

文章编号:1001-5078(2012)03-0314-05

· 光电技术与系统 ·

基于背照式 CCD 的微弱目标成像系统设计

张 鑫^{1,2}, 王晓东¹, 曲洪丰¹, 薛盼盼^{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 100039)

摘要:为了对微弱目标进行探测, 提出一种采用背照式 CCD47-10 为传感器的成像系统设计方案。通过对 CCD47-10 的工作原理和性能参数进行分析, 完成电源模块、驱动模块、信号处理模块、数据传输模块的硬件设计。使用 VHDL 语言完成 FPGA 中的逻辑电路设计, 使用 VC++ 完成上位机软件设计。最后通过搭建实验系统, 在微弱光下对光栅进行成像, 并分析图像信噪比。实验结果表明, 设计的系统在对微弱目标成像时信噪比为 72, 能够满足对微弱目标探测的应用要求。

关键词:微弱目标探测; 背照式 CCD; 成像电路设计; 信噪比

中图分类号: TN386.5; TN911.73 文献标识码: A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.016

Imaging circuit design for weak targets detection based on BCCD

ZHANG Xin^{1,2}, WANG Xiao-dong¹, QU Hong-feng¹, XUE Pan-pan^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to detect weak targets, a design scheme of imaging system based on back-illuminated CCD (BCCD) 47-10 is presented. By analyzing the principle and parameters of CCD47-10, the hardware circuit is designed. It is composed of power module, driver module, signal processing module and data transfer module. VHDL language is used to design the logic circuit. The PC software is programmed by VC++. Finally, the experimental system is set up to image grating in dim light and the signal to noise ratio (SNR) is 72. The result shows that the system can meet the requirement of weak targets detection.

Key words: weak targets detection; back-illuminated CCD; imaging circuit design; signal to noise ratio

1 引言

CCD 是 Charge Coupled Device(电荷耦合器件)的简称。具有光电转换、电荷存储、转移和读出等功能, 被广泛应用于办公娱乐、工业检测、医疗仪器、天文观测、航天遥感等成像领域。根据结构和工艺的不同, CCD 分为前照式和背照式(BCCD)。前照式 CCD 中光线从电极一面入射, CCD 的量子效率比较低, 短波响应差, 在很多方面满足不了探测和成像要求。而背照式 CCD 中, 光线从无电极的背面入射, 量子效率高, 对微弱光、短波有比较好的响应灵敏

度^[1-2]。但是以往由于半导体材料和工艺限制, 背照式 CCD 很难获得均匀的灵敏度, 而没有得到广泛应用。随着半导体技术的发展, 背照式 CCD 的性能有了很大的改善。与在微弱目标探测中使用的像增强器 CCD(ICCD)相比, 灵敏度和 MTF 特性都高于 ICCD^[3-4]; 与在短波探测中使用的基于微通道板(MCP)的多阳极探测器相比, 系统的复杂度和可靠

作者简介: 张 鑫(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事 CCD 成像技术研究。E-mail: xinye_1987@163.com

收稿日期: 2011-07-14

性都优于后者^[2]。因此背照式 CCD 对微光和短波的探测成像有着重要的应用价值。

选用 E2V 公司的背照式 CCD47 - 10 作为传感器,设计了用于微弱目标探测的成像系统。完成了硬件电路设计、FPGA 中的逻辑电路设计以及上位机软件设计。通过实验验证,成像系统的信噪比达到 72,能够满足对微弱目标探测成像的要求。

2 背照式 CCD 的原理

CCD 传感器的一个重要参数是量子效率 (QE),即转换电子数与输入光子数之比。影响 QE 的因素有入射光线的吸收、反射和穿越等。前照式 CCD 中光线从电极一面入射,理论上电极材料应该是完全透明的,实际上这些材料对光都有一些吸收和反射。如多晶硅电极对短波有较强的吸收和反射,减少了最终到达硅片的光子数量,而且它的电极结构不容许采用提高性能的增透膜技术。又因为材料的吸收系数、反射率和波长有关,在可见光波段,波长越短吸收系数和反射率越大。前照式 CCD 的结构和工艺特点使这种 CCD 的量子效率比较低,对微弱光、短波的响应非常差,应用有一定的局限性。背照式 CCD 则弥补了前照式 CCD 的不足,它的结构如图 1 所示。

