

文章编号 1004-924X(2013)02-0496-07

# 科学级 CCD 远程图像采集系统

罗通顶\*, 李斌康, 郭明安, 杨少华, 周 鸣

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:**介绍了一种基于高分辨率超感光度(EXview)CCD的光纤远程传输采集系统的设计方法。该系统利用专用集成芯片实现其时序驱动;双复杂可编程逻辑器件(CPLD)完成系统的逻辑控制;采用带相关双采样的16位高精度模数变换器(ADC)对模拟视频进行数字化,从而提高系统动态范围。为满足其极端实验环境的应用,基于TLK1501进行大容量视频数据的远程传输;利用USB接口实现了计算机终端采集。最后,实验测试了系统的两个重要的评价参数:动态范围和系统灵敏度。该系统具有140万像素、16位高精度数字化位数、30 km以上的远程传输能力,其动态范围为1000~1500倍、灵敏度为2.34 ADU/e<sup>-</sup>左右,暗电流约为6 e<sup>-</sup>/pixel·s<sup>-1</sup>[>32 °C]。实验显示该系统适用于对分辨率、灵敏度、安全性等要求高的科学研究中。

**关键词:**科学级 CCD; ICX 285 CCD; 远程传输; 图像采集

**中图分类号:** TN386.5; TB853.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0496

## Remote image acquisition system with scientific grade CCD

LUO Tong-ding\*, LI Bin-kang, GUO Ming-an, YANG Shao-hua, ZHOU Ming

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: snluohui@126.com

**Abstract:** The design method of a fiber transmission remote image acquisition system based on a high resolution EXview CCD is presented and the main units in the system are introduced in detail. The system utilizes a special IC to achieve time driving and takes double Complex Programmable Logic Devices(CPLDs) to complete the logic control. In order to improve dynamic ranges, it uses a 16 bit high resolution Digital to Analog Converter(ADC) to digitalize video signals. Furthermore, the system can transfer mass video data in long-distances based on the TLK1501, and can perform data terminal collection with a computer by a USB. Finally, two important parameters: dynamic range and the system gain are estimated in an experiment. The system offers its specifications are a resolution of 1.4 million pixels, digitizer type of 16 bits, and remote transmission less than 30 km. Moreover, its dynamic range is 60—65 dB, system gain is 2.34 ADU/e<sup>-</sup>. Experiments show that designed system is fit for the science research which demands for the best quality mentioned above.

**Key words:** scientific grade CCD; ICX 285 CCD; remote transmission; image acquisition

收稿日期:2012-11-15;修订日期:2012-12-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11075131)

## 1 引言

科学级 CCD 相机由于其低输出噪声、高灵敏度、宽广的光谱响应以及高量子效率等技术优点,在图像诊断、单分子成像、水下摄影、荧光成像、激光成像、天文研究、生物特征识别和高清智能监控等技术研究领域中发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。随着 CCD 技术的发展,科学级 CCD 的性能指标不断提高,按照 CCD 芯片的工艺结构设计不同,其可以分为前照式、背照式、EBCCD、带增益型 EM-CCD 以及 eXcelon 技术 CCD 等几种类型<sup>[3-5]</sup>,采用这些芯片技术,可以极大地提高 CCD 的灵敏度、动态范围及信噪比等性能。图像采集系统按传感器类型可分为 CCD 和 CMOS 图像采集系统。CMOS 芯片上大多集成了 AD 转换功能,而 CCD 为模拟信号输出,因此 CCD 图像采集系统又可分为模拟和数字两种。随着电子技术的进步,图像采集系统朝着低功耗、远程采集、半导体制冷、大容量存储、高精度数字化、高速数据处理的方向发展。

CCD 的主要生产厂商有 Sarnoff、Fairchild、Sony、e2v、Kodak、photos focus、photron、DALSA 等。20 世纪 80 年代初, Sony 公司研制了世界第一款双芯片彩色 CCD 相机。经过三十多年的技术积累,由于其产品性能突出,在科学级成像领域占据着较大的市场份额。ICX285 是 SONY 公司生产的一款百万像素科学级 CCD 芯片,采用其最先进的 Exveiw HAD CCD 芯片设计技术<sup>[6]</sup>。该技术经过了 HAD CCD、Super HAD CCD、New

