

文章编号 1004-924X(2012)08-1725-07

中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机的设计

潘明忠¹, 刘玉娟^{1,2}, 陈少杰^{1,2}, 宋楠^{1,2}, 崔继承^{1,2*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了高精度采集中阶梯光栅光谱仪的谱图, 设计了一种适用于中阶梯光栅光谱仪原理样机的高性能面阵 CCD 相机。首先, 根据中阶梯光栅光谱仪的谱图特点和 CCD 芯片的特性, 设计了面阵 CCD 相机的时序产生电路、驱动电路及数据采集处理电路, 实现了面阵 CCD 相机的低噪声、高灵敏度以及高动态范围。然后, 利用 LabVIEW 编写了 CCD 相机测试软件。最后, 利用设计的面阵 CCD 相机对汞灯谱线进行了测试。结果表明: 面阵 CCD 相机获取的二维谱图图像清晰、信噪比较高; 经二维谱图还原后, 可以得到标准的汞灯谱线。该相机性能稳定、可靠, 满足中阶梯光栅光谱仪原理样机的研制要求。

关键词: 中阶梯光栅光谱仪; 二维谱图; 面阵 CCD 相机; 时序

中图分类号: TH744.1; TB853.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1725

Design of echelle spectrograph CCD camera

PAN Ming-zhong¹, LIU Yu-juan^{1,2}, CHEN Shao-jie^{1,2}, SONG Nan^{1,2}, CUI Ji-cheng^{1,2*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: jicheng_cui@yahoo.com.cn

Abstract: To get the high accuracy 2-D spectra of a self-designed echelle spectrograph, a high performance area CCD camera was designed. Based on the characteristics of echelle spectrograph and CCD chip, the timing generator circuit, drive circuit and the data processing circuit for the CCD camera were developed, by which the low noise, high sensitivity and high dynamic range were realized at the same time. Then, the test software of CCD camera was programmed with LabVIEW. Finally, the 2-D spectra of a Hg lamp were tested by using the area CCD camera. The result demonstrates that the area CCD camera can get the sharp 2-D spectra with high SNR. After reducing the spectra of Hg lamp, the standard spectral line is obtained. This CCD camera is steady, reliable and meets the needs of echelle spectrograph completely.

Key words: echelle spectrograph; 2-D spectrum; area CCD camera; timing

收稿日期: 2012-04-11; 修订日期: 2012-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108032); 国家重大科研装备研制项目 (No. ZBYZ2008-1)

1 引言

中阶梯光栅光谱仪是一种全谱直读的新型高端光谱仪器,它以中阶梯光栅为主色散元件,经低色散元件进行交叉色散后,在焦面处形成二维谱图,该二维谱图被探测、接收、数字化后,采用特定的谱图还原方法可以转换为高分辨率的一维光谱信息。与常规光谱仪器相比,中阶梯光栅光谱仪具有高光谱分辨率、低检出限、宽波段、无移动部件、结构紧凑、全谱直读等优点,代表了现代光谱技术的发展趋势^[1-5]。

20 世纪 90 年代,随着新一代光电转换器件 CID 及 CCD 的成功应用,中阶梯光栅光谱仪开始在光谱分析领域表现出独特的优势^[6]。自 2004 年德国耶拿公司研制成功第一台商品化扫描型中阶梯光栅光谱仪 contrAA 以来,国外已有 Andor、PI、Leeman、Varian、PerkinElmer 等公司推出了商品化的基于中阶梯光栅的光谱分析仪器,国内的聚光科技、北京纳克等公司也在开展相关研究工作,中阶梯光栅光谱仪已经成为光谱分析领域新的研究热点。目前,商品化的中阶梯光栅光谱仪均采用高性能的科学级面阵 CCD 相机作为接收系统,如 Andor 公司的 DV434 CCD 相机、DH734 ICCD 相机以及 PI 公司的 PIXIS 相机等。由于科学级 CCD 相机价格昂贵,且国内无商品化的产品推出,因此,极大地限制了国内自主研发中阶梯光栅光谱仪的步伐。

