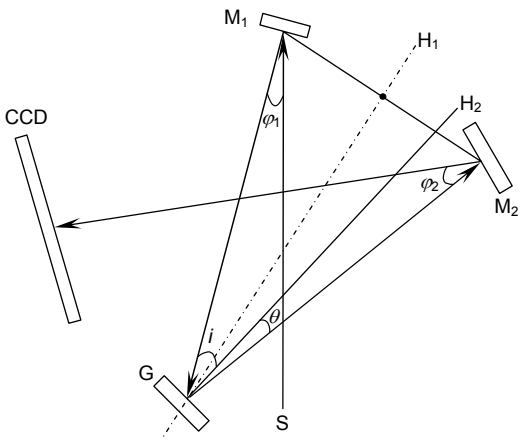


图 2　交叉切尔尼-特纳光学系统图

Fig. 2　Diagram of crossed Czerny-Turner optical system

根据光学系统 200 nm~900 nm 的光谱范围和分辨率为 1 nm 的要求，器件选择：光栅 600 g/mm，狭缝 25 μm。

$$f_1 = \frac{da\cos\theta}{m\Delta\lambda} \quad , \tag{1}$$

由式(1)可得准直镜的焦距 f_1=42 mm，其中，d 为光栅常数，狭缝宽度 a=0.025 mm，为获得较高的衍射能量，衍射光谱级次取 1 级，即 m=1，分辨率 $\Delta\lambda$=1 nm，由于衍射角较小，可近似认为 $\cos\theta$=1，采用的面阵 CCD 像元的有效长度 l=28.672 mm，由

$$f_2 = \frac{ld\cos\theta}{m(\lambda_2-\lambda_1)} \quad , \tag{2}$$

可得成像镜的焦距 f_2=68.3 mm。光谱仪光学系统的主要像差为彗差和球差，对中间波长进行消除彗差设计，可使得整个系统的像差最小，再由 Zemax 软件进行模拟和优化，如图 3 所示，最终得到 f_1=62 mm，f_2=70 mm。将设计好的透镜参数交透镜生产厂家生产，透镜经焦距仪检验合格后交付使用。由图 4 点列图可知，在 200 nm、550 nm、800 nm、900 nm 附近光谱分辨率均达到 1 nm，达到设计要求，且对美国海洋光学(Ocean Optics)公司生产的 HG-1 汞-氩校准光源进行光谱测量，积分时间 500 μs 时的光谱图如图 5 所示，也满足设计要求。而整个光学系统的尺寸可以控制在 75 mm×75 mm 以内，很好地保证了光谱仪微型化的设计要求。

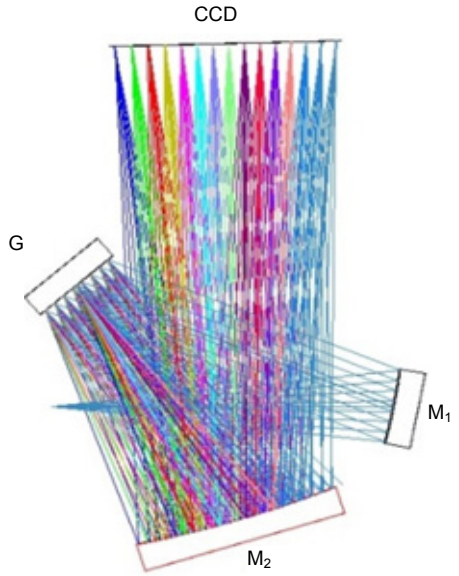


图 3　Zemax 模拟优化光路图

Fig. 3　Simulated and optimized optical path using Zemax

2.3 电路系统设计

2.3.1 电源系统

相比线阵 CCD，面阵 CCD 具有更为复杂的供电电压和驱动时序。所选用的 S11510 面阵 CCD，总共有 6 路电压，表 1 标明了整套系统所需电压分布。合适的电压是驱动 CCD 正常工作的前提，电源系统引入的噪声大小则影响整个系统信噪比、动态范围等性能参数。因此，稳定的电源系统和驱动系统是设计的关键之处。USB 输出 5 V 电压，最大电流 500 mA，即 USB 提供的最大功率为 2.5 W，要实现控制芯片和 CCD 驱动所需的电压，必须对 5 V 电压进行升压、降压、反向等处理。各路电压信号的变化都会为系统带

