

文章编号 1004-924X(2011)07-1538-08

紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计

马庆军*, 宋克非, 曲 艺, 王淑荣

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:提出一种用于紫外临边成像光谱仪模数分离成像电路的系统设计方案,该方案避免了 CCD 模拟输出信号的板间传输和数字信号对模拟信号的干扰,使 CCD 信号处理电路的噪声水平达到了模拟前端数据手册中给出的 2 LSB 的性能指标。考虑 CCD57-10 BI AIMO 没有抗溢出结构,在饱和之前会发生电荷溢出现象,提出了临界溢出电子数的概念以取代饱和电子数,并通过增加转移时钟电压以加深势阱深度的方法,将临界溢出电子数从 3.0×10^4 提高到了 6.0×10^4 ,保证了探测器可正确探测设计范围内的强光信号。为了实现更短的曝光时间以增加动态范围,在时序设计中引入了多次电荷倾倒的思想,在不降低探测器动态范围的前提下,将最短曝光时间由 163 ms 降低到了 19 ms,实现了 10^5 系统动态范围的设计指标。

关键词:紫外临边成像光谱仪;CCD 电路;模数分离;功率驱动;动态范围;曝光时间

中图分类号:TH744.1;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111907.1538

Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging spectrometers

MA Qing-jun*, SONG Ke-fei, QU Yi, WANG Shu-rong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: qjma@ciomp.ac.cn

Abstract: For ultraviolet limb imaging spectrometers, a system-level design scheme of the imaging circuit featured by analog-digital separation was presented to avoid the CCD output analog signal transferring between the boards and the interference of digital signals to analog signals. As a result, a 2 LSB noise performance of the CCD signal processing circuit is achieved, which is exactly coincident with the noise specification on the Analog Front End(AFE) datasheet. As the CCD57-10 BI AIMO has no anti-blooming structure and its charges will overflow before getting saturated, a concept about the critical blooming electron counts was defined to replace the saturation electron counts. By raising the high level voltage of CCD transfer clock signals to improve the depth of potential well, the critical blooming electron counts are increased from 30×10^4 to 60×10^4 , which ensures the highest intensity light signal in the designing range to be correctly detected. To take shorter exposure time to expand

收稿日期:2010-10-14;修订日期:2010-12-31.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA12Z151)

dynamic range, the idea of multiple charge-dumping was introduced into the design of drive timing. Without sacrificing the dynamic range of the detector, the minimum exposure time is brought down as small as 19 ms, which is almost an order magnitude lower than that of traditional CCD and ensures the system dynamic range design of 10^5 .

Key words: ultraviolet limb imaging spectrometer; CCD circuit; analog-digital separation; power driving; dynamic range; exposure time

1 引言

紫外临边成像光谱仪可以实现对臭氧、二氧化氮、二氧化硫等大气成份垂直分布及其变化的高时空分辨率的连续监测,这对研究大气上下层之间的相互作用以及了解太阳活动、空间天气与地球气候的定量关系都具有十分重要的意义^[1]。CCD 是成像光谱仪的核心器件,具有响应波段宽、量子效率高、噪声低、动态范围大以及分辨率高等优点^[2]。CCD 的正常工作,需要基于数种电压,且驱动时序复杂,因此 CCD 的成像电路设计一直是成像光谱仪研制中的一项关键技术。

CCD 自 20 世纪 70 年代问世,伴随着集成电路设计和制造工艺水平的不断提高,其驱动电路和信号处理电路都已经发展得十分成熟,各种专用集成芯片不断问世。在此基础上,本文提出了一种模数分离的成像电路系统设计方案,旨在消除 CCD 电路系统中长期存在的由于模数混合而造成的数字信号对模拟信号的干扰问题。

在紫外临边成像光谱仪的探测波段内,信号动态范围达 10^5 ,而探测器及其信号处理电路能够提供的动态范围只有 10^3 ,因此需要将曝光时间的动态范围设计成 10^2 以满足总动态范围的要求。受搭载平台运动特性的限制,曝光时间的上限通常为 100 s 量级,按传统的 CCD 驱动时序设计思想^[3-6],其最短曝光时间在 10^{-1} s 量级,如何将其降低至 10^{-2} s 量级甚至更低,从而使曝光时间能够实现 10^2 以上的动态范围且不影响探测器的总动态范围是当前 CCD 电路系统研究的一个热点^[7]。

