

# 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究

邱冬冬<sup>1,2</sup> 张震<sup>1</sup> 王睿<sup>1</sup> 江天<sup>1</sup> 程湘爱<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)  
(<sup>2</sup>中国卫星海上测控部远望二号测量船, 江苏江阴 214431)

**摘要** 针对脉冲激光辐照 CCD 造成其输出图像出现不可恢复的白色亮线和全场黑屏的破坏现象, 通过测量驱动电极与衬底之间的阻值, 观察光斑区域不同分层的破坏形貌和检测输出波形等方法, 研究了 CCD 的破坏机理。研究表明: 高能量的脉冲激光造成了 CCD 各分层不同程度的熔融烧蚀, 使暗电流和漏电流大幅增加, 导致了 CCD 的破坏。

**关键词** 脉冲激光; CCD 成像器件; 破坏机理; 白色亮线; 黑屏

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214006

## Mechanism Research of Pulsed-Laser Induced Damage to CCD Imaging Devices

Qiu Dongdong<sup>1,2</sup> Zhang Zhen<sup>1</sup> Wang Rui<sup>1</sup> Jiang Tian<sup>1</sup> Cheng Xiang'ai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup> Surveying ship Yuanwang 2, Chinese Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China

**Abstract** Aiming at the phenomenon that irreversible bright line and all-field blank screen happens in the CCD irradiated by pulsed laser, the resistance between driving electrodes and substrate is measured, damage micro-morphological image of different layers in the facular area is observed, exported waveforms are detected, and the damage mechanisms for CCD are analyzed in detail. The results show that high power pulse laser induces the ablation at different layers of CCD, and increases the dark current and leakage current, which leads the failure of the device.

**Key words** pulsed laser; CCD imaging device; damage mechanisms; bright line; blank screen

**OCIS codes** 140.3538; 140.3330; 040.1520

## 1 引言

CCD 可将景物通过空域逐点光电转换的方式以电荷包的形式储存, 借助必要的光学系统、外围时序驱动和信号处理电路, 完成采集信号的传输和输出。CCD 作为一种新型的成像器件, 具有尺寸小、重量轻、功耗低、灵敏度高、光谱响应宽和动态范围大等优点, 广泛应用于摄像、监控和图像处理等领域。然而, 以 CCD 芯片为核心的光电成像系统, 很

容易受到激光的干扰和破坏以致不能正常工作, 因此, 开展激光对 CCD 的破坏机理研究对丰富激光与物质相互作用机理数据库和改善 CCD 的抗激光加固措施具有很重要的理论和实际意义。

自从 20 世纪 70 年代起, 国外就开始了光电探测器的辐照效应进行研究<sup>[1,2]</sup>, 但是公开报道的关于 CCD 的相关研究主要集中于高能粒子辐照 CCD 方面, 是基于搭载在航天器上的 CCD 成像器

**收稿日期**: 2010-05-24; **收到修改稿日期**: 2010-06-24

**作者简介**: 邱冬冬(1985—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事激光与物质的相互作用等方面的研究。

E-mail: qidooo@163.com

**导师简介**: 程湘爱(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质的相互作用等方面的研究。

E-mail: xiang\_ai\_cheng@126.com

件工作在 高能粒子密度大的外太空的实验研究<sup>[3~5]</sup>。国内也开展了大量的相关研究<sup>[6~11]</sup>, 主要工作是测量了 CCD 在不同波长的连续或脉冲激光辐照下的饱和与破坏阈值, 但是对 CCD 的损伤或破坏机理的研究不够深入。本文针对脉冲激光辐照 CCD 造成 CCD 出现不可恢复的白色亮线和全场黑屏的破坏现象, 通过测量 CCD 的电阻特性和输出波形, 结合分析 CCD 损伤处各层的微观形貌, 研究了 CCD 的破坏机理。

## 2 破坏现象及机理分析

实验采用波长 532 nm、脉宽 10.8 ps、重复频率 500 Hz 的激光, 以索尼公司的 ICX405AL 四相驱动黑白 CCD 芯片为研究对象。这种 CCD 是典型的行间转移型面阵 CCD(IT-CCD), 总像素数为 537 pixel(水平)×597 pixel(垂直), 有效像素数为 500 pixel(水平)×582 pixel(垂直)。在每一行的有效像素之外, 右侧有 30 个完全避免光进入的光学黑体像素, 此处的信号当做图像信号的黑体标准, 左侧有 7 个暗电流成分较少的空中传输信号像素, 用来当作观察像素信号含有暗电流大小的基准<sup>[12]</sup>。