Structure CCD 及 Exveiw HAD CCD 技术的发展历程,是利用特别设计的 PN 结工艺开发的,因此比普通 CCD 具备更高的灵敏度(最低可以响应 0.03 lux 的光强),并且在可见光区域其响应度大约是普通芯片的 2 倍,而在 945 nm 光谱(近红外)的响应度大约是普通芯片 4 倍,同时该芯片采用新的结构设计,能有效降低 Smear 效应。由于采用 Exveiw 技术,ICX285 具有非常高的灵敏度,迄今为止,其性能在行间转移型 CCD 芯片中处于领先地位。它在科学研究上具有广泛的应用,例如美国 COOKE 公司基于其研制的制冷型 sensicam 相机,在荧光成像、PIV 粒子测速及惯性约束聚变图像诊断领域具有重要的应用。市场上研究比较多的是其在工业上的应用,但存在数字化精度低(一般为 12 bits 或者 14 bits)和传输距离近等缺陷<sup>[7]</sup>。国内对于 EMCCD、TDICCD 等科学级相机研究比较多<sup>[8-9]</sup>,但是基于行间转移型的 Exveiw CCD 的数字化相机的研究较少涉足,整机技术基本受控于国外。为适应特殊应用要求,本文基于 ICX285 CCD 芯片自主设计了高性能数字化相机,解决了数字化精度低,传输距离近的问题,下面详细介绍各个关键单元的实现方法。

## 2 总体设计

远程图像采集系统可分为以下组成单元:成像单元、驱动电路与电源单元、视频信号处理单元、系统控制单元、远程传输单元、终端采集单元,系统结构框图如图 1 所示。成像单元是系统中心部件,完成图像的光电转换;驱动电路与电源单元

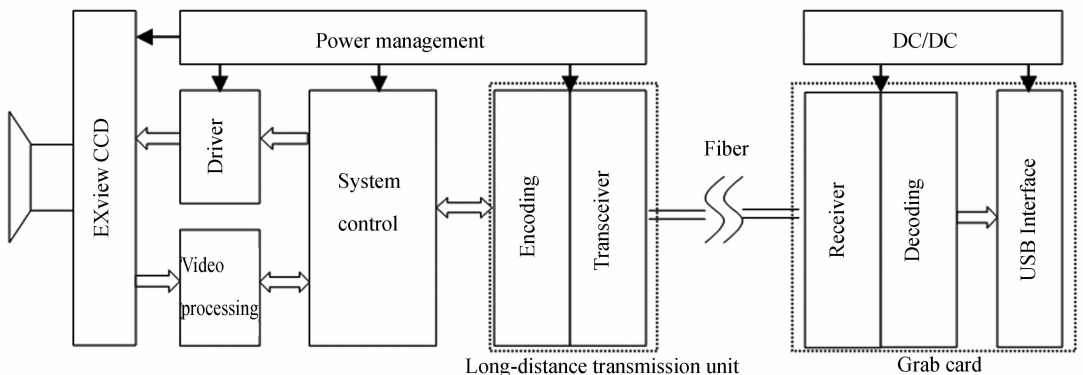


图 1 远程图像采集系统结构框图

Fig. 1 Structure of remote image acquisition system

为 CCD 提供必需的偏置电压,同时进行电平转换以提供符合要求的驱动时序;系统控制单元是系统的核心单元,完成 CCD 时序产生、数据的同步控制、各分单元的控制信号产生等功能;视频信号处理单元完成模拟输出视频的放大、采样以及数字化;远程传输单元对视频信号编码,转换为光纤传输;终端采集单元完成数据的解码、时钟恢复、计算机 USB 采集功能。

### 3 具体方法

#### 3.1 CCD 成像单元简介

ICX285 是 SONY 公司生产的新型高分辨率大面阵图像传感器,运用了 SONY 的 EXview 技术设计,是一款性能突出的科学级图像传感器。它具有  $1.4 \times 10^6$  以上有效像素和 100% 填充效率。它属于行间转移型 CCD,分为成像单元、水平寄存器、垂直寄存器 3 个部分,具有 20 个管脚,其结构示意图如图 2 所示。图中信号  $V_{\phi 1}$ ,  $V_{\phi 2A}$ ,  $V_{\phi 2B}$ ,  $V_{\phi 3}$ ,  $V_{\phi 4}$ ,  $H_{\phi 1}$ ,  $H_{\phi 2}$ ,  $\Phi_{SUB}$ , RG 为时序信号,  $V_L$ ,  $V_{DD}$  为 CCD 直流偏置电源信号,  $V_{OUT}$  为芯片的视频输出管脚。

