

# 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计与实现

常 振<sup>1,2</sup>, 王 煜<sup>1</sup>, 司福祺<sup>1</sup>, 赵敏杰<sup>1</sup>, 江 宇<sup>1</sup>, 刘凤奎<sup>1</sup>, 刘文清<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 为了获取高信噪比的图像,采用紫外敏感型科学级光电探测器 CCD47-20,设计了可在特定紫外波段对燃料燃烧火焰进行快速曝光成像的紫外成像系统。CCD47-20 具有较深的势阱,可以保证成像系统的信噪比。然而对于此类 CCD,其曝光时间通常在 200 ms 以上。为了实现对目标的快速曝光,在分析 CCD47-20 的性能及工作原理基础上,设计了基于两次帧转移、一次水平读出的 CCD 驱动时序方法,完成了成像系统的设计,将 CCD 的曝光时间缩短至 10 ms。在实验室对系统进行了辐照测试,结果表明,当曝光时间改变时,CCD 响应度为线性,验证了时序及驱动电路设计的正确性。信噪比测试结果表明系统信噪比达到 46.8 dB。在外场,对固体燃料火焰进行了成像,获取了火焰在特定紫外波段的图像,捕捉到了剧烈燃烧的火焰形状,验证了紫外成像系统快速曝光的性能。

**关键词** 传感器; 快速曝光; 电荷耦合器件; 驱动时序; 帧转移; 成像技术; 紫外设备

**中图分类号** TN919.5

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0804002

## Design and Implementation of Ultraviolet Imaging System Based on Scientific Grade CCD

Chang Zhen<sup>1,2</sup>, Wang Yu<sup>1</sup>, Si Fuqi<sup>1</sup>, Zhao Minjie<sup>1</sup>, Jiang Yu<sup>1</sup>, Liu Fenglei<sup>1</sup>, Liu Wenqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** To obtain images with high signal-to-noise ratio (SNR), a ultraviolet imaging system is developed based on a scientific grade CCD (CCD47-20) which is sensitive on ultraviolet. The imaging system can quickly image flames of burning solid fuel at particular ultraviolet waveband. CCD47-20 has deeper potential well, which guarantees SNR of the imaging system. However, the exposure time of these CCD is usually above 200 ms. To realize quick exposure on target, a CCD driven timing sequence with twice-frame-transfer and once-horizontal-readout is designed based on the analysis of performance and working principle of CCD47-20. The design of imaging system is finished, and the exposure time of CCD is reduced to 10 ms. The irradiation test of the system is carried out in the laboratory. The results show that when exposure time changes, the responsivity of CCD is linear, which verifies the correctness of design of timing sequence and driven circuit. SNR test results show that the SNR of the system can reach 46.8 dB. Flames of burning fuel in the specified ultraviolet waveband are imaged using the ultraviolet imaging system. Shapes of flames are captured, which validates the fast exposure performance of ultraviolet imaging system.

**Key words** sensors; fast exposure; charge coupled device; driven timing sequence; frame transfer; imaging techniques; ultraviolet instruments

**OCIS codes** 040.149; 110.2970; 040.7190

**收稿日期:** 2017-03-01; **收到修改稿日期:** 2017-04-11

**基金项目:**国家重点研发计划(2016YFC0200400)、国家自然科学基金(U1407135)、安徽省自然科学基金(1408085MKL49)

**作者简介:** 常 振(1988—),男,博士研究生,主要从事 CCD 成像技术方面的研究。E-mail: zhchang@aiofm.ac.cn

**导师简介:** 王 煜(1971—),男,博士,研究员,主要从事光谱电子学技术方面的研究。

E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

## 1 引 言

电荷耦合器件(CCD)相比于互补金属氧化物半导体(CMOS)技术有着量子效率高、电荷容量大、读出噪声小、光谱范围宽等优势,在军事、医学、安防、工业、环境探测等领域有着广泛应用<sup>[1]</sup>。根据集成的方式不同,CCD可分为线阵 CCD 和面阵 CCD。面阵 CCD 相比于线阵 CCD 更具有优势,能瞬间获取整幅图像信息<sup>[2]</sup>,帧转移型面阵 CCD 在高光谱遥感技术中具有非常重要的应用价值<sup>[3]</sup>。CCD 的正常工作离不开优异的驱动时序,驱动时序的优劣直接决定了仪器的品质参数<sup>[4]</sup>。对于帧转移型面阵 CCD,常规的驱动时序是在一个成像周期内进行一次帧转移及一次水平读出,水平读出的时间基本上就是 CCD 的曝光时间。文献<sup>[4-10]</sup>即是采用这种驱动方式设计的 CCD 成像系统。