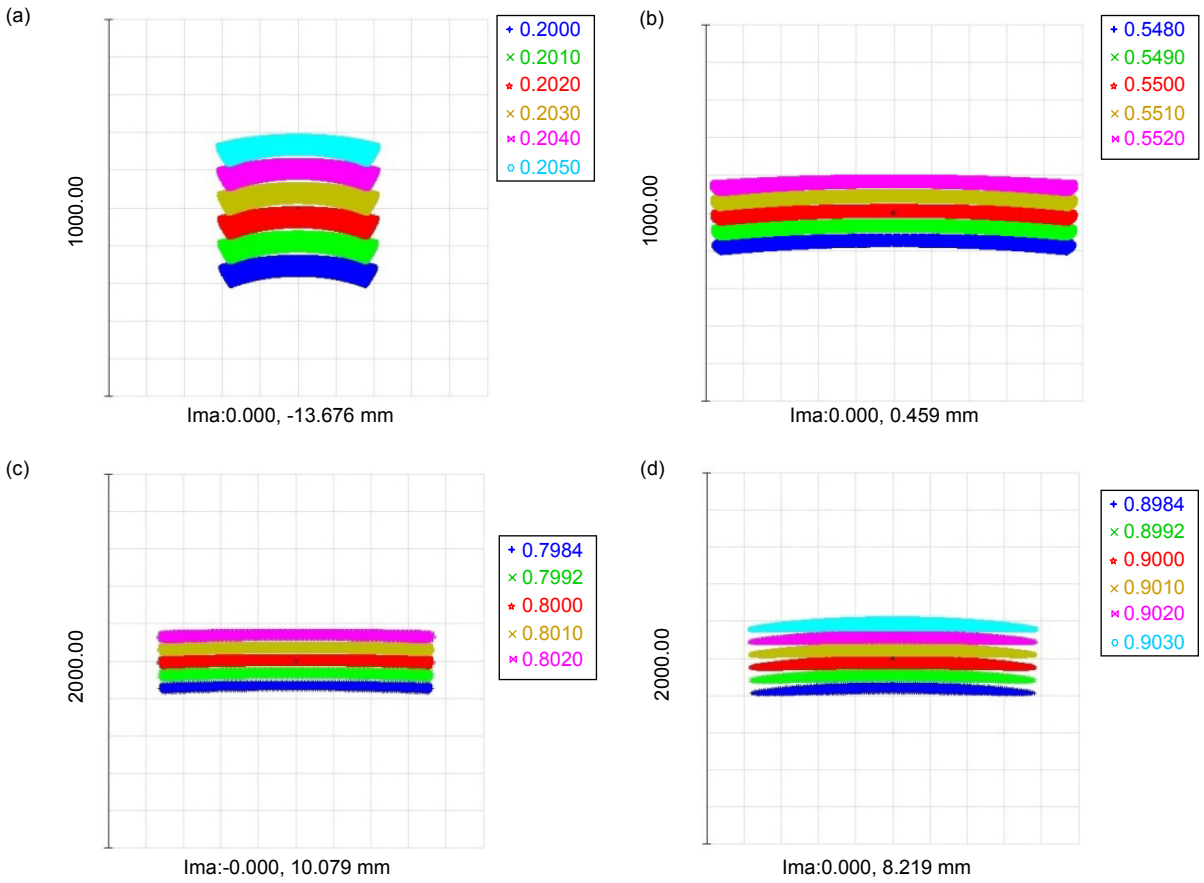


图 4　点列图。(a) 200 nm; (b) 550 nm; (c) 800 nm; (d) 900 nm

Fig. 4　The spot diagrams. (a) 200 nm; (b) 550 nm; (c) 800 nm; (d) 900 nm

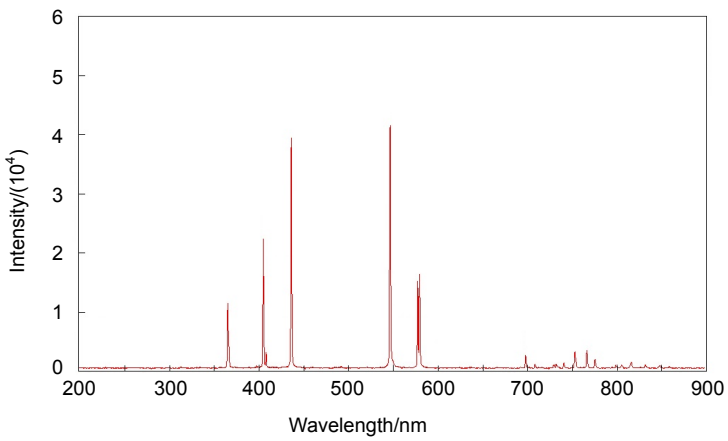


图 5　HG-1 汞-氩校准光源实测光谱图

Fig. 5　Measured spectrogram of HG-1 mercury argon calibrated light source

来较大能量损耗和电磁噪音，因此降低功耗和去噪音是电源系统设计首要考虑的关键问题。

电源系统设计方案如图 6 所示。5 V 电压升压得到 24 V 电压，因为压差大所以此路电压能量损耗较大。采用 TPS55340 产生 24 V 电压，由芯片资料显示在输入 5 V，输出 24 V 电压情况下芯片转换效率在 80% 以上，能有效减少能量损失。24 V 电压经 LM7812 降压得到 12 V，LM7812 散热面积大可以提高系统散热