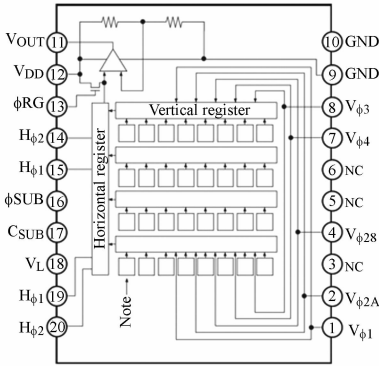


图 2 ICX285 结构示意图

Fig. 2 Block diagram and pin configuration of ICX285

#### 3.2 驱动电路与电源单元

ICX285 包括总共 9 路驱动时序信号输入,以及两路直流偏置电源信号,在正常工作时必须提供。驱动信号的电压可概括为  $-7 \sim 0$  V、 $-7 \sim +15$  V、 $0 \sim +5$  V、 $0 \sim 3$  V 基本点 4 种,最大的压差为 22 V。ST 半导体公司的 MC34063 是一款线性较好的 DC-DC 电源转换,可将输入电压降低或者升高,因此利用 MC34063 的方法只需要一种输入电源可得到  $-7$  V 及  $+15$  V 2 种输出。现

在常用的可编程器件的输出电平多为 1.8、2.5、3.3 和 5 V 几种不同规格,不符合该 CCD 时序驱动信号的电平要求,因而除 3.3 V LVTTL 电平 RG 信号可直接产生外,其余 8 路时序信号选择集成器件 CXD3400<sup>[10]</sup> 进行电平转换,提高驱动能力。由于 CXD3400 为 5 V TTL 器件,所以先利用缓冲芯片 ALVC164245 对输入信号进行缓冲, ICX285 驱动电路的原理框图如图 3 所示。

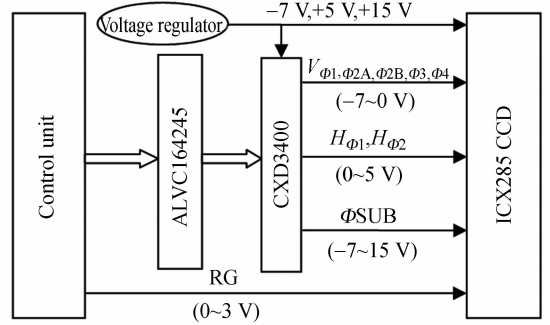


图 3 CCD 驱动电路结构原理框图

Fig. 3 Driver circuit of CCD

#### 3.3 视频信号处理单元

ICX285 图像传感器的输出视频为  $850 \sim 1\,000$  mV 大小的交流信号,其峰值像素输出时钟频率为 28.63 MHz。VSP2566 是一款高性噪比的专用视频处理器,最高采集时钟可达到 36 MHz,支持最大  $1\,000 \sim 1\,300$  mV 的模拟视频输入,因此可很好地满足视频处理要求。现在,CCD 视频信号的处理多采用 CDS(相关双采样)技术。该技术基本原理是分别对一个像素在肩部和底部进行两次采样,然后将两次采样电平相减作为视频信号,采用这种方法可以有效降低低频干扰<sup>[11]</sup>。VSP2566 集成了 CDS 功能,具有 16 位高精度 ADC,其模拟增益 ( $-3$  dB  $\sim$   $+18$  dB) 和数字增益 ( $-6$  dB  $\sim$   $+26$  dB) 分别可编程调节。芯片还具有空像素校零、黑电平校正、电压钳位等功能<sup>[12]</sup>。图 4 为视频处理硬件原理图。其实现的关键技术环节包括:采用 2N3904 组成的射极跟随电路的视频输入方法提高负载能力;采用交流耦合的方式与输入端相连;控制系统提供 VSP 所需的控制时序,例如 ADCLK(数据时钟)、空像素校零(PBLK)、CLPOB(黑电平校正)、CLPDM(电压钳位)、SHP 和 SHD(CDS 功能)等;由于 VSP2566 是一个模数混合器件,因此采用模拟地、数字地分开设计的方法,以提高电路的抗干扰