紫外成像系统能够实现火药或燃料的火焰在 250~295 nm 的紫外波段进行拍照,提供燃料在该波段的燃烧图像。在进行紫外信号探测时,一般选用第二代增强型 CCD(ICCD)作为系统的光电探测器。例如,电晕检测技术中使用的就是 ICCD。这是因为电晕发出的紫外光十分微弱,需要使用 40% 以上的微通道板(MCP)放大才能检测到紫外信号<sup>[11]</sup>。电子倍增 CCD(EMCCD)也是用于微弱光探测的 CCD 器件,与普通 CCD 相比的不同之处是在水平寄存器和读出放大器之间增加了一串倍增寄存器以实现信号电子的倍增放大<sup>[12]</sup>。固体燃料火焰发出的紫外光比电晕要强许多,无需使用 ICCD 或 EMCCD。此外,这两种器件在对信号增强的同时也引入了额外的噪声,造成系统信噪比(SNR)下降。为了捕捉到燃烧火焰的形状,以获取火焰不同位置点的光强值,需要成像系统的曝光时间在保证 CCD 照度的前提下尽可能短。实际上,帧转移 CCD 的拖尾系数为帧转移时间与有效积分时间的比值<sup>[3]</sup>,即过短的曝光时间会产生严重的拖尾现象,综合考虑后选择 10 ms 作为系统的曝光时间。视频级 CCD 可以达到很高的帧频,从而满足快速曝光的需求,但是信噪比较低,无法用于测量设备。提升 CCD 的读出时钟频率以提高帧频也可以缩短曝光时间,但是会导致 CCD 读出信号的失真和信噪比的下降。由于散弹噪声的影响,CCD 的势阱深度直接决定了图像数据的信噪比。因此,为了保证图像的信噪比,需采用深势阱的科学级 CCD。然而深势阱需要更长的读出时间,无法实现快速曝光。为此,本文提出了一种特殊的 CCD 时序驱动方法——两次帧转移方式的 CCD 时序,并基于这一方法完成紫外成像系统的设计。本文系统拟采用 E2V 公司的科学级探测器 CCD47-20,在分析该器件的工作过程和驱动信号的基础上,选用可编程门阵列(FPGA)作为硬件电路设计平台,完成驱动电路的设计,实现对目标 10 ms 快速曝光成像。

## 2 CCD47-20 成像技术分析

CCD47-20 因其优异的性能,被国内外众多航天科研单位采用<sup>[13-17]</sup>。CCD47-20 有如下特点:1)具有极宽的光谱范围[极紫外到近红外波段(10~1100 nm)];2)具有先进反型操作(AIMO)操作方式,可以有效抵抗电离辐射并能最小化暗电流;3)其紫外涂覆增强技术可使紫外波段量子效率达到 60%;4)单个像元的满阱电荷数为  $1 \times 10^5$ ,使其具有较宽的动态范围;5)具有半导体制冷器与 CCD 整体封装工艺。

CCD 对温度十分敏感,较高的温度会产生大量的热噪声,严重影响系统的信噪比。因此,用于测量设备的 CCD 都会采用制冷装置。 $-40\text{ }^\circ\text{C}$  的环境会将 CCD47-20 的暗电流噪声粒子数控制在  $100\text{ pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。因此,为了保证成像系统的信噪比,系统采用  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  制冷。

### 2.1 成像系统的信噪比

为了保证系统的成像精度,设定 CCD 信号达到饱和光强 80% 的信噪比高于 45 dB。此数值高于普通相机以及视频成像设备的信噪比数值。因此,应用于普通视频设备的 CCD 不满足要求。

紫外成像系统的噪声主要包括入射光的散弹噪声  $N_{\text{shot}}$ 、探测器的暗电流噪声  $N_{\text{dark}}$ 、探测器的读出噪声  $N_{\text{read}}$ ,这些噪声都是随机的且相互独立。根据不相关性原理,紫外成像系统的总噪声可表示为:

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{read}}^2} \quad (1)$$

系统采用  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  制冷成像,由 CCD47-20 技术手册可知,此时的暗电流信号约为  $60\text{ e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。系统的成像周期为 1 s,因此暗电流信号为  $60\text{ e}^- \cdot \text{pixel}^{-1}$ ,暗电流噪声为  $\sqrt{60}\text{ e}^-$ ,约为 8 个电子。另外,实验计算测得 CCD47-20 的读出噪声约为 15~20 个电子。投射在 CCD 光敏元件上的光能被转换成电荷,由