2 系统设计方案

CCD 电路系统主要由电源电路、时序发生电路、功率驱动电路、信号处理电路(模拟前端)和整理传输电路组成,如图 1 所示。其中电源电路为 CCD 提供直流偏置电压,为功率驱动电路提供电源电压;时序发生电路为 CCD 和模拟前端(AFE)提供控制时钟信号,其中 CCD 时钟信号需要经过功率驱动电路进行电压电流放大后再送入 CCD 相应的时钟管脚;信号处理电路输出的数据经整理后发往主控模块。

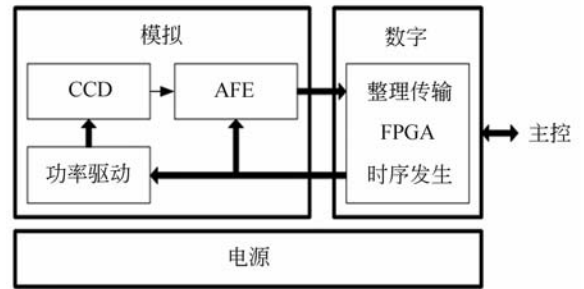


图 1 CCD 电路系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of CCD circuit system

在很多应用中,光机头部留给探测器的空间都有限,而 CCD 信号处理电路的规模通常比较大,因此常将 CCD 驱动电路和信号处理电路设计在两块电路板上,这就要涉及 CCD 输出模拟信号的板间传输问题,而且 CCD 信号处理电路是一个模拟电路,在它之后的数字信号缓冲电路^[8]、传输电路^[8-9]或处理电路,都会对模拟信号产生一定的干扰,因而在做印刷电路板(PCB)设计时必须要考虑串联电阻、模拟与数字分割以及信号如何走线等诸多问题^[8]。

本文的设计根据 CCD 输出信号的频率、幅度

和信噪比等因素,选用了 AD 公司的 14 位专用集成处理器 AD9824 来设计 CCD 信号处理电路。如图 2 所示,CCD 输出的模拟信号经射极跟随电路提升驱动能力后,再经过一个隔直电容便直接送入 AD9824,整个处理电路的规模非常小,这使得将其与 CCD 设计在同一块电路板上成为可能,从而避免了由于模拟信号的板间传输而引入的噪声。

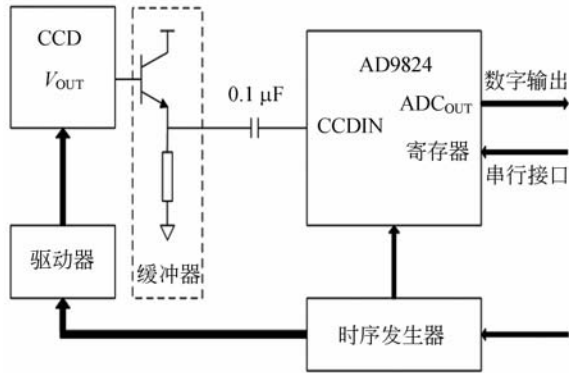


图 2 CCD 信号处理电路示意图

Fig. 2 Diagram of CCD signal processing circuit

很多设计都会在 AFE/AD 之后加一个缓冲芯片来提升数字信号的驱动能力,而实际上 AD9824 输出数字信号的驱动能力为 2 mA(负载电容 20 pF),而接收端的现场可编程门阵列(FPGA)(Xilinx 公司的 XC3S500E)需要的输入电流只有 10 μ A(等效电容 10 pF)。此外,由于设计中选用了 Samtec 公司的高速微型同轴电缆 EQCD,它可以在板间高质量地传输数字或模拟信号,30 cm 长的电缆带宽高达 5.01 GHz。这些条件意味着无需在 AD9824 后加缓冲电路,可以直接将信号通过同轴电缆传输给数字板上的 FPGA。这也意味着 CCD 驱动及信号处理电路是一个纯粹的模拟电路,可避免模数混合引入的一系列问题。