能力;通过 SDATA、SCLK 等串口通信信号控制其 A-PGA、D-PGA 的调节;采用 61LVTH16244 芯片完成输出端口的数据缓冲,接入数据总线。

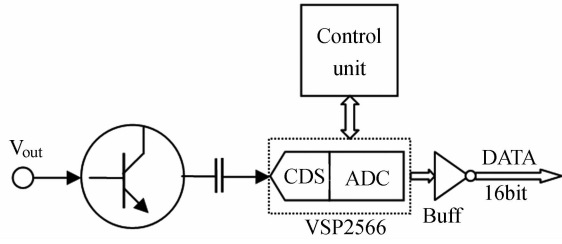


图 4 视频处理硬件原理图

Fig. 4 Schematic diagram of video processing

### 3.4 系统控制单元

控制单元是系统的核心单元,产生各种逻辑信号,包括 CCD 的驱动时序、VSP2566 和 t1k1501

的控制信号、正常和触发模式选择、以及图像的帧同步和行同步头等。CPLD 既继承了 ASIC 的大规模、高集成度、高可靠性的优点,又克服了普通 ASIC 设计周期长、投资大、灵活性差的缺点,而且在速度上有一定的优势,是高速数字硬件电路设计的首选器件。XC95144XL 器件采用先进的 CMOSFast FLASH 工艺,具备高性能、低功耗的优点,被选用于实现系统的控制功能。由于控制系统需要对多个单元控制,单片 XC95144XL 在资源上略显不足,故采用双 CPLD 的方法实现,前端 CPLD 用于产生 CCD 的驱动时序、VSP2566 的控制信号、正常和触发模式选择、以及帧同步和行同步头;后端 CPLD 用于完成 t1k1501 的控制和数据的时分复用。CCD 垂直和水平同步仿真时序分别如图 5、6 所示。

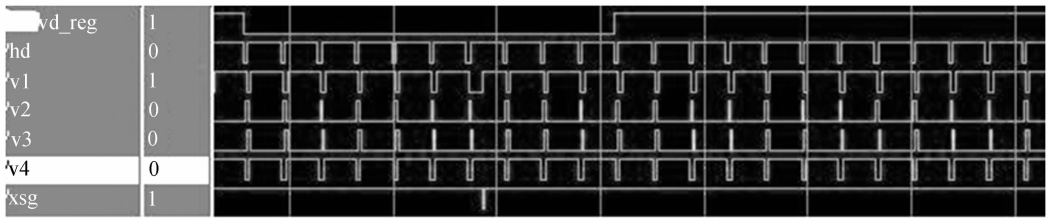


图 5 垂直同步仿真时序图

Fig. 5 Simulation waveform of vertical sync driver time

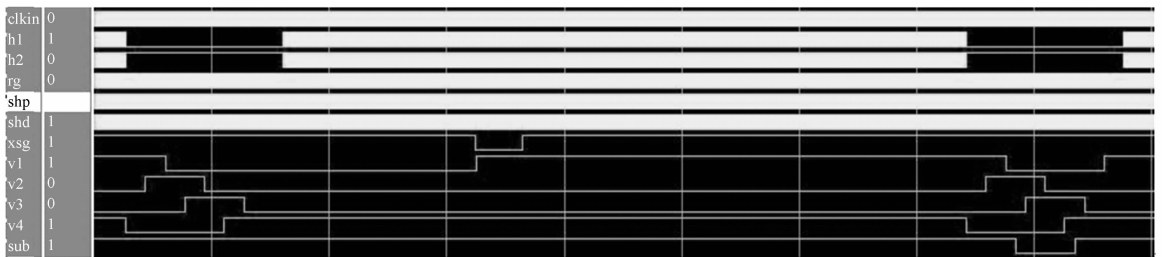


图 6 水平同步仿真时序图

Fig. 6 Simulation waveform of horizontal sync driver time

### 3.5 远程传输单元

光纤传输具有抗干扰能力强的特点,较适合在强电磁干扰环境中应用。高速大容量图像数据的远程传输采用光纤技术是很好的选择,因为它能达到最高 100 Tbps 的传输速度,比常规的电缆或 LVDS 方式都高得多。

选择 TLK1501 芯片设计远程传输单元。它是 TI 公司的 Gbps 级的收发器,用于高速双向点对点数据传输系统,串行接口速度为 0.6~1.5 Gbps,最高数据带宽为 1.2 Gbps<sup>[13]</sup>。它完成数

