

## 连续激光辐照 CMOS 相机的像素翻转效应及机理

盛良<sup>1,2</sup>, 张震<sup>2</sup>, 张检民<sup>2</sup>, 左浩毅<sup>1</sup>

(1. 四川大学物理科学与技术学院, 四川成都 610064;

2. 西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西西安 710024)

**摘要:** 为了研究激光对 CMOS 图像传感器的干扰效果, 利用 632.8 nm 连续激光开展了对 CMOS 相机的饱和干扰实验。随着入射激光功率的增加, 分别观察到未饱和、饱和、全屏饱和等现象, 并发现, 在全屏饱和前, 功率密度达到  $1.4 \text{ W/cm}^2$  后, 光斑强区中心区域出现了像素翻转效应。进一步加大光敏面激光功率密度到  $95.1 \text{ W/cm}^2$ , 激光作用停止后相机仍能正常成像, 证明像素翻转效应并非源自硬损伤。基于 CMOS 相机芯片的结构和数据采集处理过程进行了机理分析, 认为强光辐照产生的过量光生载流子使得光电二极管电容上原来充满的电荷被快速释放, 使得相关双采样中的两次采样所得信号  $V_{\text{reset}}$  与  $V_{\text{signal}}$  逐渐接近, 是输出像素翻转的一种可能原因。

**关键词:** 激光; 图像传感器; 辐照效应; CMOS; 像素翻转

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0606004

## Pixel upset effect and mechanism of CW laser irradiated CMOS camera

Sheng Liang<sup>1,2</sup>, Zhang Zhen<sup>2</sup>, Zhang Jianmin<sup>2</sup>, Zuo Haoyi<sup>1</sup>

(1. College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** To study the jamming effects of laser on CMOS image sensor, jamming experiments with 632.8 nm CW laser were conducted. With the increasing of laser power, the phenomenon of instauration, saturation and full screen saturation were observed. Pixel upset effect in the maximum laser intensity site of the irradiated CMOS sensor was discovered when the intensity was greater than  $1.4 \text{ W/cm}^2$  and the full screen saturation had not appeared at this time. Even the laser intensity at the photosensitive surface was up to  $95.1 \text{ W/cm}^2$ , the camera could still image normally when the laser irradiation was terminated. It indicated that the pixel upset effect was not caused by laser damage. Analysis based on the device structure, signal detection and processing of the sensor chip was then carried out. It shows that one possible reason is that the two measurements of pixel output voltage ( $V_{\text{signal}}$  and  $V_{\text{reset}}$ ) are gradually approaching to each other for the electric charges of photodiode capacitance will be quickly reduced by excessive photo-carriers, and the  $V_{\text{reset}}$  will be subtracted from  $V_{\text{signal}}$  in correlated double sampling.

**Key words:** laser; image sensor; irradiation effect; CMOS; pixel upset

收稿日期: 2015-10-01; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 西北核技术研究所预研项目 (12111502, SKLIIM1401Z)

作者简介: 盛良 (1982-), 男, 工程师, 硕士生, 主要从事激光光学方面的研究。Email: shengliang11@nint.ac.cn

导师简介: 左浩毅 (1978-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光光谱学方面的研究。Email: zuohaoyi@scu.edu.cn

## 0 引言

互补金属氧化物半导体图像传感器(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Image Sensor, CIS)具有功耗低、集成度高、成本低等特点,是电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)之外的另一类常见成像器件。随着大规模集成电路技术的进步, CIS 的噪声抑制水平不断提高,成像质量越来越好,已在安防监控、生物识别、探测成像甚至军事侦察等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>,并在部分领域逐步开始替代 CCD。与 CCD 图像传感器类似, CIS 亦容易受到外界强光的干扰与破坏,其激光辐照效应对光电对抗和器件抗激光加固而言具有重要意义。已有学者针对 CIS 开展了激光干扰效应研究<sup>[3-6]</sup>,其中干扰效应研究以实验测量获取器件的干扰阈值为主,实验观察到了 CIS 在连续和脉冲激光辐照下的未饱和、饱和和过饱和现象,但全屏饱和现象以及过饱和现象中的像素翻转尚未见报道。张震等对 CCD 的过饱和现象进行了实验研究并进行了机理分析<sup>[7-8]</sup>。