面阵 CCD 相机作为接收二维谱图的重要器件,直接决定中阶梯光栅光谱仪的性能,设计大面阵、低噪声、高灵敏度、高动态范围及高量子效率的 CCD 相机,能够充分发挥中阶梯光栅的独特技术优势,对实现并提升中阶梯光栅光谱仪的整机性能具有重要意义。

本文针对中阶梯光栅光谱仪的性能需求,设计了一种高性能科学级面阵 CCD 相机,详细论述了相机的设计原理及硬件电路设计,并成功将其应用于中阶梯光栅光谱仪原理样机,该原理样机基于自主研发的中阶梯光栅,是国内首台具有完全自主知识产权的中阶梯光栅光谱仪,对推动我国高端光谱仪器产业发展意义重大。

2 中阶梯光栅光谱仪

中阶梯光栅光谱仪的光学系统结构^[7]如图 1 所示,系统采用 Czerney-Turner 结构,由入射针孔、准直镜、中阶梯光栅、反射棱镜、聚焦镜及面阵 CCD 相机组成。

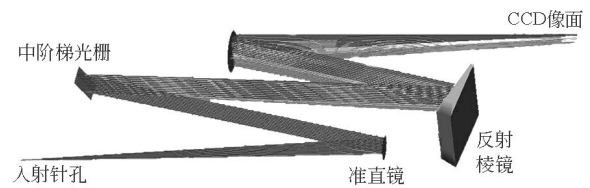


图 1 中阶梯光栅光谱仪光学系统结构示意图

Fig. 1 Optical system diagram of echelle spectrograph

光源经入射针孔及准直镜后平行入射到高色散的中阶梯光栅进行主方向色散,由于利用中阶梯光栅的多个高衍射级次,因此其各级次自由光谱区较窄且严重重叠。经低色散的反射棱镜进行横向色散后,将级次重叠的光谱分离,得到二维谱图,此方式即为交叉色散。二维谱图经聚焦镜后,由面阵 CCD 相机接收,采用特殊的谱图还原方法,可将二维谱图还原为一维光谱信息。图 2 所示为波长 300~600 nm、衍射级次为 45~89 级时的中阶梯光栅光谱仪的理想二维谱图。

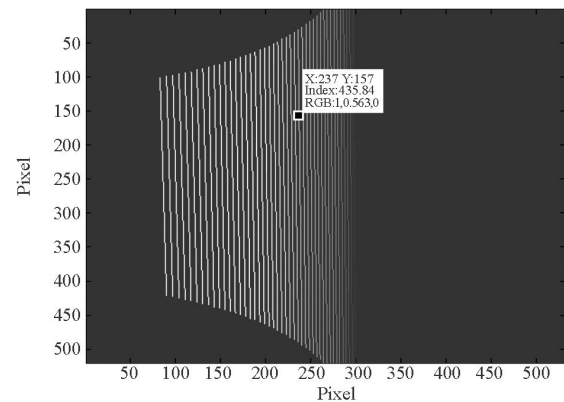


图 2 中阶梯光栅光谱仪的理想二维谱图

Fig. 2 Ideal 2-D spectra of echelle spectrograph

中阶梯光栅光谱仪原理样机的主要技术指标如表 1 所示:

表 1 中阶梯光栅光谱仪的主要技术指标

Tab. 1 Main parameters of echelle spectrograph

系统参数	指标
光谱范围/nm	200~900
光谱分辨率/nm	15000@200
波长精度/nm	0.01
入射针孔尺寸/ μm	25
体积/ m^3	500 mm \times 400 mm \times 300 mm

3 中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机设计

3.1 CCD 芯片选型

中阶梯光栅光谱仪的二维谱图包含入射光的波长信息及能量信息。从波长信息的角度来讲,根据二维谱图的特点,为了获得足够宽的光谱范围,要求 CCD 相机具有大的感光面积;为了获得足够高的光谱分辨率,要求 CCD 相机具有较小的像元尺寸。从能量信息角度来讲,中阶梯光栅将入射能量进行了高分辨率、多衍射级次的色散,再经棱镜横向色散后,将入射针孔处的小尺寸单点能量色散为 CCD 像面处的矩阵式能量,同时考虑光学系统的能量传递损失,到达面阵 CCD 相机的光谱信号的能量密度较低,为了满足系统信噪比的要求,面阵 CCD 相机必须具有高量子效率、高灵敏度、低噪声等特性;为了对二维谱图定量测量,要求面阵 CCD 相机具有较高的响应均匀性。因此,高性能的科学级 CCD 芯片是二维谱图接收器件的最佳选择。