CCD 上的电势阱收集。电势阱的深度决定了散弹噪声的粒子数,两者的关系为<sup>[18]</sup>:

$$N_{\text{shot}} = \sqrt{N}, \quad (2)$$

式中  $N_{\text{shot}}$  为散弹噪声粒子数,  $N$  为总粒子数。CCD47-20 单个像元的满阱电荷数为  $1 \times 10^5$ , 由 (2) 式可求得 CCD 信号满量程时的散弹噪声为 316 个电子。

由上述分析可知,散弹噪声是影响 CCD 图像信噪比的主要噪声,而像元电势阱的深度直接决定了散弹噪声的大小。因此,电势阱的深度从根本上决定了 CCD 成像系统的信噪比。CCD 信号满量程时的信噪比  $R_{\text{SN}}$  为:

$$R_{\text{SN}} = \frac{N}{N_{\text{noise}}} = \frac{N}{\sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{read}}^2}} \approx \frac{N}{N_{\text{shot}}} = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}. \quad (3)$$

因此,若要满足 CCD 信号达到饱和光强 80% 时的信噪比大于 45 dB,则 CCD 满阱电荷数的 80% 须达到 31623,即满阱电荷数达到 39529。

综合考虑势阱深度、暗电流、像元均匀性、光谱响应、读出性能以及器件成本等因素,选用英国 E2V 公司的紫外敏感科学级探测器——CCD47-20,其单个像元的满阱电荷数为  $1 \times 10^5$ 。

### 2.2 CCD 驱动时序设计

CCD 驱动电路设计的好坏是 CCD 应用的关键问题之一,驱动时序发生器性能的优劣直接决定了成像系统的品质参量。帧转移型面阵 CCD 主要由成像区、存储区和水平读出区三部分组成。存储区表面有铝层覆盖,可以实现光屏蔽<sup>[6]</sup>。光敏区由并行排列的若干电荷耦合沟道组成,水平电极横贯各沟道,如图 1 所示。

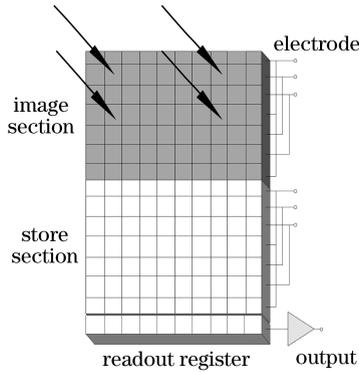


图 1 帧转移型面阵 CCD 的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of frame transfer area array CCD

如图 1 所示,CCD 存储区与成像区结构相同,但存储区没有感光面。每个成像周期内,CCD 进行一次帧转移和一次水平读出,循环往复。此为标准的帧转移 CCD 驱动时序操作方式。

由此可知,在存储区读出的同时,成像区曝光,曝光时间等于存储区的读出时间,调整读出速率就可以得到不同的曝光时间,但是读出频率过高会使 CCD 信号电荷丢失与遗漏,从而影响成像质量<sup>[19]</sup>。为了获取高精度的图像,需要使用深势阱的科学级 CCD,以积累更多的电荷,但必须采用更低的读出频率。例如,CCD47-20 的最高读出频率为 5 MHz,当采用两侧同时读出时,一帧图像(1000 pixel×1000 pixel)的读出时间为 250 ms,这也是其所能达到的极限曝光时间。250 ms 的曝光时间无法捕捉到火焰的形状,不满足系统设计要求。为此设计了一种特殊的 CCD 驱动时序——两次帧转移驱动时序。

### 3 两次帧转移 CCD 时序驱动设计

两次帧转移驱动时序如图 2(a)所示,其中,I1、I2、I3 为帧转移时钟(三相),S1、S2、S3 为存储区垂直转移时钟,R1、R2、R3 为水平读出时钟。图 2 为两个成像周期、两次帧转移方法的具体工作过程。在每一个成像周期内进行两次帧转移,通过第一次帧转移,将成像区的电荷移动到存储区,不做水平读出,相当于清空了成像区的电荷。第二次帧转移,将成像区的电荷转移到存储区,并水平读出到外部电路,读出的图像即是在两次帧转移时间间隔内曝光的图像。通过调整两次帧转移的时间间隔即可控制 CCD 的曝光时间。图 2(b)是