最终的电路结构划分如图 1 中的粗线方框所示。实验结果表明,本文提出的系统设计方案切实可行,FPGA 能准确接收 AFE 输出的数字信号,而信号处理电路的输出噪声水平在 2.1~2.4 LSB 之间(等效输入噪声为 131~150 μ V),基本实现了 AD9824 数据手册中给出的输出噪声 2

LSB 的性能指标(测量条件均为 AD9824 的输入交流接地,放大增益设置为 6 dB)。

3 驱动电路设计

设计中所选用的探测器是英国 e2v 公司生产的帧转移 CCD57-10 BI AIMO,在紫外波段 200~400 nm 的量子效率在 50%以上,其余主要性能参数见表 1。

表 1 CCD57-10 的主要性能参数

Tab. 1 Main performance parameters of CCD57-10

性能参数	典型值	单位
像元尺寸	13×13	μ m
光谱响应范围	200~1 100	nm
读出时钟最高频率	3.0	MHz
输出转换增益	6.0	μ V/e ⁻
峰值势阱容量	1.0×10 ⁵	e ⁻ /pixel
暗信号(20 °C)	250	e ⁻ /pixel·s ⁻¹
读出噪声(-20 °C, 20 kHz)	3.0	e ⁻ /pixel(rms)
动态范围(-20 °C, 20 kHz)	33 333 : 1	

CCD57-10 正常工作需要提供 5 种直流偏置电压和 13 路时钟信号。在本文的设计中,电源电压为 24 V,其先经模块电源(DC/DC)高效率地转换成 30,15 和 5 V,然后再经低压差线性电源(LDO)降压并滤波得到 CCD 的直流偏置电压或驱动芯片的电源电压。图 3 是使用凌特公司的线性稳压器 LT1763 得到的 CCD 衬底电压的原理图。

时钟信号不仅对高低电平电压有要求,上升(下降)时间也必须要在指定的范围内。要得到指定的上升时间,就必须提供相应大小的驱动电流。CCD 时钟信号的驱动电流需求可由式(1)来确定:

$$i_{\max} = C \frac{V_H - V_L}{t_{\text{rise}}} \times 80\% \quad (1)$$

其中 C 为时钟管脚的等效电容, V_H 为时钟信号的高电平电压, V_L 为低电平电压, t_{rise} 为上升时间。CCD57-10 所有时钟信号的电流需求和频率如表 2 所示:

表 2 时钟信号的电流需求和频率

Tab. 2 Current requirements and frequencies of clock signals

时钟信号	电容 /pF	高电平 /V	低电平 /V	上升时间 /ns	电流需求 /mA	频率 /MHz
IØ	4 400	12	0	100	422.4	0.2
SØ	4 400	12	0	100	422.4	0.2
RØ	100	10	1	50	14.4	2
ØR	10	12	0	20	4.8	2

根据上述应用需求,选用了英特锡尔公司的 EL7457 来驱动时钟信号。它的额定工作频率为 40 MHz,峰值输出电流为 2 A,驱动 1000 pF 的容性负载,上升/下降时间只有 12 ns。为了将上升/下降时间控制在数据手册中给出的范围内,在其输出端串联了一个限流电阻来控制峰值输出电流,以此来调节上升/下降时间。图 4 所示是 EL7457 驱动水平读出时钟 RØ 的原理图,其中的 R₁₃~R₁₅即为限流电阻。

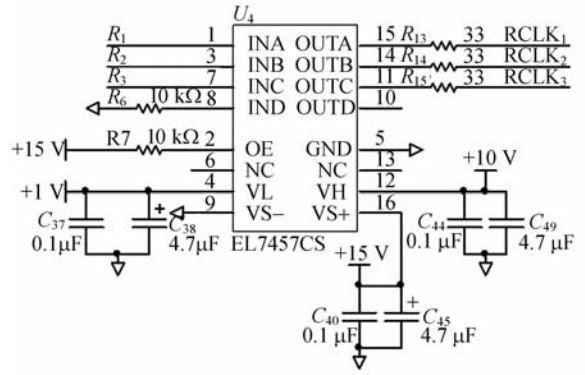


图 4 EL7457 驱动水平读出时钟的原理图

Fig. 4 Schematic of EL7457 driving horizontal read-out clocks

V,成功地将临界溢出电子数增加到了 6.0×10^4 。此时 CCD 的动态范围:

$$DR_{CCD} = \frac{Q_{CB} \times CG_{CCD}}{N_p} = \frac{60\,000e^- \times 6.0 \mu V/e^-}{150 \mu V} = 2.4 \times 10^3 \quad (2)$$

