

# 大面阵 CMOS APS 相机系统的设计

刘新明<sup>1,2</sup>, 刘文<sup>1</sup>, 刘朝晖<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**基于大面阵 CMOS APS 图像传感器 LUPA-4000 设计出一个相机系统. 通过对 LUPA-4000 驱动时序的分析, 选用 FPGA 作为驱动信号产生载体, 使用 VHDL 硬件语言设计了包括 CMOS 传感器驱动、通信、数据转换等一体化的程序, 并分别对各个程序模块进行说明. 设计了系统硬件电路, 并加载程序对 CMOS 传感器驱动信号进行测试, 给出了控制像素积分信号的测试波形. 经测试相机电路系统与计算机通信正常, 与下位机数据传输准确无误, 系统整体运行稳定可靠. 安装光学系统后获取了高质量图像.

**关键词:**CMOS 相机; 系统设计; 驱动程序; LUPA-4000

**中图分类号:**TP212

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2009)12-3235-5

## 0 引言

CCD 器件凭借其高量子效率, 低读出噪声等优点, 一直占据着图像传感高端应用领域. 然而它也存在一些缺点, 如驱动脉冲复杂, 需要多种供电电压, 而且很难将外围时序, 信号处理等电路集成在一起等, 使得其系统设计复杂<sup>[1]</sup>. 相比之下, CMOS 器件具有低功耗, 低成本, 高抗辐照能力, 高集成度等优点, 有利于实现小体积, 轻质量, 低能耗的相机系统. 在对载荷要求苛刻的空间应用领域, CMOS 图像传感器更具潜力. 国外的相关研究机构如美国喷气推进实验室 (JPL), 欧洲航天局 (ESA) 等已经对 CMOS 图像传感器应用于星敏感器, 遥感成像等领域进行了探索, 并开展了相关的实验工作. 国内如清华大学, 国家天文台等几家单位也进行了 CMOS 传感器空间技术应用的研究.

本文以 LUPA-4000 大面阵 CMOS 图像传感器为基础, 在分析 CMOS 传感器原理特点以及 LUPA-4000 驱动时序的基础上, 设计了相机电路硬件, 并编写出驱动程序, 实现了积分时间可调及图像数据串行输出等功能.

## 1 CMOS APS 特点

早期的 CMOS 传感器采用无源像素 (Passive Pixel Sensor, PPS) 结构, 具有结构简单、寻址简单, 填充系数高, 量子效率高等优点, 但由于其灵敏度低, 读出噪声大且速度慢, 很难向高速, 大面阵的方

向发展. 有源像素 (Active Pixel Sensor, APS) 结构的出现, 克服了这些缺点. 不同于无源像素结构中感应电荷直接被选通读出的方式, 有源像素结构在每个像元内都集成了一个具有放大和缓冲作用的有源器件. 光电转换后的信号在像元内被直接放大读出, 减少了电荷转移过程中所带来电荷损失, 能够有效提高图像信号的信噪比和动态范围. 采用有源像素结构的缺点在于由于在每个像素结构中需要集成多个晶体管, 使得像素尺寸过大, 而且器件制造过程中采用的镀金工艺或者硅工艺也减小了像素的有效感光面积, 造成像素填充系数的减小. 采用集成大面积光电二极管的有源像素结构或者在像素感光面采用微透镜技术等途径能够提升填充系数, 但也存在二极管寄生电容过大和大孔径下感光效率低等问题<sup>[2]</sup>. 美国 CYPRESS 公司采用的 N 阱像素高填充效率技术, 采用标准 CMOS 制造工艺, 通过将大部分芯片硅面转化为感光区域, 能够吸收以各种入射角入射的光子, 有效的提高了填充效率, 并且具有很低的暗电流. N 阱像素原理如图 1, 在有源像素电路结构和衬底之间形成了一个导通沟道, 所有外延层内产生的光电子经过这个通道, 再通过一个电势沟,

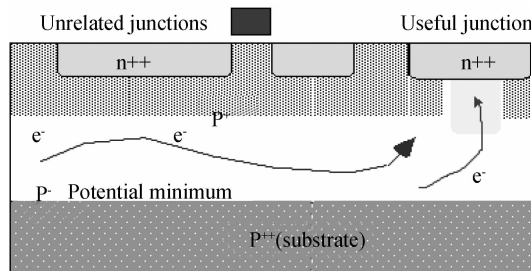


图 1 N 阱像素原理  
Fig. 1 Principium of N-Well Pixel

到达光电二极管 PN 结. 每个像素结构中的光电二极管就能吸收整个像素面积内的感应光电子, 从而有效得提高填充系数<sup>[3]</sup>.