据的并行转串行,16 位并行数据在芯片内部采用 8 Byte/10 Byte 编码格式生成 20 位数据字,通过并/串移位寄存器转换为串行数据流,经高速串行输出端口以差分对形式输出。视频数字化后的图像数据为 16 bit 数字图像,再加上行、帧、像素的同步时钟,至少需要 19 bit 的传输位宽。对这些并行信号直接进行远程同步传输至少需要 19 路传输链路,显然不大符合现实。在综合考虑了这些因素后,设计中采用 CPLD 先对 19 路数据进行分时复用,得到 16 路数据。然后控制编码芯片

TLK1501 把 16 路并行数据直接复用编码,通过光收发模块 RTX171 转换为光信号进行光纤远程传输。

### 3.6 终端采集单元

在接收端,由光收发模块 RTX171 接收光信号并转换为电信号。可设置  $RX\_DV/LOS$ ,  $RX\_ER = 10$ , TLK1501 处于接收状态,完成数据的 8Byte/10Byte 解码。控制器将解码后数据进行解复用,发送给 USB 接口。USB 使用商业模块 USB20D 实现,工作于 DMA 模式,当接收到 DMAING 信号 60 ms 后开始向 USB 模块写数据,由 DMAWR 控制写入的具体时间,写入时钟为 PIXCLK,每行写入的时间长度为一行像素的总数  $n \times TPIXCLK$ (假定分辨率为  $m \times n$ ),写入  $m$  行后即完成了一个完整帧数据的写入,停止当前帧的操作,等待下一个帧同步头的到来,直到 DMAing 变低,否则一直不断地写入完整的帧数据<sup>[14]</sup>。

## 4 性能测试

基于以上方法,设计的科学级远程图像采集系统样机如图 7 所示,图 8 为其获取的空间分辨率测试图像。



图 7 系统样机实物图

Fig. 7 Prototype of the system

动态范围和灵敏度是 CCD 图像采集系统的 2 个主要的评价参数。这 2 个参数的测定,可以为系统在科学实验中的应用提供更好的参考。具体测试时,在不同光强下,测量 CCD 的读数,每次读取 2 幅图像,统计同一区域内的所有像素的灰度均值,记录所对应的光照强度,然后绘制其响应曲线。动态范围通常取响应曲线上下限与线性区延长线交点所对应的光照强度的比值。系统测试

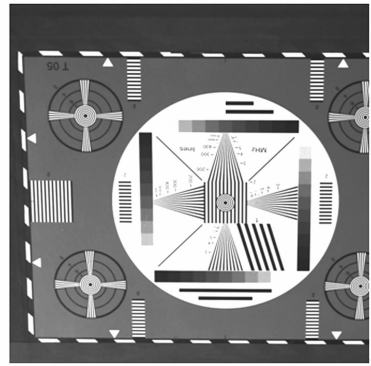


图 8 测试图像

Fig. 8 Text image

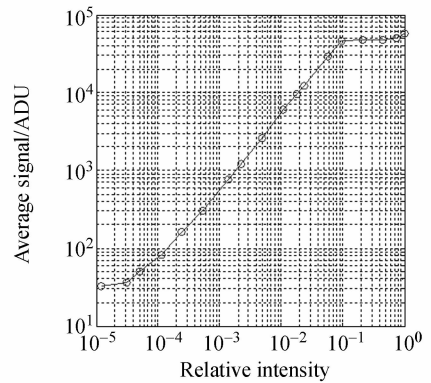


图 9 动态响应曲线图

Fig. 9 Curve of dynamic response

的动态响应曲线如图 9,对图进行分析可知,线性区的上限约为  $10^{-1}$  (10%),其下限在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ,因此系统的动态范围  $D_{dynamic}$  约为 1 000~1 500 倍。CCD 的系统增益测量曲线如图 10,红色部分为除去饱和点后的直线拟合结果,分析可知系统灵敏度通过增益系数可表征为:

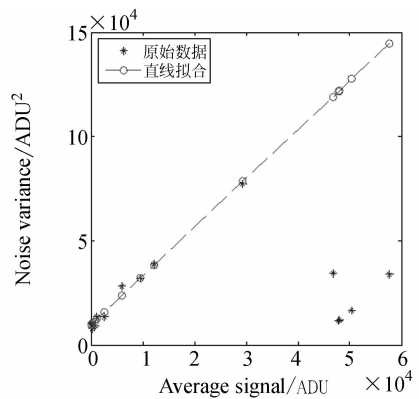
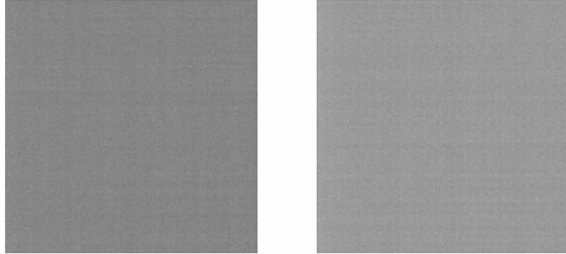