式中, Q_{CB} 表示临界溢出电子数, N_p 表示噪声电压(均方根值), CG_{CCD} 为 CCD 的输出转换增益。

4 驱动时序设计

帧转移 CCD 由成像区、存储区和水平读出寄存器 3 部分组成,其传统的驱动时序^[3-6]如图 5 (a)所示。在一个帧周期里包括 3 个阶段:帧转移、帧读出和空闲曝光。在帧转移阶段,通过控制时钟信号 IØ 和 SØ 将成像区曝光积累的电荷快速地转移到存储区,随后存储区和水平读出寄存器进入帧读出状态,而成像区则再次进入曝光状态,直至下一次帧转移。在帧读出阶段,先控制时钟信号 SØ 将一行电荷垂直转移到水平读出寄存器,再控制 RØ 和 ØR 等时钟信号将像元电荷逐个地水平读出,如此往复,直至全部像元都被读出。读完一帧后,如果成像区的曝光时间还未达到要求,则 CCD 进入空闲等待状态,即所谓的空闲曝光阶段。

可以看到,在这种驱动时序设计方案中,最短曝光时间要受帧读出时间的限制,对 CCD57-10 而言,曝光时间要在 163 ms 以上(单通道读出)。

成像光谱仪可探测信号的动态范围由以下 3

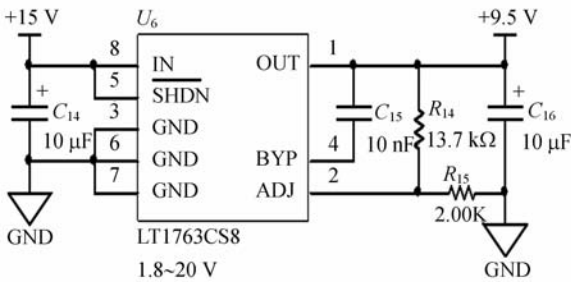
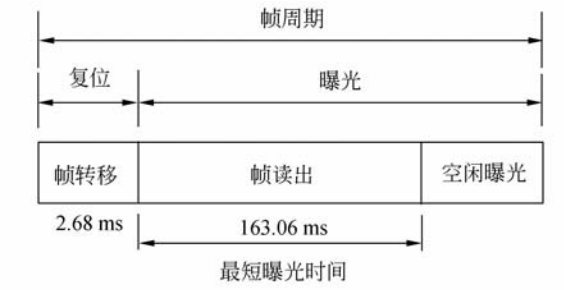


图 3 用 LT1763 得到 CCD 衬底电压的原理图

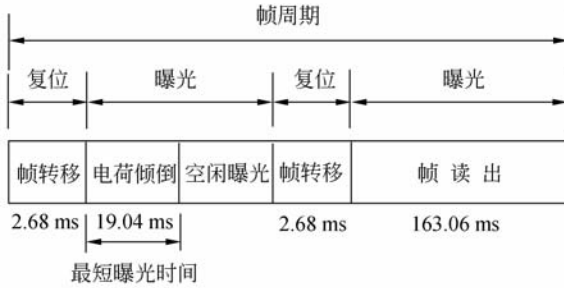
Fig. 3 Schematic of using LT1763 to get CCD substrate voltage

在试验中发现,由于 CCD57-10 BI AIMO 没有抗溢出结构,在电子数接近 3.0×10^4 时,就开始出现溢出现象,远未达到饱和电子数 9.0×10^4 (实测值)的水平。在此本文将刚好使探测器未发生溢出现象的最大电子数定义为临界溢出电子数。由于电荷溢出会导致数据无效,因此在计算探测器的动态范围时,应该使用临界溢出电子数,而不是饱和电子数。