LUPA-4000 是美国 Cypress 公司基于 N 阱像素专利技术推出的一款单色大面阵图像传感器. 像元数为 2048 像素 $\times$ 2048 像素, 像素大小为 12  $\mu\text{m}^2$ . 峰值 QE $\times$ FF 可达到 37.5%. 光学动态范围在单斜率操作时为 66dB(2000:1), 当采用多斜率操作时, 可达到 90 dB. 芯片内部集成两路 10 bit, 采样频率 33 M/s 的 ADC 模块, 每路可将一路模拟信号直接转化为 10 位数字信号输出, 使用时可选择一路或两路<sup>[4]</sup>. LUPA-4000 还包含三项功能: 全同步或者流水线式快门; 窗口读出功能(可开窗读出任意选定大小的矩形区域), 可提高读出图像的帧频; 双重斜率或者多重斜率功能, 可获取高对比度图像, 避免产生亮度区域饱和的现象.

## 2 系统总体设计及硬件设计考虑

电路系统结构如图 2: 计算机通过异步串口向 FPGA 发送控制信息, 包括积分时间长度, 同步方式等, 并通过发送命令字对相机工作状态进行查询. FPGA 对接收到的控制信息进行分析判断, 据此产生 CMOS 传感器驱动时序. CMOS 传感器输出的模拟信号经由 CMOS 芯片内集成的一路 ADC 转换为 10 位的数字信号, 输入 FPGA, FPGA 按要求结合同步信号、时钟信号和数字视频信号将它们转换为一定的数字视频时序波形, 由输出端口送出.

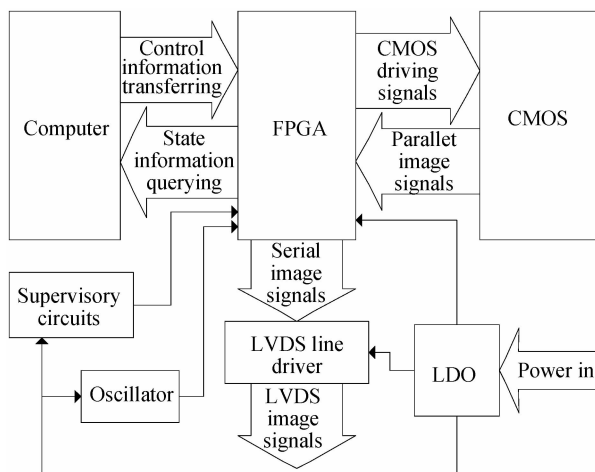


图 2 相机电路系统  
Fig. 2 Circuit system of camera

相机系统硬件由两块多层电路板通过背部插接的方式构成, 一块放置 CMOS 传感器, 另一块放置 FPGA、系统供电、信号电平转换等其它芯片. FPGA 选用 Actel 公司的 APA-300. 它采用 FLASH 工艺制造, 具有功耗低、密度高、非易失等特点, 广泛应用于消费电子产品工业控制、航空电子、通信技术等领域.

因为 FPGA 的 I/O 所支持的逻辑电平同计算机的串口电平不匹配, 所以系统中还加入了串口电平转换芯片. 同时为了实现高速、抗干扰、低功耗的数据传输, 在系统输出端使用 LVDS 电平转换芯片, 将图像信号转换为低压差分信号进行传输. 为了避免使用相同电源供电带来的串扰, LUPA-4000 芯片内部的不同模块, 如列放大, 输出级, 数字模块等都采用独立 LDO 供电, 并且相互之间都采取了隔离滤波措施. 当系统供电受到干扰时, 会影响到程序运行稳定性, 所以选择在系统中加入电源监控芯片. 当供电电压低于稳定阈值时, 它将提供一个复位信号, 使程序复位, 避免程序运行出错, 影响系统正常工作.

## 3 驱动程序设计

基于 FPGA 的系统程序分为三大模块: 异步串口通信模块、驱动时序产生模块和数据转换模块. 异步串口通信模块用于同计算机进行通信, 并对接收到的控制字进行判断. 驱动时序产生模块负责产生 SPI 配置, 图像传感器像素积分, 数据转移读出等控制时序. 数据转换模块将并行数据转换为串行数据, 并配合同步信号、像素时钟等进行发送. 各个模块之间相互关系如图 3.