表 1　系统电压分布表

Table 1　Table of system voltage distribution

Parameter	Reference range/V	Design value/V	Electrical equipment
Leakage voltage of CCD output transistor	23~25	24	CCD
CCD reset leakage voltage	11~13	12	CCD
CCD output gate voltage	4~6	6	CCD
CCD vertical drive time series high level	4~8	6	CCD
CCD vertical drive timing low level	-9~-7	-8	CCD
CCD vertical drive time series high level	4~8	6	CCD
CCD vertical drive timing low level	-6~-4	-5	CCD
Digital partial voltage	3.1~3.5	3.3	CPLD, STM32, et al

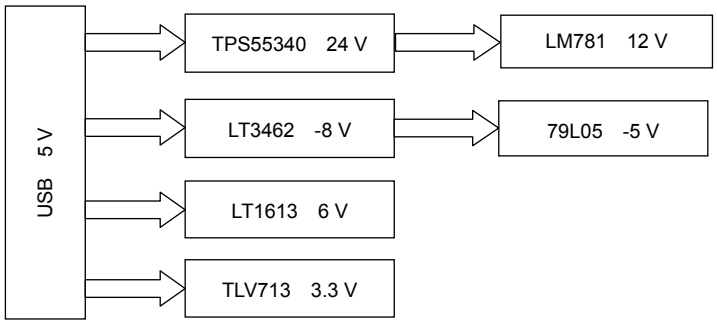


图 6　电源系统方案

Fig. 6　Scheme of power system

效率。反向电压-8 V 通过 DC-DC 芯片 LT3462 产生，这款芯片固定工作频率 1.2 MHz，噪声小容易滤除。-8 V 电压通过低压差线性稳压器 79L05 输出-5 V 电压。LT1613 是一款微型的 DC-DC 转换器固定工作频率 1.4 MHz，得益于它的小尺寸在设计 PCB 板时仅用很小的面积就可以实现 5 V 到 6 V 电压的转换；由 LDO 芯片 TLV713 转换得到 3.3 V 数字部分电压。

2.3.2 CCD 驱动电路设计

光谱仪采用日本滨松公司的 S11510 型面阵 CCD 作为探测器，探测器有 2068×70 个像素，具备灵敏度高，动态范围大，暗电流小等特点。S11510 面阵 CCD 正常工作需要 7 路驱动信号：两路垂直驱动信号 P1V、P2V，四路水平驱动信号 P1H、P2H、P3H、P4H，一路门复位信号 RG。在垂直信号驱动下，每一列的 64 个像素单元存储的信号电荷转移到同一像素中准备输出。转移到同一像素中的信号电荷在四相输出信号驱动下依次输出，此时 AD 同步对输出信号进行处理。积分时间段内 CCD 曝光，光电转换开始，像素单元中信号电荷随积分时间增加而增加。采用 Altera 公司的 CPLD 芯片 EPM7064 作为时序发生器，时序产生的原理如图 7 所示。

由 STM32 定时器产生的 1 MHz 方波信号作为 CPLD 的输入主时钟，分频器将输入主时钟分频后作为计数器的输入时钟。计数器通过对输入时钟脉冲计数控制输出电平的高低，从而产生垂直移位寄存器时钟 P1V、P2V 和水平移位寄存器时钟 P1H、P2H、P3H、P4H，两个脉冲计数器控制垂直和水平移位寄存器输出脉冲个数，精确地控制信号电荷的转移。

CPLD 芯片 EPM7064 输出的时序信号最大只有 10 mA 的电流输出，无法满足时序信号的电平转换，需要在输出时序信号后加入三态驱动器 74HCT540。74HCT540 可以提供 8 路信号输出，输入输出延时只有 11 ns。CPLD 芯片 EPM7064 输出的时序信号，高电平和低电平分别为 3 V 和 0 V。CCD 垂直驱动信号 P1V、P2V 高低电平分别为 6 V、-8 V，水平驱动信号 P1H、P2H、P3H、P4H 和门复位 RG 高低电平分别为 6 V、-5 V。6 V、-8 V 和-5 V 三个电压的稳定性和噪声性能将直接影响 CCD 探测器输出信号的信噪比。