图 10 系统增益测量曲线

Fig. 10 Test curves of system gain

$$S=1/g=1/0.4268=2.34 \text{ ADU}/e^- \quad (1)$$

暗电流是 CCD 在无光注入情况下的输出信号,是由半导体的热激发而产生的。由于 VSP 提供了偏置电压,导致无光照情况下的输出信号为暗信号和偏置电压两者之和。获取偏置电压时,



(a) 偏置输出

$$T_{\text{expose}} < 5 \mu\text{s}$$

(b) 本底

$$T_{\text{expose}} = 200 \text{ ms}$$

图 11 暗电流测试(室温 32 °C)

Fig. 11 Dark current test(at 32 °C)

可调节电子快门使曝光时间最小,近似为 0,这时的输出信号即为偏置电压,测试结果如图 11(a)所示,其像素平均灰度值  $V_{\text{bias}}$  为 2025。图 11(b)为曝光时间为 200 ms 的本底测试结果,平均灰度值为 2 028。因此根据式(1)可估计暗电流为:

$$I_{\text{dark current}} = g \times (2\,028 - 2\,025) / T_{\text{expose}} \approx 6 \text{ e}^- / \text{pixel} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (2)$$

逐渐增加光强,使输出图像饱和,测得其饱和灰度值  $V_{\text{saturation}}$  为 56 200。假设 CCD 具有理想的光电响应线性度,则 CCD 势阱  $Q_{\text{depth}}$  可估算为:

$$Q_{\text{depth}} = g \times (V_{\text{saturation}} - V_{\text{bias}}) \approx 23\,000 \text{ e}^-, \quad (3)$$

而读出噪声  $N_{\text{readout}}$  可估算为:

$$N_{\text{readout}} = Q_{\text{depth}} / D_{\text{dynamic}} - I_{\text{dark current}} \times T_{\text{expose}} = 14 \text{ e}^-. \quad (4)$$

表 1 为相机性能测试结果与同类相机的对比。从对比看出,文中系统的读出噪声和暗电流偏大,主要原因是没有设计制冷系统,工作温度

## 参考文献:

- [1] GUNTUPALLI R, GRANT J. CCD cameras tune in to scientific imaging [J]. *Photonics Spectra*, 2004, 38(4): 63-64.
- [2] PAUL J, KEVIN B, RAY B, et al.. Commercialization of full depletion scientific CCDs [C]. *Proc. SPIE 6276, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy II*, 2006, 6276(04): 10, 1117/12, 670174.

高。但是本系统数字化精度更高,而且采用光纤传输的方式,解决了大容量高精度数据远程传输的难题。

表 1 与同类相机的对比

Tab. 1 Comparison with similar systems

Specifications	Sensicam qe	CoolSNAP es <sup>2</sup>	Remote system
Readout noise	4	<8 [20 MHz]	14
Full well	18 K	13.5 K	23 K
Dynamic	3 000 : 1		1 500 : 1
Dark current (e <sup>-</sup> · pixel · s <sup>-1</sup> )	0.1 [-15 °C]	0.1 [cooled]	6 [>32 °C]
Digitalization	12	12	16
Transfer	Two coaxial cable	IEEE-1394a	Fiber

## 5 结 论

利用上述方法研制的样机主要技术指标如下:分辨率:1 360×1 024;动态范围:60~65 dB;数据位数:16 位;传输距离:>30 km;灵敏度:2.34 ADU/e<sup>-</sup>;暗电流:约 6 e<sup>-</sup>/pixel · s<sup>-1</sup> [>32 °C]。研制的系统具有高分辨率、高灵敏度、高动态范围和传输距离远的优点,非常适合一些实验条件苛刻、对图像采集系统性能要求高的科学研究领域。如果运用半导体制冷技术,降低 CCD 的工作温度,可以极大降低 CCD 的输出噪声,系统灵敏度及动态范围指标还可以进一步提高。另外,系统利用了 USB20D 模块进行计算机采集,虽然其理论速度能达到 480 Mbps,但实际速度一般不超过 30 MB/s,如果 CCD 工作在其最快频率,则难以满足要求,但通过开发基于 cameralink 或者 USB3.0 的图像采集技术可解决这些问题。