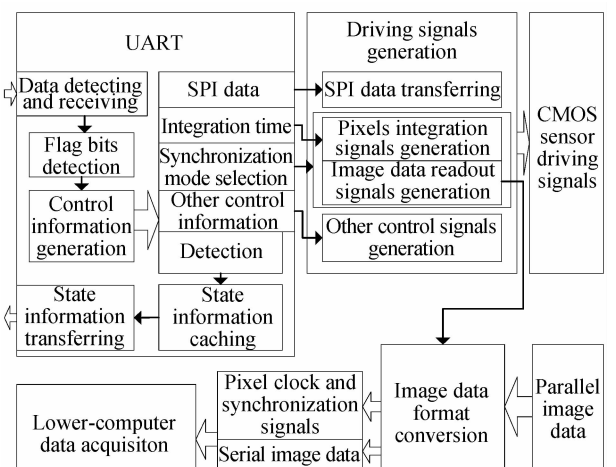


图 3 驱动程序模块及其相互关系

Fig. 3 Driving program module and the relationship between them

### 3.1 异步串口通信模块

CMOS 传感器的所有控制信息都采用异步串口读入. 这些控制信息包括: 积分时间调节、同步方式切换、SPI 寄存器配置信息、线性转换方式切换以及位翻转控制等. 异步串口通信(UART)的数据格式采用 1 位起始位, 8 位数据位, 2 位停止位的格式. 波特率设定为 9 600 bps. 设定每次读入的 1 字节数据前 3 位是标志位, 代表不同类型的控制信息, 后 5 位是数据位, 对应表示具体的控制信息. 因为积分时

间、SPI 数据等控制信息的数据宽度超过了 5 个比特,所以这些控制信息的生成需要通过每次接受多个字节的串口数据,然后对它们的数据位进行并置操作,生成对应的控制信息,保存在各自的缓存器中,等待驱动时序产生模块的调用与处理<sup>[5]</sup>。

### 3.2 CMOS 驱动时序产生模块

LUPA-4000 的驱动程序包括 4 部分:SPI 信息发送、像素积分时序信号产生、数据读出控制信号产生和位翻转选择等控制信号的产生。当 LUPA-4000 的所有供电同时加电时,传感器将进入锁定状态,只有当提供了所有驱动时钟后,它才能进入工作状态<sup>[6]</sup>。为了避免上电后产生的锁定状态,当系统加电后,立即产生所有的驱动时序,程序运行过程中再对其进行调节,实现积分时间变换,同步方式切换等功能。

LUPA-4000 使用了一个 32 位长的 SPI 寄存器来对其工作模式进行初始化,包括改变开窗地址、数据读出方向等。当从串口读入的 SPI 数据被放置进 FPGA 中设置的一个缓存器后,配合发送时钟和使能信号,将此 32 位数据串行的输入到 CMOS 传感器 SPI 寄存器,实现对其的初始化配置。

像素的积分和读出设计为并行工作模式,控制像素积分的驱动时序如图 4。

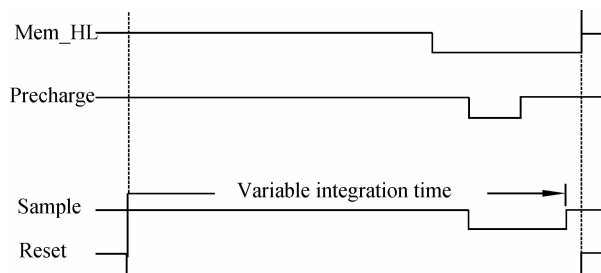


图 4 控制像素积分信号的驱动时序

Fig. 4 Timing of signals which control pixel integration

控制像素积分的各个信号的脉宽以及彼此之间沿快慢关系都是固定的。可变的积分时间设定为从 reset 信号下降沿到 sample 信号上升沿之间的时间宽度。所以改变积分时间的操作可以通过锁定 reset 信号的后沿,改变它的负脉冲宽度来实现。积分时间设定为一个 10 位的数据,这个数值每增加 1 代表积分时间增加 50  $\mu\text{s}$ 。积分时间范围为 1 ~ 39.95 ms。根据时序要求,在每个帧周期内的不同时刻控制各个控制信号的状态,以实现积分控制信号的不同脉宽和彼此之间的先后关系<sup>[7]</sup>。将表示积分时间的信号带入这一过程,改变 Reset 信号的状态区间,从而实现积分时间的可调。