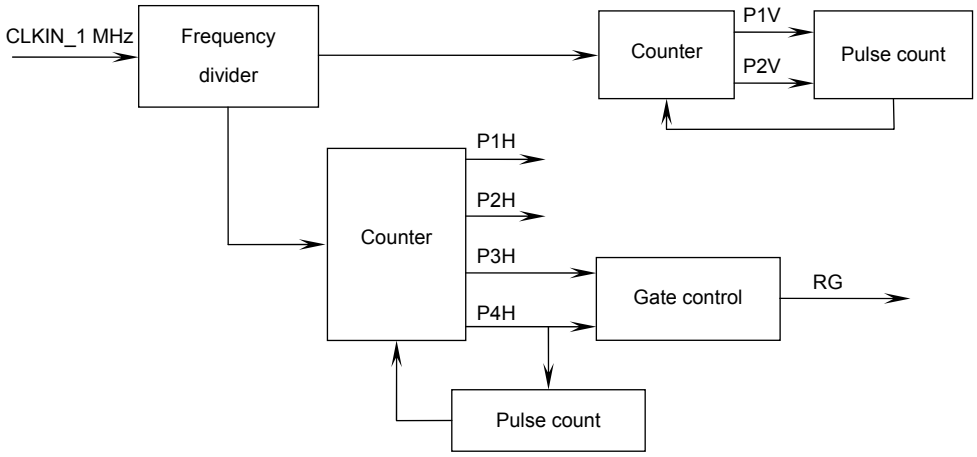


图 7　时序产生原理图

Fig. 7　Timing generation schematic

2.3.3 A/D 转换及数据存储

在对 CCD 输出信号进行模数转换之前，先对输出信号进行成分分析并做相应的处理。CCD 输出信号不仅包含所需要的光谱信号，同时混有复位脉冲带来的干扰和其他各种噪声。必须对输出信号进行前端处理消除噪声干扰得到有效信号，然后送入 AD 进行模数转换。前端处理主要包括：信号放大，电压箝位，双相关采样等。美国 AD 公司的模数转换芯片 AD9826 内部集成了电压箝位、双相关采样、基线调节、可配置的数字增益放大器，与采用外部独立元件进行信号处理的方式相比，器件减少、成本降低的同时，也缩小了 PCB 板的尺寸。

由于 CCD 工作方式而引入的复位噪声、暗电流噪声和输出节点电容引起的输出噪声无可避免，通过双相关采样的方式可大大消除这些噪声的干扰。双相关采样原理见图 8。双相关采样的原理就是在单个像素输出的时钟周期内进行两次采样，第一次采样点在浮置栅电平部分，第二次采样点在视频信号电平部分，两次采样的电平信号相减得到有效的视频信号[16-17]。

增益与基线可调整是微型光谱仪智能化的重要体现，在光强变化大及微弱光信号的检测中非常必要。AD9826 内部集成了最高达 6 倍的可编程增益控制器与±300 mV 的可编程数字基线控制器，通过配置相应寄存器可实现信号的放大和基线的调整。

模数转换后的信号存储在独立的静态 RAM 中，在保证数据采集速率和传输速率的同时，实现了数据存储和传输的分离。选用的探测器是 S11510，其像素单元总数为 2068×70，AD 精度为 16 bit，所以至少需要 2068×16/1024(约 32 kbit)个存储单元。因此，选用该型号存储器 IS61LV3216L，其存储容量达 512 kbit，最大存取时间 20 ns，满足设计对存储容量和速度的要求。为了实现光谱数据实时显示，采用 DMA 原理设计了高速数据采集系统，实现了存储器和 I/O 设备之间的数据直接传输[18-20]。

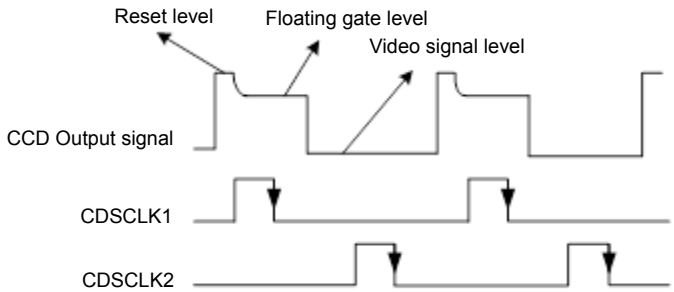


图 8　双相关采样原理图

Fig. 8　Principle of correlated double sampler (CDS)

3　程序设计

3.1　CPLD 程序设计

选用 EPM7064AETC 芯片产生 CCD 驱动时序，在 Quartus II 软件平台上利用 Verilog HDL 语言实现了计数、分频和门逻辑时序的设计。根据 S11510 芯片手册的时序要求，P1V、P2V 的高电平脉冲时间典型值 8 μs，P1H、P2H、P3H、P4H 高电平脉冲时间要求 2 μs。STM32 产生 1 MHz、占空比 50%的方波信号作为 CPLD 输入主时钟。计数模块对输入时钟计数产生周期 16 μs、占空比 50%、相位差半个周期的两路方波信号 P1V、P2V。同理获得四路水平驱动信号。根据时序要求和 P3H、P4H 之间相位关系，复位门信号 RG 可由 P3H 和 P4H 进行与运算得到。各时序模块设计完成后，通过 Quartus II 调用第三方仿真软件 ModelSim 进行时序仿真，仿真结果如图 9。