行间转移方式型 CCD 的像素主要由光电二极管和垂直 CCD 组成, 前者负责光电转换与电荷储存, 后者负责电荷的转移。遮光金属钨用来防止光进入垂直 CCD, 多晶硅为垂直 CCD 的四相驱动电极。为了提高入射光的利用率, 目前商品化的 CCD 图像传感器, 在像素上面放置了一层微镜头结构, 将

入射至摄影面的光集中到光电二极管。光电二极管和垂直 CCD 都采用埋沟式结构, 表面采用一层全耗尽的掺杂层, 光生电荷离开表面减少了表面复合, 这种结构具有较高的转换效率与较低的暗电流。CCD 的像素构造如图 1 所示。

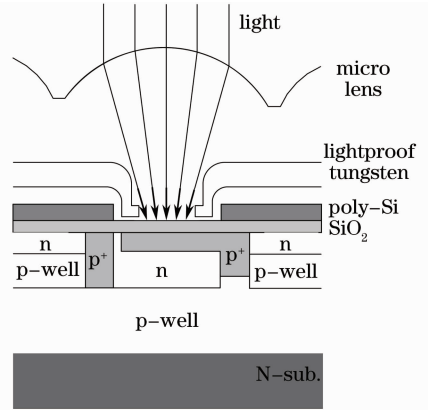


图 1 像素截面构造

Fig.1 Cross section of a pixel

### 2.1 破坏现象

激光经扩束, 使光斑覆盖 CCD 的镜头, 用电子快门控制进入 CCD 镜头的激光脉冲数为 5 个。当 CCD 镜头前激光的单脉冲能量密度为  $3 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  时, CCD 的输出图像沿光斑处的时钟线方向出现无法正常成像的白色亮线, 激光停照后无法恢复; 当镜头前激光的单脉冲能量密度升至  $5 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  时, CCD 的输出图像变为全屏黑色, 激光停照后无法恢复, CCD 完全失效。两种破坏现象具有很好的可重复性。无论有没有入射光, 两种破坏现象均存在, 输出图像如图 2 所示。



图 2 破坏 CCD 的输出图像。(a)不可恢复白色亮线,(b)失效 CCD 输出图像

Fig.2 Images exported by damaged CCD. (a) irreversible bright line, (b) image exported by deactivated CCD

### 2.2 破坏机理分析

测量已破坏 CCD 与正常 CCD 的垂直驱动电极  $V_{\phi 1} \sim V_{\phi 4}$  与衬底间的电阻, 三者的对比如表 1 所示。与正常的 CCD 相比, 出现不可恢复白色亮线的 CCD 的电阻值有了一定程度的降低, 失效 CCD 的各项阻值均有 3 个数量级的下降。

图 3、图 4 是使用显微镜拍摄的两种破坏类型的 CCD 破坏区域不同层面的微观形貌。由图 3(a) 和 4(a) 可以看出, 光斑处光电二极管已经被烧蚀, 透明的二氧化硅层由于吸收少量激光能量的同时受到光电二极管处 p-n 结的传导热, 也已经被部分破坏。部分被加热的  $\text{SiO}_2$  层退氧化为导电的多晶硅

从而绝缘度降低,而由图 1 可知,  $\text{SiO}_2$  层同时跟垂直 CCD 的多晶硅驱动电极相连,这也解释了垂直 CCD 驱动电极与衬底间电阻的降低。由图 4 可知,失效 CCD 的遮光钨已经被部分烧蚀穿透,遮光钨下面的垂直 CCD 已经被激光烧蚀至衬底层,多晶硅电极与衬底发生短路,从而驱动电极与衬底的电阻值大幅降低。已破坏 CCD 的驱动电极与衬底之间的电阻值发生了不同程度的降低,造成了漏电流增加,并引起破坏区域附近的电势分布改变和势阱降低。

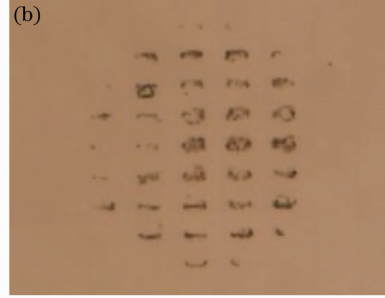


图 3 白色亮线破坏的 CCD 不同层损伤的微观形貌。(a)遮光钨,(b)衬底

Fig. 3 Damage micromorphological image of different layers in damaged CCD. (a) shaded tungsten, (b) substrate