由于 CCD 是依靠势阱来存储电荷的,势阱深度与栅极电压正成正比^[2]。按照这种分析,本文将 CCD 帧转移时钟的高电平电压由 12 V 提高至 15



(a) 传统驱动时序
(a) Traditional drive timing



(b) 带电荷倾倒的驱动时序
(b) Drive timing with charge-dumping

图 5 帧转移 CCD 驱动时序示意图

Fig. 5 Diagram of frame-transfer CCD drive timing

个因素决定：(1)光学系统入瞳口径可调节的动态范围；(2)探测器及其信号处理电路的动态范围；(3)曝光时间可调节的动态范围。本课题中紫外临边成像光谱仪的探测波段为 280~780 nm，覆盖了从紫外到可见共 500 nm 的光谱段宽度。在这个光谱范围内，大气临边光谱辐射亮度的动态范围达 10^5 的数量级，而探测器本身能够提供的动态范围只有 10^3 ，光学系统的入瞳口径又不可调节，这就要求曝光时间能够提供 10^2 的动态范围。受搭载平台（系留气艇）运动特性的限制，曝光时间的上限为 2 s，因此必须要设法将曝光时间的下限做到 20 ms 以下。

由前面对传统驱动时序的分析可以看到，CCD 实际上是依靠帧转移来实现对成像区的复位操作，两次帧转移之间的时间间隔就是曝光时间，因此若能在一次帧转移之后，快速地将电荷全部倾倒掉，然后再进行帧转移和帧读出操作，便可突破限制，实现降低最短曝光时间的目的，这正是本文提出的带有电荷倾倒的驱动时序的设计思想。如图 5(b)所示，在一个帧周期里包括 5 个阶

段。CCD57-10 实现电荷倾倒的控制时序如图 6 所示。

设计中帧转移时钟 (IO、S0) 周期为 $4.8 \mu\text{s}$ ，行转移时钟 (S0) 周期为 $36 \mu\text{s}$ ，水平读出时钟 (R0) 周期为 480 ns，各个阶段所用时间均标注于图 5 中。可以看到，一次电荷倾倒用时仅需 19.04 ms，相比于帧读出时间 163.06 ms 降低了近一个数量级。此时曝光时间的动态范围：

$$DR_{ET} = \frac{ET_{\max}}{ET_{\min}} = \frac{2 \text{ s}}{19.04 \text{ ms}} \approx 1.05 \times 10^2, \quad (3)$$

式中， ET_{\max} 表示最长曝光时间， ET_{\min} 表示最短曝光时间。

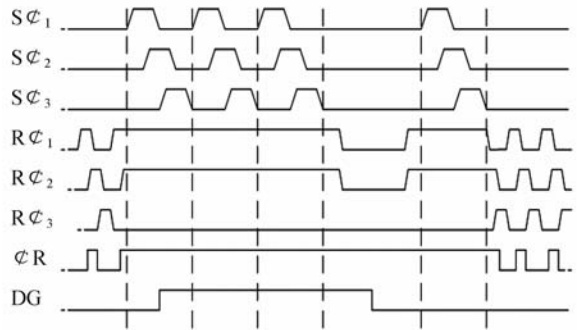


图 6 电荷倾倒时序

Fig. 6 Timing of charge-dumping

在具体实现时，要根据曝光时间与帧读出时间的关系来决定是否要进行电荷倾倒。整个 CCD 驱动时序的工作流程如图 7 所示。

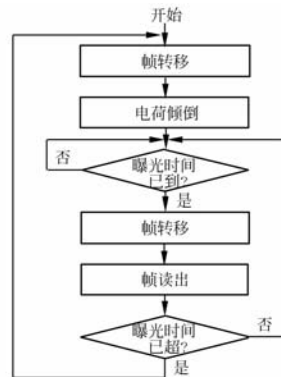


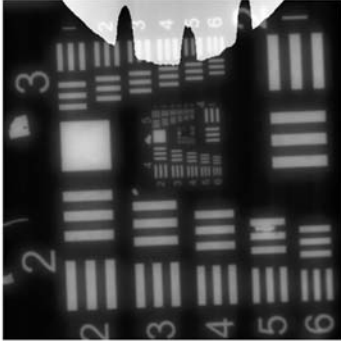
图 7 驱动时序工作流程

Fig. 7 Flowchart of drive timing

在标定系统动态范围的试验中发现，用 20 ms 的短曝光时间对设计范围内的强光目标成像时，出现了如图 8(a)所示的现象。可以看到，1 次电荷倾倒并不彻底，有大量电荷的残留到了下一帧图像中，这会导致 CCD 提前出现电荷溢出