3.2　STM32 程序设计

STM32 控制整个系统的正常运行，流程图如图 10 所示。系统上电后，首先进行系统初始化和各单元参

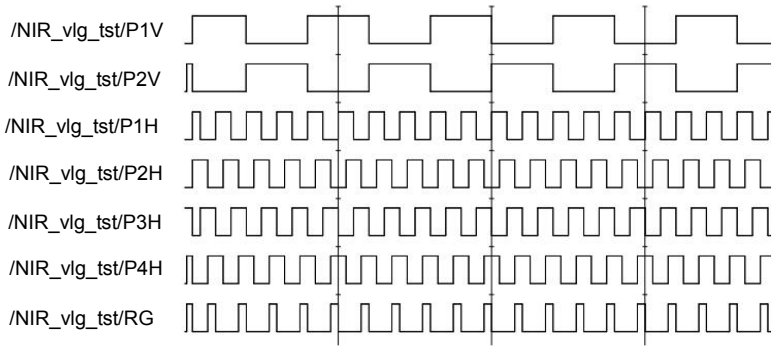


图 9　时序仿真图

Fig. 9　Diagram of CPLD timing simulation

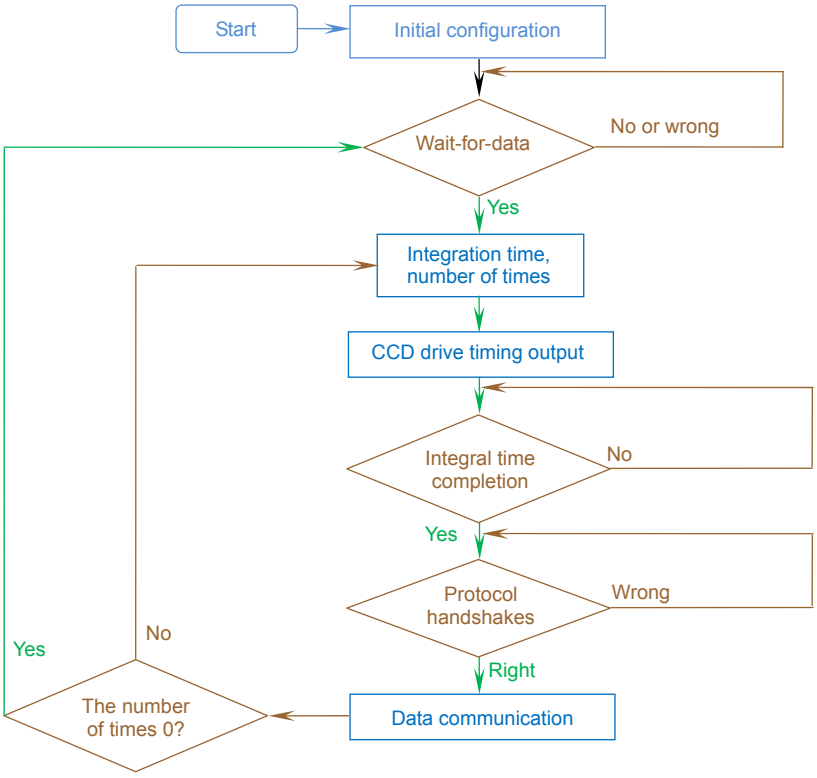


图 10　STM32 控制流程图

Fig. 10　Flow chart STM32 control

数的配置，等待上位机通过 USB 传送数据。如果下位机没有接收到上位机发送的命令或者数据错误，重新接收上位机发送来的数据，直到 STM32 正确接收命令。数据正确传送到下位机后，STM32 获取积分时间和积分次数，控制 CCD 时序输出，CCD 正常工作，待曝光时间结束后，CCD 输出的模拟信号经 AD 转换后存储在 SRAM 中。STM32 通过 USB 口与上位机握手，将数字信号传送到上位机。

4　性能测试

与基于线阵 CCD 的海洋光学的 USB2000+型光纤光谱仪进行了性能对比，两光谱仪的参数对比如表 2 所示，测试结果如图 11 所示。相同积分时间下(1 ms)，基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光纤光谱仪对卤钨灯光源的光谱强度响应是 USB2000+的 11 倍左右，说明相较于基于线阵 CCD 的微型光纤光谱仪，采用面阵 CCD 高灵敏度光谱仪对微弱光信号有着更高的灵敏度。信噪比测试结果如图 12 所示，全光谱范围内 USB2000+的信噪比大部分位于 300:1 以下，而基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光纤光谱仪信噪比普遍大于 500:1。动态范围指整个光谱仪系统的感光范围，也是评判一台光谱仪性能优劣的重要参数，图 13 为两台光谱仪感光范围的测试结果，图 13(a)和图 13(b)对比可以看出基于面阵 CCD 的光谱仪系统比基于线阵 CCD 的光谱仪动态范围提高了一个数量级以上，大大提高了光谱仪的性能。

表 2　参数对比表

Table 2　Parameter comparison table

Parameter	USB2000+	Independent design
Measurement wavelength/nm	350~1050	200~900
Minimum integral time/ms	1	0.5
SNR	250:1	500:1
A/D conversion/bit	16	16
CCD model	ILX511B	S11510
CCD response range/nm	200~1100	200~1100
Dynamic range	1300:1	20000:1