文中以典型前照式 CMOS 相机为研究对象开展 632.8 nm 连续激光干扰效应研究,发现了相机存在像素翻转效应,即光斑强区覆盖像素在灰度饱和后的输出值逐渐变小,最终稳定于一个固定小值,在图像上呈现为亮区中逐渐变大的暗斑;从 CMOS 器件工作原理和信号检测提取方式等角度对像素翻转效应的形成机理进行了分析。

## 1 实验装置与方法

实验所用激光光源为 He-Ne 连续激光,发散角为 1.06 mrad,出光稳定。实验样品为 JHSM 36 Bf 型可见光面阵黑白 CMOS 相机,其成像芯片为 Micron MT9V032,分辨率为 752×480,像素尺寸为 6.0 μm×6.0 μm。实验光路示意图如图 1 所示。

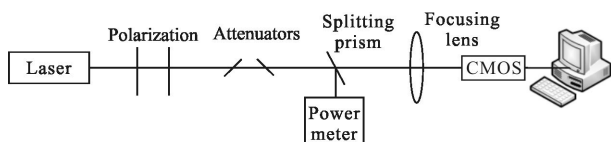


图 1 实验布局示意图

Fig.1 Experimental setup

起偏器和检偏器与中性密度衰减片相结合调节

入射激光功率。分光镜把激光按比例一分为二,一路辐照 CMOS 相机,一路进入激光功率计。激光功率计用来测量 CMOS 镜头后的初始功率,并在实验过程中提供实时监测。变焦镜头将激光聚焦到 CMOS 相机光敏面上。调整激光束与 CMOS 相机光轴对准,利用 CMOS 相机自带的图像采集软件实时显示记录 CMOS 输出的图像,通过读取图像灰度值判断入射到 CMOS 的激光是否使 CMOS 饱和。实验中选取固定的相机增益与积分时间,首先将激光衰减到使 CMOS 处于线性工作区功率范围,然后逐渐减小衰减直至相机出现局部饱和、全屏饱和以及其他效应现象。相机光敏面处激光光斑以近高斯分布方式处理,选取灰度值大于等于 35 为有效计算区域。

## 2 实验结果

实验中入射到 CMOS 相机光敏面上的激光功率密度变化范围为 [0, 95.1] W/cm<sup>2</sup>,相机积分时间为 25 ms,采集的典型图像见图 2。图 2(a)~(d) 对应的激光功率密度分别为 1.58×10<sup>-5</sup> W/cm<sup>2</sup>、0.110 W/cm<sup>2</sup>、4.10 W/cm<sup>2</sup> 和 24.3 W/cm<sup>2</sup>。从图 2 可以看出:随着入射激光功率的逐渐增加, JHSM 36 Bf CMOS 相机饱和区域不断扩大,最终达到全屏饱和。在全屏饱和前,光斑光强最大区域出现形如暗斑的像素翻转现象(类似于 CCD 在达到全屏饱和前出现暗线现象),暗斑随着入射激光功率的增加逐渐扩大。

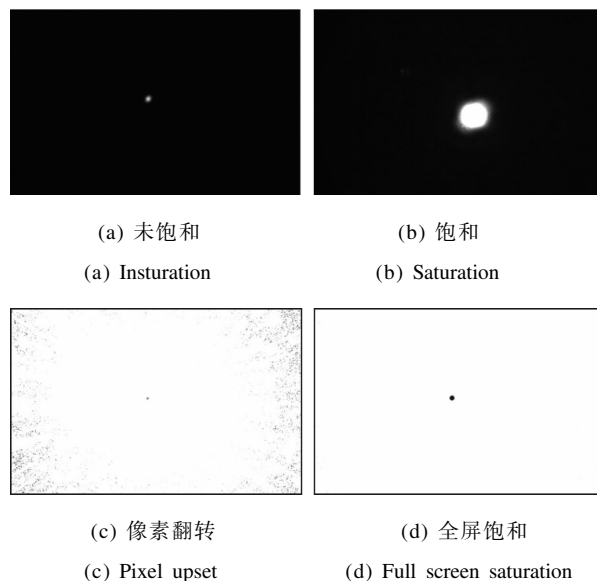


图 2 典型实验现象

Fig.2 Typical experimental phenomenon

为分析翻转现象变化情况, 选取激光光斑中心区域出现翻转现象的某一像素, 用 MATLAB 读取灰度值, 翻转现象出现前后的同一像素灰度值随功率密度变化曲线如图 3 所示, 可见, 达到饱和后, 像素灰度值随着激光强度增加近似呈线性下降趋势, 最终稳定于固定值 19。