CCD47-10 是 E2V 公司生产的一种高性能背照式全帧面阵 CCD 图像传感器,其像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$,有效像元数为 $1\ 024\ \text{pixel}\times 1\ 024\ \text{pixel}$,光谱响应范围为 $200\sim 1\ 100\ \text{nm}$,峰值量子效率为 $60\%\ @\ 650\ \text{nm}$,芯片采用背照式结构,辅以极低噪声的放大器,使其成为中阶梯光栅光谱仪二维谱图的理想接收器件。

3.2 相机总体设计

面阵 CCD 相机以 CCD47-10 为核心,采用现场可编程门阵列(FPGA)作为主控单元,通过 Camera Link 接口进行数据传输,相机的原理如

图 3 所示。相机系统由时序产生电路、驱动电路(水平驱动、垂直驱动)、偏置电压电路、数据采集及处理电路(预处理、CCD 模拟信号处理器、CCD 模拟信号处理器控制器、后处理、数据传输)、控制单元及电源管理电路组成。时序产生电路负责生成 CCD 工作所需的各种数字时序信号;驱动电路将数字时序信号变换为 CCD 要求的模拟功率信号;偏置电压电路输出 CCD 工作所需的各种直流电压;CCD 输出的模拟图像信号经模拟预处理后,由 CCD 模拟信号处理器进行直流重建、相关双采样、可编程放大、暗电平箝位、模数转换,转换为 16 位数字图像信号,再经过数字后处理电路后由 Camera Link 接口传输至计算机;控制单元的作用是与 Camera Link 接口芯片进行双向通信,接收计算机传输的相关指令,完成时序产生电路参数设置、电源管理电路控制、CCD 模拟信号处理器控制器参数设置以及图像数据传输控制等功能;电源管理电路将输入的外部电源转换为系统所需的各种电压。其中,时序产生电路、CCD 模拟信号处理器控制器、后处理电路及控制单元由 FPGA 实现。

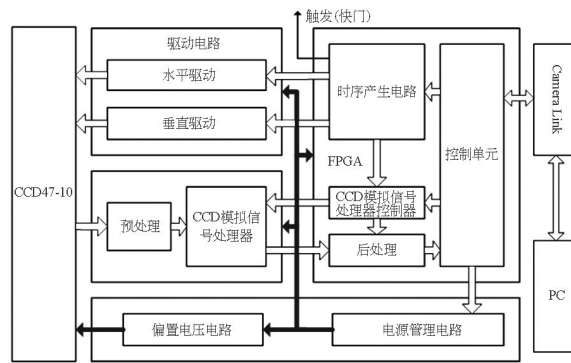


图 3 CCD 相机系统框图

Fig. 3 System diagram of CCD camera

3.3 时序产生电路设计

面阵 CCD 图像传感器驱动信号多且时序复杂,一般的分立器件很难完成;而专用的驱动芯片价格昂贵且功能固定,因此采用 FPGA 作为时序产生电路,具有电路结构简单、配置灵活以及成本低等优势^[8]。

图 4、5 所示为 CCD47-10 的行转移及读出时序,其中 $I\phi 1, I\phi 2, I\phi 3$ 为 CCD 的行转移时钟; $R\phi 1, R\phi 2, R\phi 3$ 为 CCD 的读出时钟; ϕR 为 CCD 的

性,在快门打开或关闭时,无法透过或阻隔所有的光线;机械快门能够克服 LCD 快门的缺点,但其响应速度相对较慢。综合考虑,中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机选用了机械快门。

根据中阶梯光栅光谱仪的结构特点,将快门放置在仪器的入射针孔处,能够降低对快门孔径的要求,设计时选用 UNIBLITZ 公司的 LS2 机械快门,其孔径为 2 mm,最短曝光时间可达到 1 ms,最高重复频率为 400 Hz,完全满足 CCD 相机的设计要求。