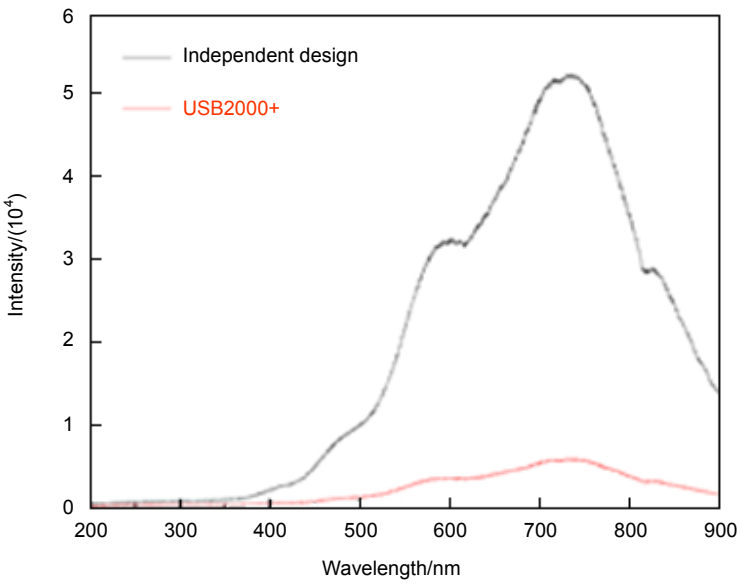


图 11　卤钨灯光谱测试图

Fig. 11　The spectrum of halogen lamp

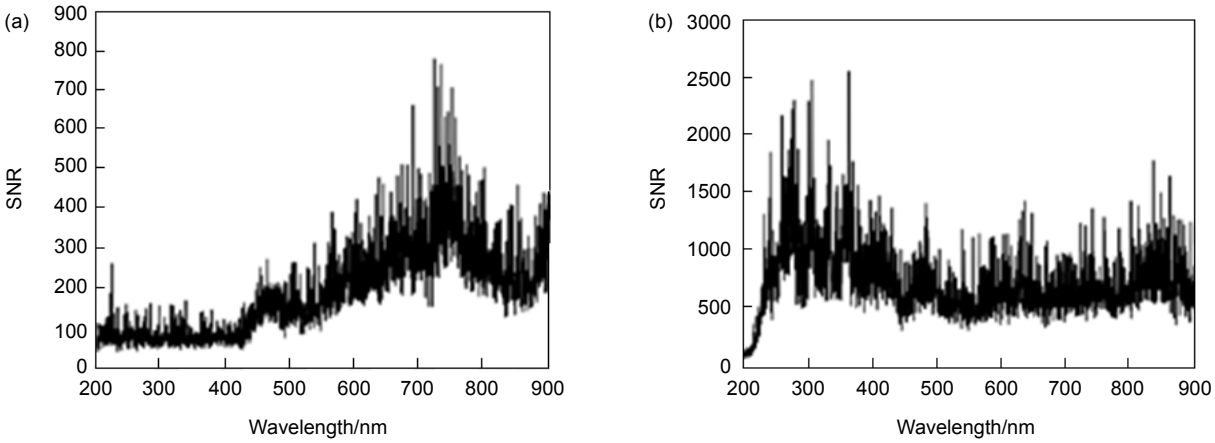


图 12　信噪比测试结果曲线。(a) USB2000+; (b)高灵敏度光谱仪

Fig. 12　Curve of the signal to noise ratio test. (a) USB2000+; (b) High sensitivity micro spectrometer