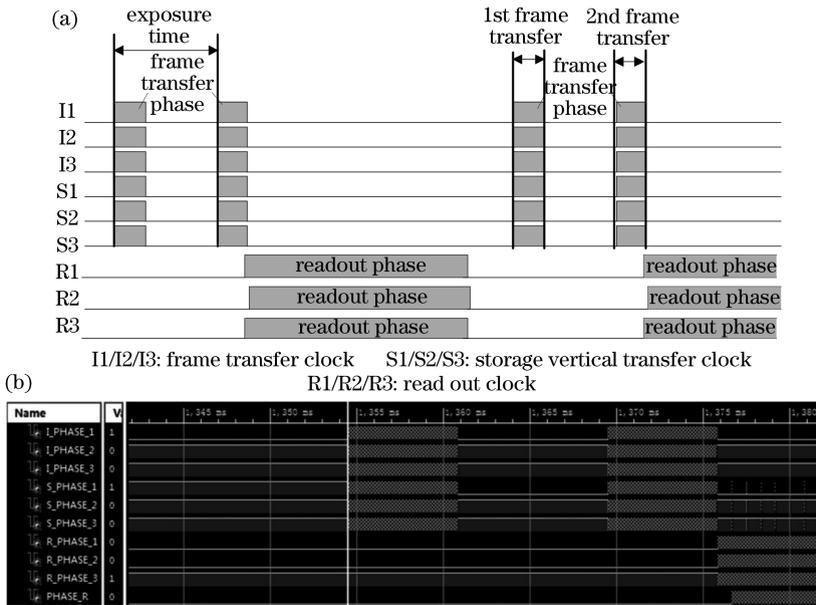


图 2 两次帧转移曝光形式时序图。(a)驱动时序;(b)软件仿真结果

Fig. 2 Timing sequence diagram of twice-frame-transfer exposure form. (a) Driven timing sequence; (b) software simulation result

两次帧转移曝光形式的 FPGA 时序仿真图。

上述过程可由图 3 进行演示。图 3 中对火焰进行曝光成像,而上一成像周期内残留在成像区的电荷(花的影像)是不需要的。在成像周期开始时,进行第一次帧转移,如图 3(a)所示。由于帧转移时钟和成像区的垂直转移时钟是同步进行的,因此在第一次帧转移结束后,原成像区的电荷被转移到存储区,同时原存储区的电荷被移空。图 3(b)即为第一次帧转移结束时的状态。接着等待一段时间,让成像区持续曝光,然后进行第二次帧转移,如图 3(c)所示。此时 CCD 的成像区是已经曝光完成的火焰的图像,存储区是第一次帧转移时留下的上一帧图像(花)。第二次帧转移将火焰图像和花朵图像同步向下移,花朵的图像将逐渐被清空,如图 3(d)所示。第二次帧转移完成后,存储区保存的即是按照指定时间进行曝光的火焰的图像,如图 3(e)所示。随即进入水平读出阶段。水平读出阶段的时序仿真图如图 4 所示。存储区的时钟将图像逐行移动到水平寄存器,水平读出时钟再将单行图像按单个像元读输出到 CCD 的输出电路。

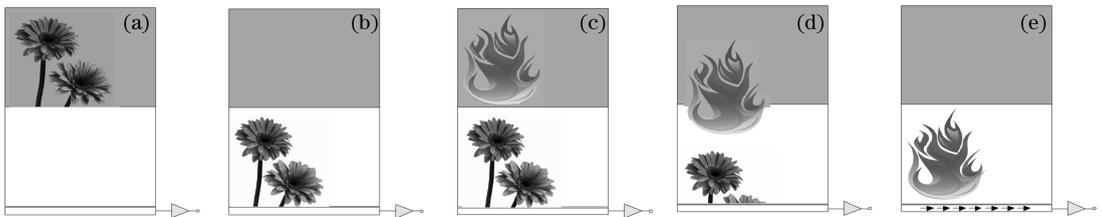


图 3 两次帧转移过程演示。(a)第一次帧转移开始;(b)曝光开始;(c)第二次帧转移开始;(d)帧转移;(e)水平读出

Fig. 3 Illustrations of twice-frame-transfer process. (a) 1st frame transfer begins; (b) exposure begins; (c) 2nd frame transfer begins; (d) frame transferring; (e) horizontal readout

#### 4 基于 CCD47-20 的紫外成像系统设计

紫外成像系统包括光学系统和电子学系统,光学系统包括前置紫外物镜、光阑、滤光片。滤光片的透过波段为 250~295 nm,透过率约为 80%。电子学系统包括 CCD 成像电路和上位软件,如图 5 所示。

火焰经由相机的前置物镜、紫外窄带滤光片,成像于 CCD 焦平面。CCD 成像电路将图像数据经由 USB 接口发送到上位机。上位机软件负责将接收到的图像数据实时显示并存盘。同时,上位机软件还负责发送 CCD 的曝光时间控制指令和拍照指令。