像素读出控制部分负责将视频信号读出。每帧积分的结束时刻对应本帧读出时刻的开始。读出时序如图 5。

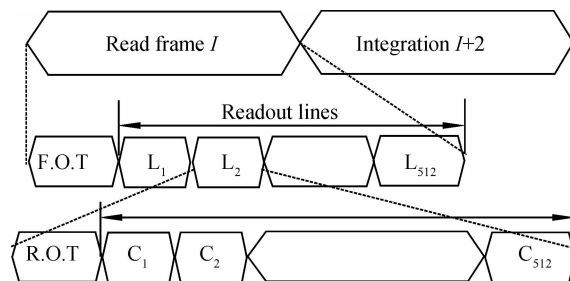


图 5 像素读出时序

Fig. 5 Timing of pixel readout

一帧图像的读出时间包括 FOT(帧头时间)和像元读出时间。FOT 是读取信号之前的一段时间,用来把光电二极管上的信息传送到存储单元内。完成这个过程后,便开始进行一帧的读取。ROT 是行头时间,产生列同步信号和其他控制信号。除去 FOT,每行读取的时间也是相同的;除去 ROT,每列读取的时间都是相同的。同积分控制信号产生类似,对应不同的行列同步、控制、时钟信号等仍然采取在不同状态时对不同信号赋值的操作来实现。其它的驱动信号,如控制位翻转,线性信号选择等都是通过对从串口接收到的控制字进行判断解读,从而转换为相应的驱动信号,输出到 CMOS 传感器。

### 3.3 数据转换模块

数据转换模块实现对图像数据的实时转换,将并行数据转换为 4 路串行数据,并且结合帧同步,行同步和像素时钟信号进行输出。转换模块依次读入 4 个像元各自的 10 位数字信号到 4 个缓存器,在进行下 4 个像元信号的缓存操作的同时,将这 4 个像元的信号串行输出,并保证串行输出的时间与完成 4 个像元信号缓存的时间相同。相应的帧同步,行同步和像素时钟等信号按此时串行数据时序的要求重新产生,与串行图像数据同步输出。

## 4 测试波形及成像效果分析

对 CMOS 传感器的各个驱动信号进行了测试,图 6 是控制像素积分信号的测试波形,通过示波器

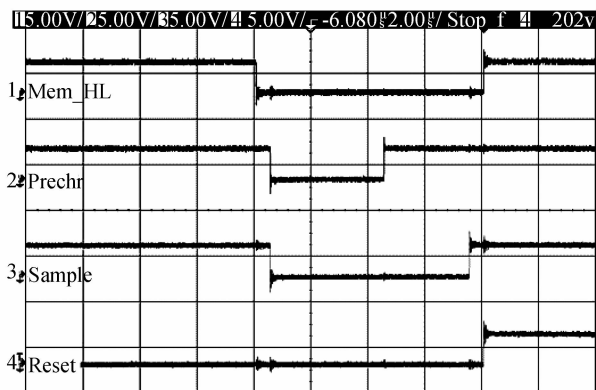


图 6 控制像素积分信号波形

Fig. 6 Waveform of signal which control pixel integration

波形验证了各个控制信号之间相互关系及脉冲宽度都符合器件设计要求。

图7为通过串口设定积分时间为20 ms时,控制像素积分信号的波形.经测试Reset下降沿到Sample上升沿精确的等于20 ms,证明积分时间设置操作正常。

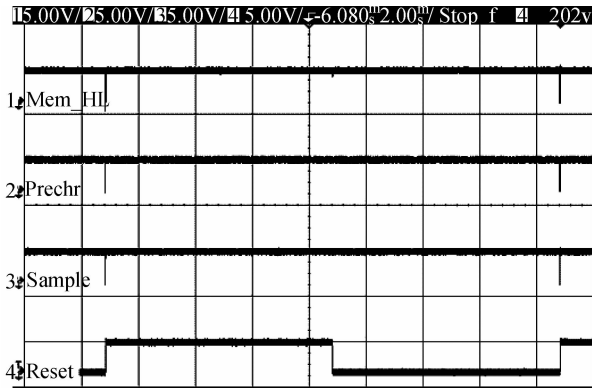


图7 积分时间设置测试波形

Fig. 7 Test waveform of integration time setting

在对系统PCB板进行了测试调试并确认无误后,加载CMOS传感器芯片,经由数据采集卡采集图像数据后直接显示,并任意抽取其中一帧图像,如图8:图像清晰,而且分辨率高,灰度等级区别明显.但同时行列方向存在不均匀性问题,可以通过后期图像处理消除这个影响.相机总体达到设计要求。