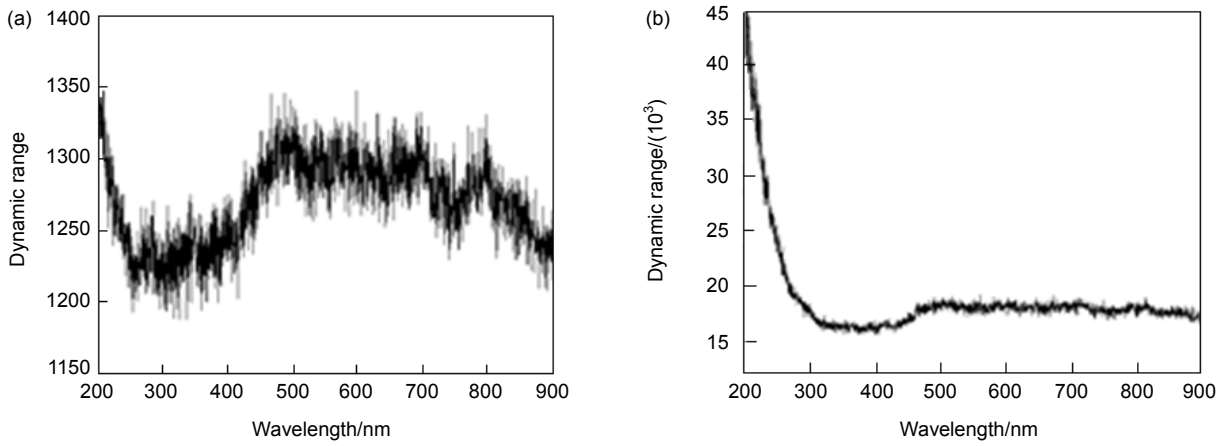


图 13　动态范围测试结果曲线。(a) USB2000+; (b) 高灵敏度光谱仪

Fig. 13　Curve of the dynamic range test. (a) USB2000+; (b) High sensitivity micro spectrometer

5　结　论

设计并实现了基于面阵 CCD 的高灵敏度微型光纤光谱仪，选用了滨松 S11510 近红外增强型面阵 CCD，可以实现紫外到近红外光谱的高灵敏度测量。采用 STM32 和 CPLD 配合的工作方式，产生复杂的面阵 CCD 驱动时序。CCD 输出的视频信号经过双相关采样消除了复位噪声，转换后数字数据存储在外部独立的 SRAM 中。为了实现数据的快速传输，基于 DMA 原理设计了高速数据采集与传输系统。实验结果表明，所研发的高灵敏度微型光纤光谱仪灵敏度较基于线阵 CCD 的 USB2000+光纤光谱仪灵敏度提高了 11 倍左右，动态范围为 500:1，信噪比达到 15000:1 以上，性能优良，适合于荧光测量，DNA 测序、拉曼光谱分析和低光度检测等需进行微弱信号检测的应用场合。

参考文献

[1] Chen Z K, Wang S X, Wang Y T, *et al*. Design of grating spectrometer optical structure[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(5): 704–708.
陈至坤，王淑香，王玉田，等. 光栅光谱仪光路结构的设计[J]. 应用光学, 2015, **36**(5): 704–708.

[2] Tong J P, Gao J X, Wang F, *et al*. Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini-spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(11): 1101–1106.
童建平，高建勋，汪飞，等. 微型光谱仪中传感器 S11639 的非线性校正[J]. 光电工程, 2017, **44**(11): 1101–1106.

[3] Zhang W L, Tian F C, Zhao Z Z, *et al*. Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(5): 488–497.
张文理，田逢春，赵贞贞，等. 空间外差光谱仪的干涉图校正[J].

光电工程, 2017, **44**(5): 488–497.

[4] Xia G, Wu S, Huang C, *et al*. Design of crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0422003.
夏果, 吴骊, 黄禅, 等. 交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, **46**(4): 0422003.

[5] Chen T X, Yang H D, Chen K X, *et al*. Coma and resolution in wide spectral region Czerny-Turner spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1692–1696.
陈谭轩, 杨怀栋, 陈科新, 等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的彗差与分辨率[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(6): 1692–1696.

[6] Xie R, Pei D X, Yao Q Q. Signal integrity analysis in high-frequency signal dynamic test[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, **38**(3): 773–779.
谢锐, 裴东兴, 姚琴琴. 高频信号动态测试中的信号完整性分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, **38**(3): 773–779.

[7] Feng F, Duan F J, Bo E, *et al*. An optical design of small-size echelle spectrograph[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(7): 20–25.
冯帆, 段发阶, 伯恩, 等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程, 2014, **41**(7): 20–25.

[8] Ge M F, Qi H X, Wang Y X, *et al*. Spectral calibration for the high spectral resolution imager[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(12): 14–19.
葛明锋, 亓洪兴, 王雨曦, 等. 高分辨力成像光谱仪光谱定标研究[J]. 光电工程, 2015, **42**(12): 14–19.

[9] Huang Y S, Su Y Q, Sheng B, *et al*. Optimization design for the high resolution concave grating spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(12): 1–7.
黄元申, 苏仰庆, 盛斌, 等. 高分辨力凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光电工程, 2015, **42**(12): 1–7.

[10] Austin D R, Witting T, Walmsley I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(19): 3846–3853.

[11] Zhang Z H, Tian D, Yang Y X. Methods for design of linear CCD driving circuit[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2004(6): 32–33, 52.
张智辉, 田地, 杨义先. 线阵 CCD 驱动电路设计的几种方法[J]. 仪表技术与传感器, 2004(6): 32–33, 52.

[12] Qin L, Dong L L, Xu W H, *et al*. Method for conversion calibration between CCD image gray value and illumination[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, **36**(3): 639–644.
秦莉, 董丽丽, 许文海, 等. CCD 图像灰度与照度的转换标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, **36**(3): 639–644.

[13] Yang D D, Ma H G, Xu D H, *et al*. Design of the optimal chaotic excitation for the parameter change detection of analog circuit[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, **36**(4): 943–950.
杨东东, 马红光, 徐东辉, 等. 模拟电路参数变化检测最优混沌激励设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, **36**(4): 943–950.