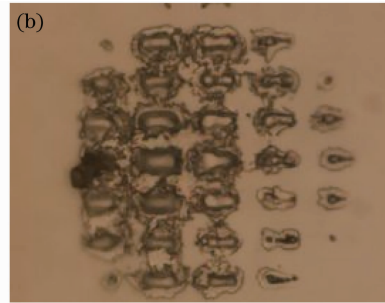
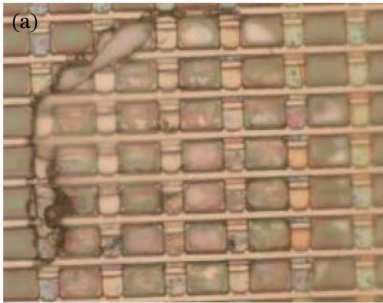


图 4 失效 CCD 不同层损伤的微观形貌。(a)遮光钨,(b)衬底

Fig. 4 Damage micro-morphological image of different layers in deactivated CCD. (a) shaded tungsten, (b) substrate

图 3(b)和 4(b)显示了激光能量已经把衬底层烧蚀,激光破坏光电二极管的掺杂硅层引入了大量缺陷,这些缺陷作为杂质中心,活跃的电子更容易从价带自由激发至其杂质能级或从杂质能级自由激发至价带而无需光照,从而造成光电二极管的暗电流产生。还有一部分暗电流由界面态所引起(包括  $\text{Si-SiO}_2$  界面态中的未钝化悬空键),激光辐照产生的界面态和足够强的激光能量破坏键位使得  $\text{Si-SiO}_2$  界面的暗电流生成<sup>[13]</sup>。

激光把 CCD 的不同分层烧蚀破坏产生漏电流和暗电流,为了研究二者使 CCD 的输出图像变得异常的机理,把示波器接到 CCD 芯片的输出端口,测量 CCD 在输出图像全黑情况下的输出波形,与 CCD 出现暂时性黑屏时和全场饱和也即输出图像为全白时的输出波形对比,结果如图 5 所示。

表 1 已破坏 CCD 和正常 CCD 的驱动电极与衬底间的阻值对比

Table 1 Resistance between driving electrodes and substrate of damaged CCD compared with that of normal CCD

Electrode	Normal CCD /M $\Omega$	Bright line CCD /M $\Omega$	Deactivated CCD /k $\Omega$
$R_{Vg1-SUB}$	226.4	205.4	158.4
$R_{Vg2-SUB}$	395.4	360.4	158.4
$R_{Vg3-SUB}$	227	204.4	174
$R_{Vg4-SUB}$	395.8	359.8	164

由图 5 可以看出,暂时性黑屏和失效时 CCD 的输出波形相同。黑屏与白屏的输出波形差别为黑屏比白屏多一些饱和像素,是每行像素两端的光学黑体像素和空中传输信号像素。由于激光的能量高且集中,其在光电二极管内产生的光生电荷量将会超过光电二极管的存储容量,超出容量的部分将会直接溢出至垂直 CCD 中而不必经过读出转移动作,溢出的这部分电荷被称作溢出电荷包<sup>[14]</sup>。如果溢出电荷包超出了垂直 CCD 的势阱存储电荷量,超出的部分将结合着垂直转移动作向时钟线方向的垂直 CCD 转移,使之全部饱和。从而造成 CCD 光斑处时钟线方向出现白色亮线。如果垂直 CCD 全部饱和后仍有溢出电荷包存在,在电荷由垂直 CCD 转移到水平 CCD 时将有溢出电荷包随着扩散到水平 CCD,从而导致对相邻水平 CCD 的串扰饱和。当激

光脉冲能量增加到一定程度,大量的溢出电荷将使水平 CCD 全部饱和,进而每一行像素的读出都为饱和信号,最终造成 CCD 读出的全场饱和,此时输出图像为全白。此时若继续增加激光脉冲能量,使得溢出电荷包扩散到光学黑体像素转移至水平