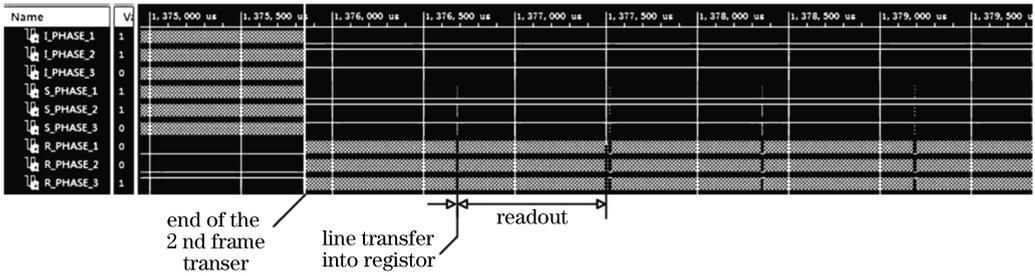


图 4 水平读出阶段的时序仿真图

Fig. 4 Timing sequence simulation diagram of horizontal readout phase

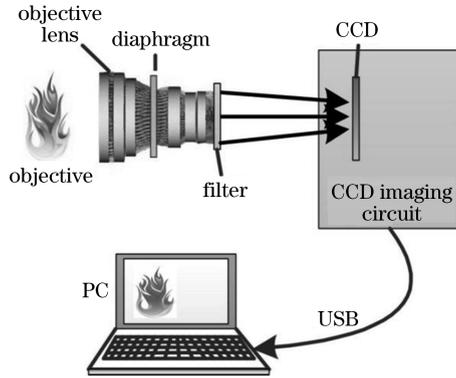


图 5 成像系统设计结构图

Fig. 5 Structure diagram of imaging system

成像系统的紫外物镜采用双高斯对称设计,视场角为 $\pm 5^\circ$ ,焦距为 73.8 mm。CCD 成像控制电路采用了 4 层印刷电路板(PCB)的设计。使用 Verilog 硬件描述语言完成了 CCD 驱动时序的编写。单片机(USB 控制器)程序使用 C 语言编写。上位机软件使用 C++ 语言编写完成。设备实物如图 6 所示。

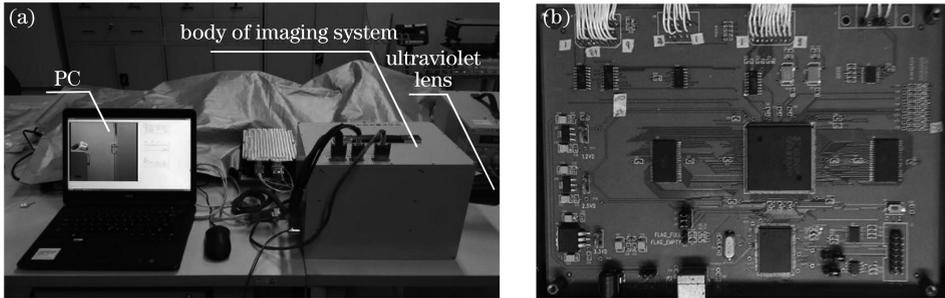


图 6 设备实物图。(a) 成像系统;(b)成像电路板

Fig. 6 Pictures of the devices. (a) Imaging system; (b) imaging circuit

## 5 实验结果及分析

### 5.1 两次帧转移驱动时序设计测试

为了验证两次帧转移驱动时序设计的正确性,调整 CCD 驱动时序中两次帧转移的时间间隔,获取不同的曝光时间,在不同曝光时间方式下对目标进行成像测试。

为了保证成像目标的照度稳定性,在实验室内以积分球作为光源对 CCD 进行了辐照测试。分别得到系统在不同曝光时间下的图像,计算每幅图像的平均像素值,并对其进行线性拟合,结果如图 7 所示。平均像素值与曝光时间呈现出非常好的线性关系。这说明两次帧转移方式的 CCD 驱动方式成功实现了对曝光时间的控制,证明了驱动设计的正确性,进而验证了两次帧转移时序方法实现 CCD47-20 曝光时间快至 10 ms 的正确性。