[14] Wang R M, Xu D, Jiang Y P, *et al*. Innovation application of area array CCD based on CPLD[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, **6150**: 615041.

[15] Xu D Y, Tong J P, Gao J X, *et al*. Fiber spectrometer optical simulation optimization and calibration[J]. *Chinese Journal of 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.

[16] Qiao D E, Gu Y H, Xu X L. Wavelength calibration algorithm in grating spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2283–2287.
乔道鄂, 谷玉海, 徐小力. 光栅光谱仪波长校准算法研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2283–2287.

[17] Chen S J, Cui J C, Liu Y J, *et al*. A method of precise adjustment and calibration for high-resolution echelle spectrograph[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(8): 2280–2285.
陈少杰, 崔继承, 刘玉娟, 等. 高分辨率中阶梯光栅光谱仪精确装调与标定[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(8): 2280–2285.

[18] Wu X H, Zhu Y T, Wang L. Optical design of high resolution echelle spectrograph[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(5): 442–447.
武旭华, 朱永田, 王磊. 高分辨率阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光学 精密工程, 2003, **11**(5): 442–447.

[19] Shi J H, Fu S H, Xie W K. Error correction of spectral response characteristic of grating spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(3): 483–490.
施建华, 伏思华, 谢文科. 光栅光谱仪光谱响应误差校正[J]. 中国光学, 2014, **7**(3): 483–490.

[20] Chen S, Ke F S, Le Y K. Calibration of grating spectrometer[J]. *Physics Experimentation*, 2012, **32**(3): 44–46.
陈思, 柯福顺, 乐永康. 光栅光谱仪的标定[J]. 物理实验, 2012, **32**(3): 44–46.

Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD

Xu Danyang*, Du Chunnian

College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

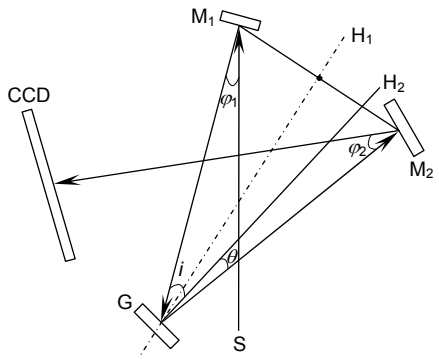


Diagram of crossed Czerny-Turner optical system

Overview: Spectrometer is an important instrument for spectral detection. It is used to measure the composition and structure of a substance. It has the advantages of fast measuring speed, high accuracy and nondestructive measurement. Traditional spectroscopic instruments, with their huge volume and high price, almost limit such instruments to the laboratory. In recent years, on the one hand, the urgent needs of biomedicine, science and technology agriculture and other applications require analytical instruments to develop in the direction of miniaturization and intelligence. On the other hand, it is possible to make the spectrometer miniature, thanks to the development of microelectromechanical systems (MEMS) and the mass production of optical fiber devices, as well as the appearance of micro optoelectronic detection devices.

Compared to the linear array CCD, the area array CCD is more sensitive to the spectral response, which is very suitable for the applications of high quantum efficiency, such as pesticide residue detection, DNA detection, fluorescence detection and Raman spectrum detection. Therefore, the development of highly sensitive micro fiber spectrometer can broaden the applications of spectrometers, which is of great practical significance. At present, the technology of micro spectrometer is mostly used at home and abroad. The first method is to use MEMS technology, two element optics and integrated optics. The second method is to use the miniaturization of components and systems, which is the mainstream method at present. The American Brimrose company and Jet Propulsion laboratory developed a micro crystal NIR spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF) with a new type of filter technology, with a resolution of 0.0125 nm. Relevant research institutes in China include research institutes such as Zhejiang University, Chongqing University and Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, CAS.

The optical resolution of 1 nm is obtained by using an optimized cross-asymmetric Czerny-Turner optical system structure. By combining the design methods of DC-DC and LDO, the complex power system with 6 voltage outputs is realized through USB power supply. The CCD drive timing design is achieved by Verilog HDL language and the signals are output through Altera's EPM7064 chip. After the CCD output video signal is converted by high-speed 16 bit AD chip AD9826, digital signals are stored in a separate static RAM, allowing data acquisition and reading to be separated. The sensitivity of the designed micro-high sensitivity spectrometer is 11 times of that of spectrometer based on linear array CCD. Furthermore, it has a dynamic range of 20000: 1 and a signal-to-noise ratio of 500: 1. This work greatly improves the microfiber spectrometer performance.

Citation: Xu D Y, Du C N. Design and implementation of high sensitivity micro spectrometer based on area array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(11): 180152

Supported by National Natural Science Foundation of China (11604295) and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LQ17C100002)

* E-mail: xudanyang@zjutu.edu.cn