4 实验与结果

4.1 测试软件

以 NI 公司的 PCI-1426 为图像采集卡,基于 LabVIEW 设计了 CCD 相机测试程序,程序界面如图 7 所示。测试程序包括图像预览、CCD 相机积分时间设置、抓取图像、连续采集图像以及图像存储等。

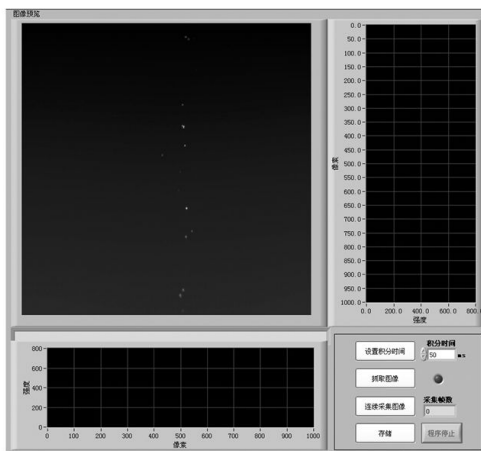


图 7 CCD 相机测试程序

Fig. 7 Test program of CCD camera

4.2 实际测试

将研制的 CCD 相机安装在中阶梯光栅光谱仪原理样机上,并对其进行实际测试。对汞灯谱线进行了探测,CCD 相机的积分时间设置为 50 ms,得到的图像如图 8 所示,基于自行研制的二维谱图还原算法得到的汞灯谱线如图 9 所示,其中获取的 313.15, 365.01, 404.65, 435.83, 546.07 和 579.12 nm 等谱线均为汞灯光谱,测得 435.83 nm 谱线的全波半高宽为 0.01 nm。

由于汞灯光谱为离散的线光谱,因此对应的

中阶梯光栅光谱仪二维谱图应为离散的空间点,从实际的测试结果可以看出,CCD 相机拍摄的二维谱图图像清晰、信噪比较高,能够满足中阶梯原理样机的使用要求。存在的主要问题是,由于 CCD 相机未采用制冷技术,因此存在一定的暗电流噪声,相机工作在长时间曝光模式时尤为明显,需在下一步的工作中加以改进。



图 8 CCD 相机接收到的汞灯图像

Fig. 8 Image of Hg lamp from CCD camera

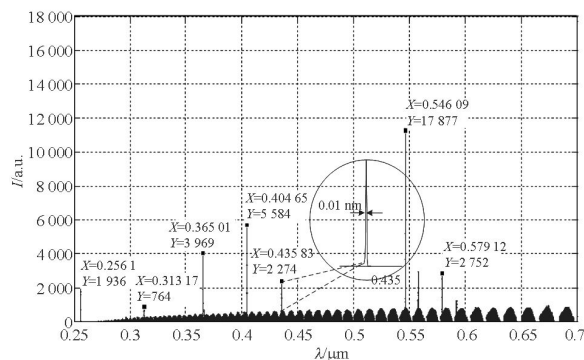


图 9 二维谱图还原后的汞灯谱线

Fig. 9 Hg lamp spectra after reducing 2D spectra

5 结 论

论述了高性能科学级 CCD 相机的设计原理及相关硬件的电路设计,并利用该相机对汞灯谱线进行了实际测量。结果表明,CCD 相机获取的二维谱图图像清晰、信噪比较高,能够满足中阶梯光栅光谱仪原理样机的研制要求。高性能科学级 CCD 相机的成功研制,为开发具有完全自主知识产权的中阶梯光栅光谱仪奠定了基础,具有重要

的现实意义。制冷技术是进一步提高 CCD 相机性能的有效手段,以本文研制的面阵 CCD 相机为基础,加入三级半导体热电制冷器,并对相机结构

进行相应改进,能够有效降低相机暗电流噪声并实现长时间曝光,达到主流商业级面阵 CCD 相机的性能,后续将重点在此方面开展研究工作。

参考文献:

- [1] TOUSEY R, PURCELL J D, GARRETT D L. An echelle spectrograph for middle ultraviolet solar spectroscopy from rockets [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(3): 365-372.
- [2] RANK D H, EASTMAN D P, BIRTLEY W B, *et al.*. Echelle-type spectrograph for the near infrared [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1960, 50(8): 821-825.
- [3] 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.
- WU X H, ZHU Y T, WANG L. Optical design of high resolution echelle spectrograph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 442-447. (in Chinese)
- [4] 李娜娜, 安志勇, 崔继承. 中阶梯光栅光谱仪光学系统的安装及检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 531-536.
- LI N N, AN ZH Y, CUI J CH. Aligning and testing of optical system of echelle spectrography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 531-536. (in Chinese)
- [5] 唐玉国, 陈少杰, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2130-2135.
- TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2130-2135. (in Chinese)
- [6] 谢品, 倪争技, 黄元申, 等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. *激光杂志*, 2009, 30(2): 4-6.
- XIE P, NI ZH J, HUANG Y SH, *et al.*. Application research progress in the echelle grating [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 4-6. (in Chinese)
- [7] 唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1989-1995.
- TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1989-1995. (in Chinese)
- [8] 潘明忠. 便携式地面成像光谱辐射计研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2010.
- PAN M ZH. *Design of Portable Field Hyperspectral Imaging Spectrometer* [D]. Shanghai: SITP, 2010. (in Chinese)
- [9] 贾建禄, 王建立, 郭爽, 等. 基于 Camera Link 的高速图像采集处理器[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6): 914-918.
- JIA J L, WANG J L, GUO SH, *et al.*. High speed image grabber and processor based on camera link [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 914-918. (in Chinese)
- [10] 程祖桥, 邓辉, 王锋, 等. 基于 Camera Link 总线的 CCD 高速图像采集技术[J]. *天文研究与技术*, 2011, 8(4): 363-368.
- CHENG Z Q, DENG H, WANG F, *et al.*. A study on Camera-Link-based high-speed CCD image acquisition techniques [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, 8(4): 363-368. (in Chinese)
- [11] 黄宗福, 王宏义, 韩建涛, 等. 天文全帧 CCD 图像拖尾的快速去除方法[J]. *信号处理*, 2010, 26(4): 607-611.
- HUANG Z F, WANG H Y, HAN J T, *et al.*. Quick method of removing smear in astronomical full-frame CCD image [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(4): 607-611. (in Chinese)

作者简介:



潘明忠(1982—),男,吉林辽源人,博士,助理研究员,2005年于华东师范大学获学士学位,2010年于中科院研究生院获得博士学位,主要从事光谱仪器研制及光栅制造的研究。E-mail: mzp-pan@foxmail.com



宋楠(1985—),男,吉林省吉林市人,博士研究生,研究实习员,2007年于北京理工大学获学士学位,2010年于中科院研究生院获硕士学位,主要从事光谱仪器光机结构设计方面的研究。E-mail: kane_martin@163.com



刘玉娟(1984—),女,山东泰安人,博士研究生,2007年于曲阜师范大学获学士学位,2010年、2012年于中科院研究生院分别获硕士、博士学位,主要从事光谱仪设计、装调及光谱数据处理技术的研究。E-mail: xuliuyujuan@163.com



崔继承(1976—),男,吉林长春人,博士研究生,副研究员,2000年于北京理工大学获学士学位,2003年于中科院研究生院获硕士学位,主要从事光学设计理论及光谱仪器设计的研究。E-mail: jicheng_cui@yahoo.com.cn



陈少杰(1985—),女,黑龙江宁安人,博士研究生,助理研究员,2007年于南京理工大学获学士学位,2010年于中科院研究生院获硕士学位,主要从事光谱仪器研发及光谱信息处理技术的研究。E-mail: shaojie.csj@gmail.com

(本栏目编辑:曹金)

●下期预告

环形激光器双光路椭圆度测量系统

杨昊东^{1,2},梁冬明¹,岳寰宇¹,范汉伟¹,刘立武¹

(1. 中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003;

2. 国防科技大学 光电科学与工程学院,河南 长沙 410073)

为了实现通过测量输出光椭圆度对环形激光器进行调控,研究建立了环形激光器双光路椭圆度测量系统。分析了环形激光器的频率响应特性,采用S线偏光作为外部输入光以提高稳频精度,并搭建了环形激光器双光路稳频与测量系统。通过采用高精度稳频和椭圆度测量方法,使稳频精度达到1.8%,椭圆度测量值波动为0.65%,满足了椭圆度测量的要求。