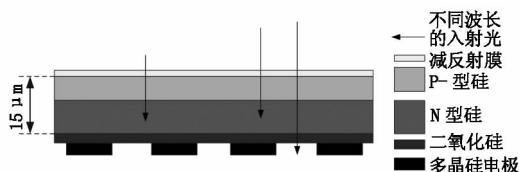


图 1 背照式 CCD 结构图

Fig. 1 charts of the back - illuminated CCD

背照式 CCD 的硅片减薄到 15 μm 左右,光线由背面射入,避免了电极对光线的阻挡,能得到很高的量子效率。而且可以在硅表面制作减反射膜,短波响应得到很大提高,部分高性能的背照式 CCD 可以用于软 X 射线和极紫外波段的成像^[5]。

CCD47 - 10 的光谱响应范围为 200 ~ 1000 nm,最高光谱响应灵敏度可以达到 93%^[6],而普通的前照式 CCD,如 Philips 公司的面阵 CCD,FTT1010 - M 的光谱响应灵敏度最高为 30%。由此可见,CCD47 - 10 能够应用在微弱目标的探测成像系统中。

3 成像系统工作原理

成像系统包括:CCD 传感器、时序发生器、驱动器、预放电路、视频处理器、控制电路以及数据传输电路。原理框图如图 2 所示。

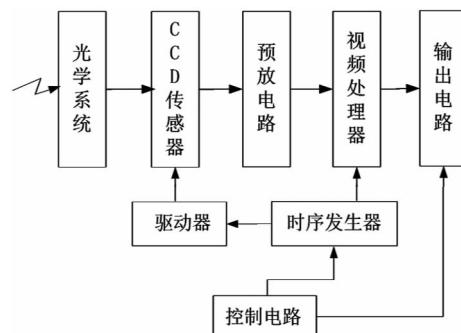


图 2 成像电路原理框图

Fig. 2 principle of imaging system

光学镜头将景物投影到 CCD 上;CCD 传感器将投影图像转换为电荷图像,并输出电压信号;时序发生器产生 CCD 工作所需的时序脉冲;驱动器匹配时序脉冲幅值,驱动 CCD 正常工作;预放电路将微弱的图像信号进行放大;视频处理器对运放输出的模拟图像信号进行采样和数字量化,得到数字图像;通过输出接口传输给上位机进行显示、存储和。

4 成像系统设计

设计使用的背照式 CCD47 - 10 为全帧式面阵 CCD,它的重要参数包括:像元大小 13 $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$;有效像元数 1056 × 1027;每一行有 16 个暗像元;动态范围 1 ~ 50000;读出速率最高为 5 MHz;采用单通道或双通道输出。针对 CCD47 - 10 的特点,将系统分为电源模块、驱动模块、信号处理模块、数据传输模块、上位机软件进行设计。

4.1 电源电路

设计中采用 28 V 母线电源供电,整个电路需电 16 种电压,而且电压压差大(最高 29 V,最低 -5 V)。由于线性稳压器(LDO)在输入输出端压差较大时,转换效率低,有很高的发热功率,不能稳定可靠地输出电压。所以设计中,首先使用开关电源芯片(DCDC)进行一级电压转换:使用 LT3480 进行降压变换,使用 LT3580 进行升压和负电压变换。由于 DCDC 输出电压的纹波较大,不能直接给模拟电路供电,所以使用 LDO 芯片进行二次电压变换,获得稳定、低噪声的电压,给系统所有模块进行供电。

4.2 CCD 驱动电路

驱动信号的作用是控制积分时间、电荷收集和电荷转移。CCD47 - 10 需要的驱动脉冲包括:三相行转移脉冲,三相像素转移脉冲,复位脉冲。CCD47 - 10 可采用单通道或者双通道输出,所以行间转移和像素转移时序是左右部分分开设计的。CCD47 - 10 共需要 12 个驱动时序,包括六个行转移脉冲:高电平 15 V,低电平 0 V;五个像素转移脉

冲:高电平 10 V,低电平 1 V;一个复位脉冲:高电平 12 V,低电平 0 V^[4]。根据 CCD47-10 的驱动特点,将驱动电路分为时序发生器、驱动器、电压偏置电路,电路结构如图 3 所示。

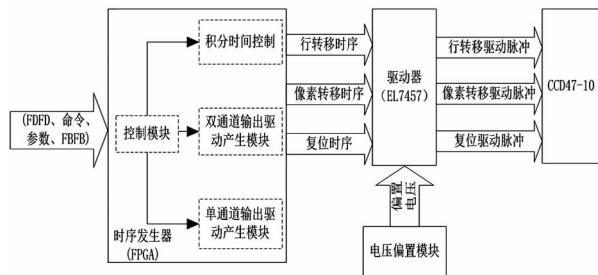


图 3 驱动电路结构框图

Fig. 3 structure of drive circuit

使用 Xilinx 公司的 FPGA - XC3S400 完成时序发生器的设计,并通过 VHDL 硬件描述语言实现逻辑电路功能。时序发生器中,控制模块接受命令数据,发出控制信号、配置积分时间、进行单/双通道输出模式的切换。通过积分模块,使积分时间可以在 0 ~ 10 s 范围进行精度为 1 ms 的调节,实现曝光时