- [3] HAMAMATSU PHOTONICS K. Wide range of applications from “ Real time imaging of low light fluorescence” to “ Ultra-low light detection” [EB/OL]. [2012-02] [http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/hpspdf/e\\_c910013.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/hpspdf/e_c910013.pdf)
- [4] 戴丽英,刘德林.内耦合型 EBCCD 的技术研究[J]. *光电子技术*, 2010, 30(2): 127-130.
- DAI L, LIU D. Research of the inner-coupled EBCCD with vacuum structure [J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, 30(2): 127-130. (in Chinese)

- [5] Photometrics. New-generation CCD/EMCCD technology; A review of eXcelon technology [EB/OL]. [2010 revA0] <http://www.photometrics.com/>
- [6] SONY Corporation. ICX285AL Datasheet [EB/OL]. [2003-12-01] <http://www.sony.net/Products/SC-HP/datasheet/90203/data/a6805283.pdf>
- [7] Photometrics. CoolSNAP ES2 Monochrome Datasheet [EB/OL]. [PM-DS-008 RevB2][2011] <http://www.photometrics.com/products/datasheets/es2.pdf>
- [8] 杨少华, 郭明安, 李斌康, 等. 百万像素电子倍增 CCD 数字化相机的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2970-2976.  
YANG S H, GUO M A, LI B K, *et al.*. Design of mega pixels digital EMCCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2970-2976. (in Chinese)
- [9] 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.  
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [10] Sony Corporation. CXD3400 Datasheet [EB/OL]. [2012-02-01] <http://www.sony.net/Products/SC-HP/datasheet/90205/data/a6812909.pdf>
- [11] 杨少华, 郭明安, 李斌康, 等. 高速高灵敏光纤传输 EMCCD 相机设计[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 135-140.  
YANG S H, GUO M A, LI B K, *et al.*. Design of the high speed high sensitivity fiber transmission EMCCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 135-140. (in Chinese)
- [12] TI instruments. CCD ANALOG FRONT-END FOR DIGITAL CAMERAS [EB/OL]. [2008-08-13] <http://www.ti.com.cn/product/cn/vsp2566>
- [13] TI instruments. TLK1501 Datasheet [EB/OL]. [2003-09-05] <http://www.ti.com.cn/product/cn/tlk1501>
- [14] 夏惊涛, 杨少华, 郭明安, 等. HSIC-C60I 型高速相机 USB 采集方式的实现[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 303-305.  
XIA J T, YANG S H, GUO M A, *et al.*. Realization of USB2.0 Interface for HSIC-C60I High Speed Camera [J]. *Communications Technology*, 2009, 42(1): 303-305. (in Chinese)

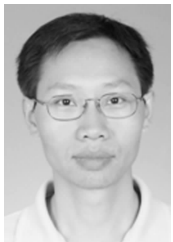
#### 作者简介:



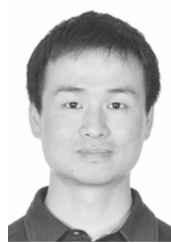
罗通顶(1984—),男,湖南邵阳人,硕士,中级工程师,2006年于南开大学获得学士学位,2009年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高速成像技术、高速图像处理方面的研究。E-mail: snluohui@126.com



李斌康(1966—),男,陕西岐山人,博士,研究员,硕士生导师,1989年于西安交通大学获得学士学位,主要从事脉冲射线测量、图像诊断、高速成像系统研制等方面研究。E-mail: Binkang.li@gmail.com



郭明安(1969—),男,湖南石门人,硕士,高级工程师,1989年于电子科技大学获得学士学位,主要从事核电子学与高速成像等方面的研究。E-mail: guomingan@163.com



杨少华(1981—),男,安徽阜阳人,博士,高级工程师,2005年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事高速成像系统研制、特种成像系统研制、高速数据采集方面的研究。E-mail: ysh\_polaris@sohu.com



周鸣(1988—),男,湖北汉川人,中级工程师,2009年于上海交通大学获得学士学位,主要从事图像诊断方面的研究。E-mail: zhouming11e@yahoo.com.cn