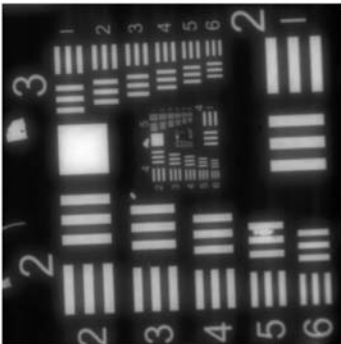
象,从而降低动态范围。

实验结果表明,将“帧转移-电荷倾倒”的执行次数增加至 8 次以上,便可完全清除上一帧曝光的电荷。8 次电荷倾倒的成像效果如图 8(b)所示。注意到最短曝光时间仍然是最后 1 次电荷倾



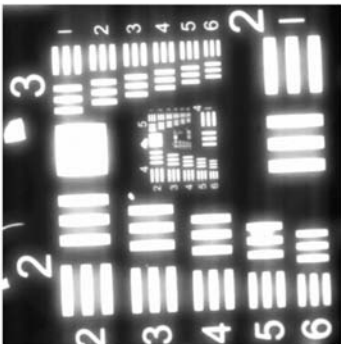
(a) 1 次电荷倾倒

(a) Charge-dumping only one time



(b) 8 次电荷倾倒

(b) Charge-dumping eight times



(c) 强光信号下的拖影现象

(c) Smearing under high intensity light

图 8 分辨率板的成像效果(曝光时间 20 ms)

Fig. 8 Imaging results of resolution test chart (with an exposure time of 20 ms)

倒的时间,虽然增加了帧周期,却使探测器的动态范围得到了保证。

当前 CCD 驱动时序多用可编程逻辑器件^[3-6]或单片机^[10-11]产生,本文选用的是赛灵思公司的 Spartan-3E 系列 FPGA XC3S500E,片内有 50 万系统门、4 个数字时钟管理器(DCM)和 20 个块随机存取存储器(Block RAM)等丰富的逻辑资源。在 Xilinx ISE 10.1 环境下,设计输入采用 VHDL 语言,ModelSim XE 功能仿真的结果(一个帧周期)如图 9 所示。在设计实现时添加了 20 ns 的全局周期时序约束,布局布线后的静态时序分析结果显示所有的路径长度都小于 20 ns,以此确保上述时序设计得到了准确实现。

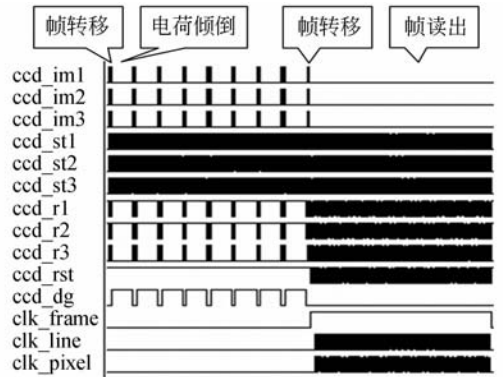


图 9 带电荷倾倒的一帧时序仿真结果

Fig. 9 Simulation result of a frame timing with charge-dumping

5 结 论

本文提出了一种模数分离的成像电路的设计方案,该方案在使 CCD 正常工作的基础上,注重在应用中发现和解决问题,充分发挥了探测器的潜能。最终紫外临边成像光谱仪的动态范围是 CCD 的动态范围 2.4×10^3 与曝光时间的动态范围 1.05×10^2 的乘积,即约 2.5×10^5 。

需要指出的是,19.04 ms 的最短曝光时间使 CCD 可以探测更强的光信号,但同时加重了帧转移过程中产生的拖影现象(Smear)^[7],如图 8(c)所示,因此,对这一问题的深入研究将是本文后续工作的重点。

参考文献:

- [1] CHEN SH B. A new technique for atmospheric chemistry observations [J]. *SPIE*, 2006, 6031: 60310R-1-7.
- [2] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2002:30-40.
WANG Q Y. *The Application Technology of CCD* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002:30-40. (in Chinese)
- [3] 金龙旭,李国宁,刘妍妍. 帧转移型面阵 CCD 驱动电路的设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 1140-1145.
JIN L X, LI G N, LIU Y Y. Design of driving circuit for frame transfer area CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1140-1145. (in Chinese)
- [4] 姚鸣晖,李自田,刘军. 紫外面阵 CCD 驱动时序设计[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(4-2): 281-289.
YAO M H, LI Z T, LIU J. Designing on driving generator for UV array CCD [J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(4-2): 281-289. (in Chinese)
- [5] 程鹏飞,顾明剑,王模昌. 基于 FPGA 的帧转移面阵 CCD 驱动电路设计[J]. *红外技术*, 2006, 28(9): 519-522.
CHENG P F, GU M J, WANG M CH. A design of array CCD of frame transfer driving circuit based on FPGA technique [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(9): 519-522. (in Chinese)
- [6] 冉晓强,汉德胜,郑跃洪,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(6): 278-291.
RAN X Q, WEN D SH, QIU Y H, *et al.*. Generator and lower computer of space array CCD camera based on FPGA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 278-291. (in Chinese)
- [7] 龚德铸,贾锦忠,刘洋. 紫外 CCD 敏感器头部电路系统的研究[J]. *空间科学学报*, 2006, 26(2): 132-141.
GONG D ZH, JIA J ZH, LIU Y. Research of circuit system in CCD ultraviolet sensor for probing Moon [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, 26(2): 132-141. (in Chinese)
- [8] 薛旭成,李云飞,郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1191-1195.
XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1191-1195. (in Chinese)
- [9] 白喆,张伯珩,边川平. TDA8783 在 CCD 相机视频信号处理中的应用[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(6-1): 160-162.
BAI ZH, ZHANG B H, BIAN CH P. The application of TDA8783 in dealing with CCD camera video signal [J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(6-1): 160-162. (in Chinese)
- [10] 万峰,范世福. 以 c8051F020 为核心的 CCD 驱动与采集系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13: 179-182.
WAN F, FAN SH F. Development of driving and sampling circuit for CCD based on c8051F020 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13: 179-182. (in Chinese)
- [11] 盛翠霞,张涛,纪晶,等. 高分辨率 CCD 芯片 FTF4052M 的驱动系统设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 564-569.
SHENG C X, ZHANG T, JI J, *et al.*. Design of CCD FTF4052M driver system with high sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 564-569. (in Chinese)

作者简介:



马庆军(1979—),男,黑龙江密山人,博士,助理研究员,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事遥感数据获取和处理算法的研究。
E-mail: qjma@ciomp.ac.cn



宋克非(1967—),女,吉林长春人,研究员, FY-3 卫星紫外臭氧垂直探测仪副主任设计师,1998年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事微弱信号检测及紫外遥感技术的研究。
E-mail: songkefei@sina.com



曲 艺(1979—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2006年于吉林大学获得博士学位,主要从事空间紫外遥感技术的研究。E-mail: quyiy972@sohu.com



王淑荣(1961—),女,吉林长春人,硕士,研究员,FY-3卫星紫外臭氧垂直探测仪主任设计师,1994年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事空间紫外光学遥感技术及光学检测、紫外辐射计量测试方法的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

●下期预告

RB-SiC 反射镜的制备及改性非球面加工

闫 勇,金 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了解决 RB-SiC 反射镜工程实践中暴露的一些工程问题,缩短非球面加工周期,对 RB-SiC 反射镜材料的制备、表面改性及非球面加工等技术进行了分析研究。首先,依据其改性特殊性,选取了与 RB-SiC 反射镜材料热胀系数匹配的新型支撑材料进行热匹配设计。接着,依据实际工程情况对非球面加工工艺及流程进行了技术改进,以提高加工的可靠性,缩短加工周期。最后,采用试验的方法对 RB-SiC 反射镜的相关技术方法进行了试验验证。试验结果表明:改性后 RB-SiC 反射镜完好,改性前后镜面面形精度 RMS 值变化量仅为 0.017λ ($\lambda=623.8\text{ nm}$),变化率为 13%,非球面加工周期缩短 1~2 个月。该技术方法确保了 RB-SiC 反射镜 $10\ \mu\text{m}$ 的改性膜层在后续加工中的加工余量,使其不易被磨漏,提高了加工的安全性,缩短了非球面加工周期。该技术完全适用于其它 SiC 反射镜的制备及非球面加工。