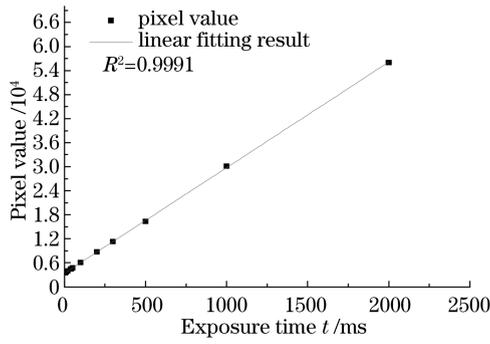


图 7 曝光时间与图像像素值的平均拟合结果

Fig. 7 Average fitting result of exposure time and image pixel value

分别采用不同的时序驱动方式,在不同的曝光时间下,对剧烈燃烧的火焰进行拍照,图 8 所示为图像对目标在 250~295 nm 紫外波段的成像结果。可见,采用两次帧转移驱动方式获取的 10 ms 曝光的图像更准确地捕捉到了火焰的形状。

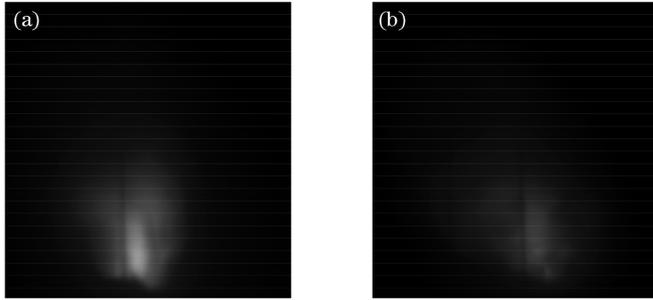


图 8 不同曝光时间下的火焰图像。(a) 10 ms;(b) 500 ms

Fig. 8 Flame images taken in different exposure time. (a) 10 ms; (b) 500 ms

### 5.2 信噪比测试

使用积分球进行信噪比测试。为保证紫外波段的光强,积分球光源选用高强度氙灯。为了保证 CCD 的工作温度,首先打开制冷机工作 10 min 以上。测试时调节积分球开口辐亮度强度,使 CCD 的光强值达到饱和光强的 80%。在 10 ms 曝光方式下拍摄 100 幅图像。选取一个像素点,计算其在 100 幅图像中像素值的平均值作为信号,均方差作为噪声,两者的比值为该点的信噪比,可得:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{100} D(i)}{100}, \quad (4)$$

$$N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{100} [D(i) - S]^2}{100}}, \quad (5)$$

$$R_{SN} = S/N, \quad (6)$$

式中  $D(i)$  表示该像素点在第  $i$  幅图像中的像素值,  $S$  表示信号值,  $N$  表示噪声值,  $R_{SN}$  表示信噪比。

选取 1024 个像素点,求取每个点的信噪比,结果如图 9 所示,求取其平均值作为系统的信噪比。计算得到 CCD 信号达到饱和光强的 80% 时,成像系统的信噪比为 46.8 dB。

### 5.3 外场实验

在外场,将紫外成像系统放置在距离目标 50 m 的位置,对某固体燃料的燃烧火焰进行成像。在对火焰进行成像前需要采集暗背景。成像系统选取 10 ms 曝光时间对固体燃料的燃烧火焰进行拍照,图像数据结果如图 10 所示,其中 DN 表示像元亮度值。成像系统获取的是二维像素值矩阵,像素值范围为 0~65535,如图 10(a)、(b)、(c) 所示。由于显示设备只能显示 8 位图像,图 10(d) 选取了像素值的高 8 位用于位图显示<sup>[20]</sup>。