间的灵活控制。通过单通道或双通道驱动输出模块,完成驱动时序设计,使 CCD47-10 可以在两种模式下输出稳定的信号^[7]。

驱动器采用 EL7457 实现,通过电压偏置电路提供参考电平,对 FPGA 产生的时序进行高低电平的幅值调整,输出符合 CCD47-10 要求的脉冲。EL7457 有较强的电容负载能力,且每个通道输出电流最高为 2 A,可以满足驱动 CCD 时的功率要求。因为 EL7457 是 4 通道输入和输出的,所以相同电压幅度的脉冲可以使用一片 EL7457,设计中总共使用了 5 片 EL7457。

4.3 CCD 信号处理电路

信号处理电路由预处理电路、视频处理器和采样控制电路构成。CCD 输出的微弱模拟信号(有效信号峰峰值电压最高为 450 mV),首先经过预放电路进行放大,然后由视频处理器对信号采样和数字化,得到数字图像,信号处理电路结构如图 4 所示。

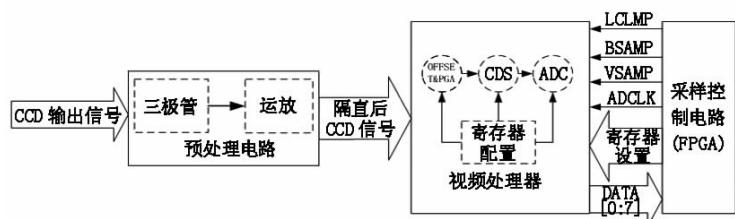


图 4 信号处理电路结构图

Fig. 4 signal processing circuit

设计中预放电路采用三极管 MAT02 和运放 OPA2209 进行设计。由于 CCD47-10 的输出电阻为 300 Ω,如果将 CCD 输出信号直接隔直、放大,前置放大器的电流噪声必须很小,否则 300 Ω 电阻和电流噪声相乘再放大,会在前置放大的输出端产生较大的等效电压噪声,降低有效信号的信噪比。为减小运放电路的输入噪声,CCD 输出的信号先经过射随器,使输出电阻小于 1 Ω,然后输入运放电路。CCD47-10 输出的信号,直流电平为 25 V 左右,需要通过电容隔直,再由运放电路进行处理,隔直电容使用 1 nF 的无极性电容。隔直后的有效信号,通过运放电路后,进行两倍的放大,输入给视频处理器。

设计使用的视频处理器为 XRD9836,采样控制电路使用 VHDL 语言在 FPGA 中实现。XRD9836 内部集成了相关双采样电路(CDS),可编程增益放大电路(PGA),偏置电路(OFFSET),模数转化电路(ADC),通过串行数据接口设置内部控制寄存器的

值,配置工作模式。XRD9836 进行数字量化时的参考电平为 1.7 V,而输入的 CCD 信号经过放大后最大为 900 mV,所以对 PGA 寄存器进行设置,将输入信号放大两倍后再进行处理。通过 FPGA 控制 CDS 模块的 BSAMP 和 VSAMP 信号,在下降沿时分别对参考电平和信号电平进行采样,CDS 模块将两次采样值相减,得到有效的像元信号值。采样控制电路使 LCLMP 信号在每行的前 7 个暗像元输出时间内有效,用于视频处理器内部电路的直流电平恢复。XRD9836 使用的是 16 位的数字量化,采样后的数据在同步时钟 ADCLK 的上升沿和下降沿分别输出 8 位的数据,由 FPGA 接受并合成为 16 位有效数据^[2]。