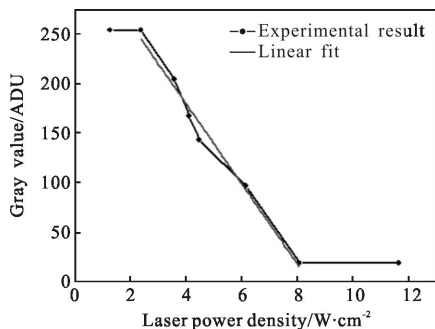


图 3 翻转像素灰度随功率密度的变化曲线

Fig.3 Changing curves of the upset pixel vs laser power density

### 3 像素翻转机理分析

#### 3.1 CIS 工作原理

像素以 Gene Weckler 提出的电荷积分电压模式<sup>[9]</sup>工作, 入射光子首先转化为光电流, 光电流在电容上积分之后以电压方式读出。图 4 为电荷积分电压模式工作原理示意图, 其中  $C_d$  是光电二极管的等效电容,  $D$  表示光电二极管,  $I_{ph}$  表示光电流,  $I_{dark}$  表示暗电流, Reset 表示复位开关,  $V_{DD}$  表示电源电压。CMOS 器件的读出电路是模拟电路中的电荷-电压电路, 输出电压信号正比于电容上的剩余电荷量。

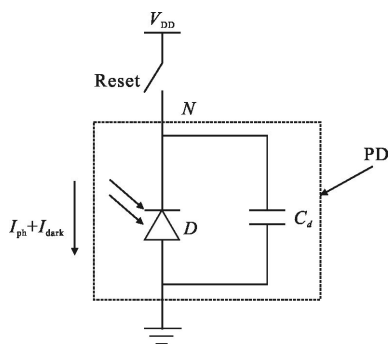


图 4 电荷积分电压工作模式图

Fig.4 Charge integration voltage working mode

为消除由复位管和电压跟随器产生的固定模式噪声, 目前, 在 CMOS 芯片读出电路中普遍采用相

关双采样技术(Correlated Double Sample, CDS), 典型电路结构如图 5 所示。CDS 指的是先对复位后的电压进行第一次采样, 得到复位电压  $V_{reset}$ ; 对像素积分后的电压进行第二次采样, 得到  $V_{signal}$ , 通过差分放大电路将两次采样的信号相减, 得到像素的有效输出电压信号。

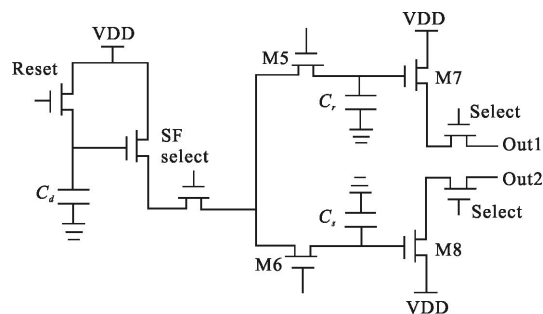


图 5 典型 CDS 电路结构图

Fig.5 Structure graph of typical CDS circuit

#### 3.2 效应机理分析

基于相机芯片的结构和数据采集处理过程对像素翻转现象进行原因分析。芯片电压信号处理过程如下: 通过相关双采样 (Correlated Doubling Sampling, CDS) 采集的像素输出电压  $V_{op} = V_{reset} - V_{signal}$  与偏差校正电压之和乘以增益后, 经 AD 转换得到 AD 输出。对 MT9V032 型传感器而言, AD 输出减去暗列均值并加上噪声常数后得到最终的像素输出。图 6 为图像传感器的电荷积分与 CDS 采样时序, 其中 RST 为复位脉冲, 高电平时晶体管将光电二极管复位, 低电平时进行电荷积分; SH1 和 SH2 为采样脉冲, 高电平时进行采样。

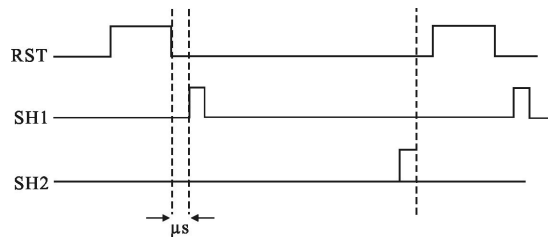


图 6 采样时序示意图

Fig.6 Schematic of sampling timing

因采样时间极短, 约为微秒量级, 弱光作用下  $V_{reset}$  为可以忽略的量, 像素未饱和时, 随着入射光强不断增强,  $V_{signal}$  逐渐减小,  $V_{op} = V_{reset} - V_{signal}$  逐渐增大, 表现为线性响应。偏置电压恒定, 即  $V_{reset}$  在弱光下为