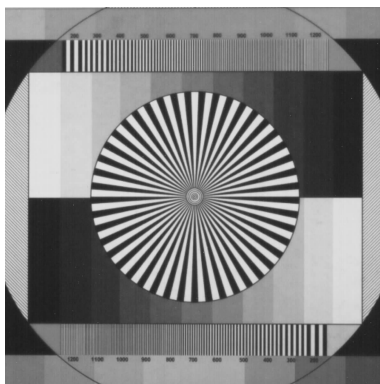


图8 相机采集图像

Fig. 8 Image captured by camera

## 5 结论

在分析了LUPA-4000图像传感器像素结构特点的基础上,通过分析它的驱动时序设计了驱动程序,并且实现了同计算机的通信和数据转换发送.依照电路完整性和电磁兼容要求,设计了系统硬件PCB,并进行了调试测试.经加载CMOS芯片后得到测试图像,图像质量较高,基本符合设计要求,也为进一步完善,改进CMOS相机性能奠定了基础。

### 参考文献

- [1] YOU Zheng, LI Tao. Application of CMOS image sensor in space technology [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1): 31-35.  
尤政, 李涛. CMOS图像传感器在空间技术中的应用[J]. *光学技术*, 2002, **28**(1): 31-35.
- [2] LIN Fan, WU Sun-tao, GUO Dong-hui. Technology of CMOS sensor and its research progresses [J]. *Semiconductor Technology*, 2001, **26**(12): 40-44.  
林凡, 吴孙桃, 郭东辉. CMOS图像传感器技术及其研究进展[J]. *半导体技术*, 2001, **26**(12): 40-44.
- [3] Cypress. High Fill Factor N-Well Pixel: US, 6225670 [P]. 2001-5-1.
- [4] Cypress Semiconductor Corporation. LUPA-4000 datasheet [M]. 2007.
- [5] RAN Xiao-qiang, WEN De-sheng, QIU Yue-hong, et al. Generator and Lower Computer of Space Array CCD Camera Based on FPGA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(SUP): 278-281.  
冉晓强, 汶德胜, 邱跃洪, 等. 基于FPGA的空间面阵CCD相机驱动时序发生器与下位机的一体化设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(增): 278-281.
- [6] LI Dan. A Large Format High-speed CMOS Camera Based on LUPA-4000 [D]. Beijing: National Astronomical Observatories Chinese Academy of Science, 2006. 35-36.  
李丹. 基于LUPA-4000的高速大面阵CMOS相机的研制[D]. 北京: 中国科学院国家天文台, 2006. 35-36.
- [7] RAN Xiao-qiang, WEN De-sheng, ZHENG Pei-yun, et al. Designing on Driving Schedule Generator for Space Array CCD Camera and Hardware Based on CPLD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 364-367.  
冉晓强, 汶德胜, 郑培云, 等. 基于CPLD的空间面阵CCD相机驱动时序发生器的设计与硬件实现[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 364-367.

## Design of a Large Area Array CMOS APS Camera System

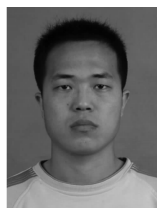
LIU Xin-ming<sup>1,2</sup>, LIU Wen<sup>1</sup>, LIU Zhao-hui<sup>1</sup>

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

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

**Abstract:** A camera system is designed based on the large area array CMOS APS image sensor LUPA-4000. Through analyzing the timing of LUPA-4000, the incorporate program comprised CMOS image sensor driving, communication and data format conversion is described with VHDL. Each program module is specified. FPGA (field programmable gate array) is chosen as the driving signals' hardware carrier. The circuit system is designed. Driving signals of CMOS image sensor is tested after program loading. Pixel integration control signals' waveforms are given. The whole system runs steadily and reliably. Its communication with computer is exact and its data transfer with lower computer is accurate. Image with high quality is taken after installing optical system.

**Key words:** CMOS camera; System design; Driving program; LUPA-4000



**LIU Xin-ming** was born in 1984. He is now a M. S. degree candidate at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, and his current research interests focus on digital IC design and FPGA-based system development.