4.4 数据传输电路

数据传输电路接受由上位机发出的控制指令,产生相应的控制信号,并且将图像数据传输到上位机进行存储、显示。数据传输电路结构如图 5 所示。

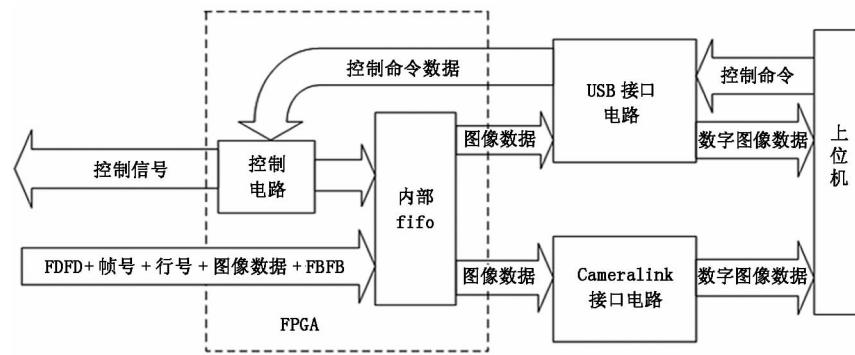


图 5 数据传输电路结构

Fig. 5 structure of data transmission circuit

因为图像数据是采用实时传输的,最多只需要缓存一行的数据,数据量约为 16 K 比特,而 FPGA 内部提供 288 K 比特存储空间。所以数据传输时不需要外部存储器,通过 FPGA 内部的 FIFO 进行数据缓存。使用 USB 接口实现数据接受,Camera link 接口实现数据实时输出。由于使用 Camera link 接口传输时需要图像采集卡,使用不方便。所以在数据速率不高的情况下使用 USB 接口进行数据传输,在 USB 接口不能满足的较高传输速率下使用 Camera link 接口。数据传输电路通过 FPGA 控制接口芯片实现所需功能。

USB 接口芯片为 Cypress 公司 EZ - USB FX2 系列的 CY7C68013A。设计中通过固件对芯片的工作模式进行配置,采用批量传输和 Slave FIFO 模式,配置端点 2 进行数据接受,端点 6 实现进行发送^[8]。通过 FPGA 输出 10 MHz 信号作为和 CY7C68013A 传输的同步时钟。上位机发送的指令在 FPGA 中进行解码,实现控制和配置。使用 USB 接口进行输出时,FPGA 通过 CY7C68013A 内部存储空间的标志信号,判断是否向它发送数据。当标志信号为高电平时,向 CY7C68013A 传输 16 位的图像数据,实现实时传输。

采用 DS90CR287 作为 Camera link 的接口芯片^[9]。使用 Camera link 进行数据传输时,配置成 Base 模式,进行 16 位的数据输出。时钟为 20 MHz,使用 DVAL, FVAL, LVAL 信号进行图像的数据同步、帧同步和行同步。上位机通过图像采集卡进行数据接受,并实时显示和存储^[10]。

4.5 软件设计

软件使用 VC + + 语言编写。在通过 Camera link 接口传输时,由图像采集卡的专用软件完成数据接收显示。所以上位机软件实现的功能包括:使

用 USB 接口时的数据发送和数据接受;图像显示;数据分析。上位机发送命令由四个 16 位数据组成,包括同步头(FDFD)、命令、参数、同步尾(FBFB)。接受数据时,软件先在上位机内存中开辟缓存,然后将数据存入硬盘。显示图像时,通过识别图像数据中的同步头 FDFD、帧号、行号、同步尾 FBFB,将一帧图像数据完整的提取显示出来。

5 实验结果与分析

5.1 实验结果

实验目的是测试背照式 CCD47 - 10 成像系统在微弱光下对光栅的成像效果。在暗室中如果人眼因为目标光强微弱而不能正确识别目标,则认为目标为微弱目标。实验系统主要由以下几部分组成:可调光源、光栅、调焦镜头,成像电路。光源发出的光透过光栅后形成条纹,然后由镜头聚焦在 CCD 的感光面上,通过成像系统进行驱动、采样量化,将图像数据传输到上位机。

实验时,调节光源的功率来改变输出的光强,使得光线通过光栅后非常微弱。设定积分时间为 100 ms,CCD 采用单通道输出,读出速率为 1 MHz。图 6 为通过示波器观察的 CCD 输出信号;图 7 为对光栅所成的数字图像。

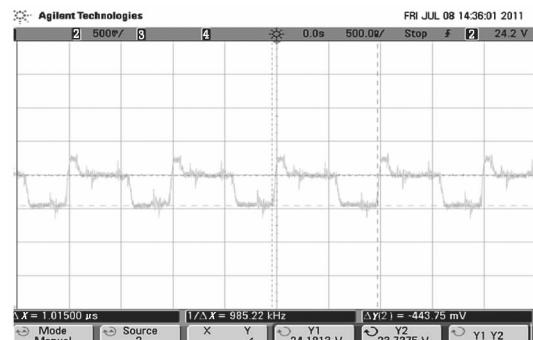


图 6 CCD 输出信号

Fig. 6 output signal of CCD



图 7 光栅成像图
Fig. 7 image of grating

5.2 数据分析

信噪比是衡量图像质量的一个重要参数,有多种计算方法。其中比较常用的是方差法,计算公式为:

$$\overline{DN} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DN_i \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (DN_i - \overline{DN})^2} \quad (2)$$