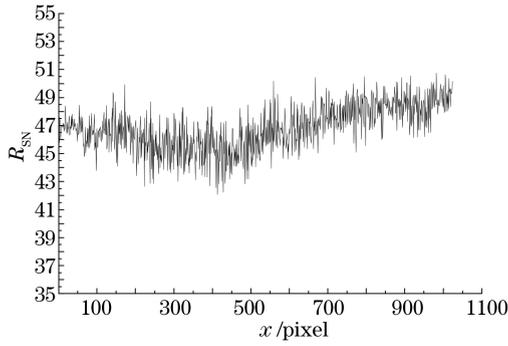


图 9 信噪比测试结果

Fig. 9 Test result of SNR

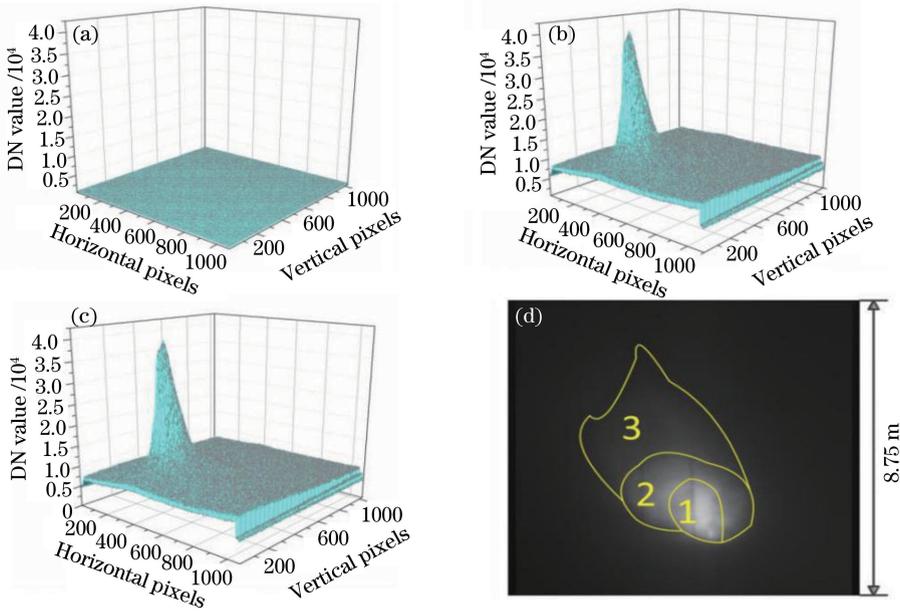


图 10 成像系统拍摄燃料燃烧火焰图像数据三维图和灰度图。(a)暗背景;(b)原始图像数据;  
(c)抠除了暗背景的图像数据;(d)抠除了暗背景的灰度图

Fig. 10 3D and grayscale images of solid fuel flame captured by imaging system. (a) Dark background;  
(b) original image data; (c) dark background-subtracted image data; (d) dark background-subtracted grayscale image

根据成像系统参数及成像距离,可由(7)式计算得到目标的大小为

$$K = 2L \tan \frac{\theta}{2}, \quad (7)$$

式中  $L$  为成像设备与目标的直线距离,  $\theta$  为视场角,  $K$  为目标高度。计算得到目标的高度  $K$  为 8.75 m。

由于成像系统中使用的是透过波段在 250~295 nm 的窄带滤光片,此波段处于“日盲区”<sup>[21]</sup>,即外场采集的紫外图像全部是由燃烧火焰发出的紫外光。不同成分的燃烧羽烟会发射不同波段的紫外光,如 OH 会发射 244~308 nm 波段的紫外光、NO 会发射 250~370 nm 的紫外光、O<sub>2</sub> 会发射 244~437 nm 的紫外光<sup>[22]</sup>。由图 10(d)中的图像可以看出,火焰在 1 号区域的亮度较强,2 号区域次之,3 号区域最弱。可以认为在 1 号区域的羽烟中,OH、NO 以及 O<sub>2</sub> 自由基浓度较高。以上只是对图像进行的简单的定性分析,更加系统的分析需要获得更多谱段的图像以及更加复杂的数据处理,这将是未来要展开的工作。

## 6 结 论

为了达到快速曝光和高信噪比成像的要求,选用了紫外敏感科学级 CCD(CCD47-20)作为光电探测器,提出了两次帧转移的 CCD 时序驱动方法。这种驱动时序可使系统的曝光时间缩短到 10 ms,同时这种方法