定值,当激光继续增强, $V_{op}$ 不再增加,像素出现饱和。当入射激光功率密度达到  $W/cm^2$  量级,虽然采样时间很短,但光生载流子的产生时间为皮秒量级,产生的大量光生载流子将使得光电二极管电容  $C_d$  上原来充满的电荷  $Q_s$  快速减少,激光对  $V_{reset}$  的影响不可忽略。随着入射激光光强增大, $V_{reset}$  逐渐减小,而  $V_{signal}$  保持不变,导致  $V_{op}$  逐渐减小,芯片输出灰度值开始下降,在图像上表现为光斑光强最大区域内出现形如暗斑的像素翻转现象。激光更强时,瞬间形成的大量光生载流子使得 SH1 的采样脉冲时间内  $V_{reset}$  已经下降到最小值,且与  $V_{signal}$  相等,此时  $V_{op}=0$ ,但像素输出前经过了偏置修正、暗元修正和噪声修正,使得最终的图像中表现为一个较小的灰度定值。辐照激光呈高斯分布,峰值更高时,传感器受影响的区域变大,图像表现为暗斑逐渐扩张。上述分析可见, $V_{reset}$  应与入射光强成反比,这与图 3 所描述的像素开始翻转后呈线性下降的实验规律一致。

由于实验条件所限,不能够完成相关的微观电子学测量分析(如:单像元小信号电压的直接测量);另外读出环节电路、势阱特性等可能会导致 CMOS 出现像素翻转的因素暂时也无法通过实验验证,缺少相应的实验数据,因此,CDS 是导致 CMOS 出现像素翻转的一种可能机理。

## 4 结 论

通过开展 632.8 nm 连续激光辐照典型 CMOS 相机实验研究,认识了 CMOS 相机受 632.8 nm 连续激光干扰效应规律。获得了 CMOS 相机未饱和、饱和、全屏饱和等各个阶段的输出图像及对应的激光功率密度,发现了 CMOS 相机在全屏饱和前光斑光强最大区域出现形如暗斑的像素翻转现象。基于相机芯片的结构和数据采集处理过程,分析了像素翻转效应的内在机理,认为当入射激光功率密度达到  $W/cm^2$  量级,激光对复位后采样电压的影响不可忽略,随着入射激光光强增大,复位后采样电压逐渐减

小,积分信号电压保持不变,导致光电二极管的 CDS 采样信号逐渐减小,最终两次采样电压相等,使得 CMOS 光斑光强最大区域出现灰度值恒定的暗斑。提高辐照激光功率密度至  $95.1 W/cm^2$ ,辐照停止后 CMOS 相机仍能正常成像,证明像素翻转效应属于激光干扰效应的一种。

## 参考文献:

- [1] Bigas M, Cabruja E, Forest J, et al. Review of CMOS image sensors[J]. *Microelectronics Journal*, 2006, 37(5): 433-451.
- [2] Li Jijun, Du Yungang, Zhang Lihua, et al. Research progress on CMOS image sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 4: 45-52. (in Chinese)
- [3] Shao Ming, Zhang Leilei, Zhao Wei, et al. Experiment study on saturation effect of high-repetition-rate laser jamming CMOS camera[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(6): 16-17. (in Chinese)
- [4] Shao Ming, Zhang Le, Zhang Leilei, et al. Comparative study on saturation effect of 1.06  $\mu m$  laser jamming CCD and CMOS cameras[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 163-167. (in Chinese)
- [5] Chang Guolong. Study on the light saturation effect of the CMOS image sensor [J]. *Fujian Analysis & Testing*, 2011, 20(3): 60-62. (in Chinese)
- [6] Zhu Chen, Li Yao, Wang Xiongfei, et al. Experiment study of interference of super-continuum light source on CMOS photodetectors[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(4): 374-377. (in Chinese)
- [7] Zhang Zhen, Cheng Xiang' ai, Jiang Zongfu. Excessive saturation effect of visible light CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(6): 917-920. (in Chinese)
- [8] Zhang Zhen, Cheng Xiang' ai, Jiang Zongfu. Mechanism analysis of CCD excessive saturation effect induced by intense light [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 233-237. (in Chinese)
- [9] Li Xiaolei. The research on readout circuit of active pixel CMOS image sensor[D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)