式中, N 表示选取相同条件下所成的 N 幅图像; DN_i 表示每一幅图像相同位置的像素灰度值; \overline{DN} 表示灰度平均值; δ 表示所有灰度值的标准差。 DN 与 δ 的比值就是信噪比^[10]。通过图 6 可以看出,CCD 输出的信号有噪声的干扰。为了减少噪声信号的影响,使输出图像获得最大的信噪比。实验时,调整采样时序,在 CCD 不同的信号位置进行采样,比较图像的信噪比,以确定最佳的采样位置。选取 $N=50$,然后对每一幅图像第 500 行、600 列的像素灰度值进行计算。在靠近 CCD 信号电平边缘处进行采样时,噪声比较大,对图像数据进行计算, DN 为 37276, δ 为 621, 信噪比为 60; 在噪声比较小的参考电平区域和信号电平区域进行采样时,对图像数据进行计算, DN 为 43298, δ 为 618, 信噪比为 72, 有了明显的提高。图 7 就是信噪比为 72 时,系统对光栅所成的图像。可以看出图像清晰、均匀,没有明显的噪点,分辨率高。

6 结 论

基于背照式 CCD47-10 设计的成像系统,结构简单,性能稳定。在对微弱目标探测时,可以方便地进行控制、配置参数、切换工作模式以及图像数据的接受显示。成像系统所成图像清晰,均匀,分辨率高,信噪比能到达 72,可以满足对微弱目标的探测成像要求。也为进一步研究背照式 CCD 在短波探测成像方面的应用,提供了参考。

参 考 文 献:

- [1] Peng Jilong, Li Baoquan, Wei Fei. Low noise signal process system for solar X2ray imaging camera [J]. Nu-

clear Electronics & Detection Technology, 2009, 29 (4) : 834 - 843. (in Chinese)

彭吉龙,李保权,韦飞. 太阳 X 射线成像望远镜低噪声信号采集系统[J]. 核电子学与探测技,2009,29(4) : 834 - 843.

- [2] Wang Qingyou. CCD Application and technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. (in Chinese)
王庆有. CCD 应用技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.

- [3] Liu Guangrong, Gao Chihyun, Zhou Liwei. Performance analysis of low light level image sensors: BCCD, ICCD, EBCCD [J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2002, 22(1) : 109 - 112. (in Chinese)
刘广荣,高稚允,周立伟. 用于微光成像的 BCCD, ICCD, EBCCD 性能分析 [J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(1) : 109 - 112.

- [4] Liu Guangrong, Zhou Liwei, Wang Zhongchun, et al. Imaging technology of back lighting CCD in low light [J]. Infrared Technology, 2000, 22(1) : 8 - 12. (in Chinese)
刘广荣,周立伟,王仲春,等. 背照明 CCD 微光成像技术 [J]. 红外技术, 2000, 22(1) : 8 - 12.

- [5] Marconi applied technologies, Back thinned compact pack CCD sensor datasheet [EB/OL]. June, 2000.

- [6] CCD47-10 AIMO Back Illuminated Compact Pack High Performance CCD Sensor [EB/OL]. E2V Inc, 2006. www.e2v.com.

- [7] Wang Lei, Tong Ziquan. Design of driving circuit of area array CCD sensor based on CPLD [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007, 10:66 - 68. (in Chinese)
王磊,童子权. 基于 CPLD 的面阵 CCD 驱动电路的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2007, 10:66 - 68.

- [8] Dai Jin, Xu Zixiang. Design and implementation of the infrared image collection system based on USB2.0 [J]. Technique of Infrared, 2005, 30 (1) : 22 - 25. (in Chinese)

戴进,徐志祥. 基于 USB2.0 的红外图像采集系统的设计与实现 [J]. 红外技术, 2005, 30(1) : 22 - 25.

- [9] Xu Zhiyue, Zhang Tiantian. Design of serial image acquisition system based on camera link [J]. Application of Computer, 2010, 30(6) : 1071 - 1074. (in Chinese)
徐志跃,张甜. 基于 Camera Link 的串行图像采集系统设计 [J]. 计算机应用, 2010, 30(6) : 1071 - 1074.

- [10] Huang Xing, Yin Dayi, Qian Weifeng. Research of the low noise system of CCD information acquisition and process technique [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6) : 639 - 643. (in Chinese)

黄星,尹达一,钱伟峰. 低噪声 CCD 信号采集与处理系统技术研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (6) : 639 - 643.