仍将 CCD 的所有像素慢速读出,未引入更多的读出噪声,从而保证了较高的信噪比。实验表明,通过调整两次帧转移的时间间隔,可以实现对曝光时间的控制,大幅提升了 CCD 曝光时间的调整范围。此外,快速曝光的实现,使得帧转移型科学级 CCD 可应用于快速运动目标的拍摄,扩展了其应用范围。经测试分析,该成像系统运行稳定、可靠,并在实际应用中得到验证。两次帧转移驱动时序设计方法具有一定的通用性,可在该类装置的设计中推广使用。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Hongchao, Liu Hongyuan, Wang Hengfei, *et al.* System gain calibration of CCD and evaluation of uncertainty [J]. *Acta Optics Sinica*, 2015, 35(s1): s112004.  
王洪超,刘红元,王恒飞,等. CCD 系统增益标定及不确定度评定[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s112004.
- [2] Yu Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al.* Screening and testing method for area CCD[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708001.  
余 达,周怀得,龙科慧,等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708001.
- [3] Chen Jianwu, Cao Kaiqin, Sun Dexin, *et al.* Driving techniques for high-frame-rate frame transfer CCDs with low smear[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 98-103.  
陈剑武,曹开钦,孙德新,等. 高帧频低拖尾帧转移 CCD 驱动技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 98-103.
- [4] Xu Xiuzhen, Li Zitian, Li Changle, *et al.* Design on driving generator based on CPLD technology for CCD camera with optional output[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(12): 1504-1507.  
许秀贞,李自田,李长乐,等. 基于 CPLD 的可选输出 CCD 驱动时序设计[J]. *光子学报*, 2004, 33(12): 1504-1507.
- [5] Jin Longxu, Li Guoning, Liu Yanyan. Design of driving circuit for frame transfer area CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 1140-1145.  
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.
- [6] Li B H, Qian S, Chun H, *et al.* Method to implement the CCD timing generator based on FPGA[C]. *SPIE*, 2010, 7742: 77421Y.
- [7] Ren Hang. Driver circuit system of 44M pixel high resolution large area CCD[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(5): 89-96.  
任 航. 44M 像素高分辨率大面阵 CCD 驱动电路系统[J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(5): 89-96.
- [8] Straverscimpoiasu A, Stoldt H, Klaassens W, *et al.* A high-speed high-sensitivity 1/2-inch 1M-pixel frame-transfer CCD imager for medical and industrial applications[C]. *Sensors and Camera Systems for Scientific and Industrial Applications VI*, 2005: 153-160.
- [9] Sun Zhenglei, Wang Xiaodong, Qu Hongfeng. Design for driving control of high frame rate area array CCD based on FPGA[J]. *Application of Integrated Circuits*, 2012, 38(7): 65-67.  
孙正磊,王晓东,曲洪丰. 基于 FPGA 的高帧频面阵 CCD 驱动控制设计[J]. *电子技术应用*, 2012, 38(7): 65-67.
- [10] Zhou J K, Chen X H, Wang Z, *et al.* Design and implementation of timing generator of frame transfer area-array CCD camera[C]. *SPIE*, 2007, 6833: 68332K.
- [11] Yan Feng, Yu Zijiang, Yu Xiao, *et al.* Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4): 709-713.  
闫 丰,于子江,于 晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 709-713.
- [12] Bai Xueping, Zheng Yu, Li Jin, *et al.* A frame transfer EMCCD image sensor with 512×512 pixels[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(4): 300-304.  
白雪平,郑 渝,李 金,等. 512×512 元帧转移 EMCCD 图像传感器[J]. *红外技术*, 2016, 38(4): 300-304.
- [13] 龚德铸,王艳宝,卢 欣. 基于星敏感器的 CCD47—20 航天应用[J]. *空间控制技术与应用*, 2006(6): 42-50.
- [14] Ran Xiaoqiang, Wen Desheng, Zheng Peiyun, *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.
- [15] Gan Y Q, Ge W, Qiao W D, *et al.* Design and application of TEC controller using in CCD camera[C]. *SPIE*, 2011, 8196: 81961E.
- [16] Dryer B, Smith P H, Nuns T, *et al.* Validation of NIEL for >1 MeV electrons in silicon using the CCD47-20[C].

- SPIE, 2016, 9915: 99151.
- [17] Wolf J, Röser H P. Testing the E2V CCD47-20 as the new sensor for the SOFIA target acquisition and tracking cameras[C]. SPIE, 2010, 7733: 773337.
- [18] Wang Yu, Lu Yihuai, Zhao Xin, *et al.* Design and implementation of CCD imaging circuit for satellite-borne DOAS spectrometer[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6): 663-668.  
王 煜, 陆亦怀, 赵 欣, 等. 星载差分吸收光谱仪 CCD 成像电路的设计及实施[J]. *激光与红外*, 2015, 45(6): 663-668.
- [19] Zhao Guangxing, Zhao Ya. Desing of linear CCD driving circuit with elctonic shutter based on CPLD[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2012, 29(2): 145-149.  
赵光兴, 赵 雅. 基于 CPLD 的带电子快门功能线阵 CCD 驱动电路设计[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 29(2): 145-149.
- [20] Huang Sijie, Liao Xingxing. A high dynamic range image acquisition method based on the multi-exposure imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(s1): s109007.  
黄思婕, 廖星星. 基于多次曝光的大动态范围图像获取方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s109007.
- [21] Wang Xi, Fang Xiaodong, Nie Jinsong. Military ultraviolet technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 58-61.  
王 玺, 方晓东, 聂劲松. 军用紫外技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 58-61.
- [22] Liu Xunchen, Li Yuyang, Zhou Zhongyue, *et al.* Applications on laser spectroscopy and mass spectrometry in combustion diagnostics[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(1): 43-54.  
刘训臣, 李玉阳, 周忠岳, 等. 光谱法和取样分析法在燃烧诊断研究中的应用[J]. *实验流体力学*, 2016, 30(1): 43-54.