CCD 中的部分并使其饱和,光学黑体无法正常表现出黑电平基准信号,而把饱和信号当做黑电平基准。此时有效像素的读出都为饱和信号,因此输出图像为全黑。

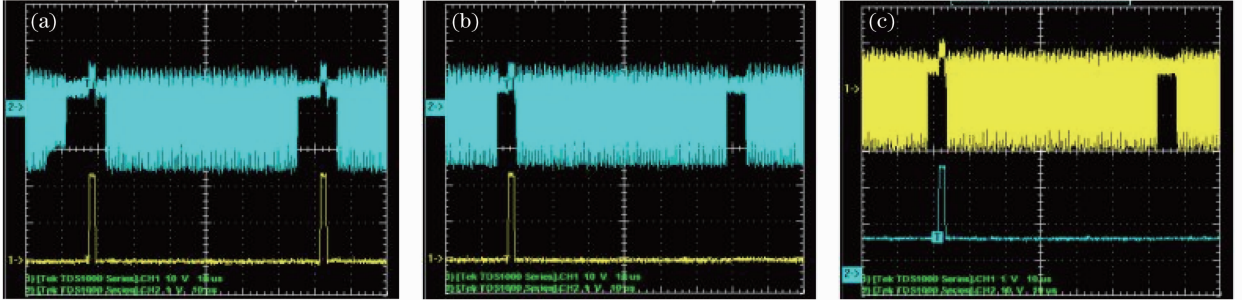


图 5 不同破坏类型 CCD 的输出波形。(a)全屏饱和 CCD,(b)暂时性黑屏 CCD,(c)失效 CCD

Fig. 5 Image and waveforms exported by CCD that with different damage types. (a) saturated CCD, (b) CCD under temporary blank screen, (c) deactivated CCD

漏电流和暗电流形成的大量溢出电荷与高能激光造成的溢出电荷包效果相同。激光对 CCD 造成的两种破坏现象的差别是:光斑处时钟线方向的水平 CCD 饱和输出,和光学黑体像素时钟线方向的水平 CCD 饱和输出,也就是 CCD 完全失效时的溢出电荷要远远多于 CCD 出现不可恢复白色亮线时的溢出电荷。两种现象在破坏形貌上的差别是:与不可恢复白色亮线的破坏相比,CCD 完全失效时激光已经把遮光钨层烧蚀穿透,其下的多晶硅电极与衬底层短路,即是漏电流大幅增加。由此判断多晶硅电极与衬底之间短路造成漏电流的大幅度增加导致了 CCD 的完全失效。只要 CCD 处在工作状态,无论有没有入射光,漏电流和暗电流就会存在,破坏现象也就一直存在,无法恢复。

时,大量的溢出电荷使得光学黑体像素变为饱和输出,导致黑电平基准变化,从而 CCD 的输出图像变为全黑,完全失效。

### 参 考 文 献

- 1 Bartoil F. J., Esterowitz L., Krueer M. R. *et al.*. Thermal recovery processes in laser irradiated HgCdTe(PC) detectors[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(10): 2499~2507
- 2 Bartoil F. J., Esterowitz L., Allen R. *et al.*. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. *Appl. Phys.*, 1976, **47**(10): 2875~2881
- 3 Janesick J., Elliott T., Pool F.. Radiation damage in scientific charge-coupled devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1989, **36**(1): 572~578
- 4 Meidinger N., Schmalhofer B., Struder L.. Alpha particle, proton and X-ray damage in fully depleted PN-junction CCD detectors for X-ray imaging and spectroscopy [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(6): 2849~2856
- 5 Stefanov K. D., Tsukamoto T., Miyamoto A. *et al.*. Electron and neutron radiation damage effects on a two-phase CCD[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, **47**(3): 1280~1291
- 6 Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing *et al.*. Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(10): 1449~1454  
沈洪斌,沈学举,周兵等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(10): 1449~1454
- 7 Jiang Jijun, Luo Fu, Chen Jianguo. Research on femtosecond laser induced damage to CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 515~517  
江继军,罗福,陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 515~517
- 8 Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(17): 1783~1786  
郭少锋,程湘爱,傅喜泉等. 高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(17): 1783~1786
- 9 Zhu Xiangping, Zhao Baosheng, Liu Yong'an *et al.*

### 3 结 论

通过测量多晶硅驱动电极与衬底之间的电阻值、观察 CCD 不同分层的破坏形貌和程度以及检测其输出波形的的方法,本文分析了造成 CCD 两种类型破坏的机理。研究发现,CCD 产生破坏的原因可以归结为:激光烧蚀各分层,造成衬底大量缺陷的引入、Si-SiO<sub>2</sub> 界面态的生成导致暗电流的生成,驱动电极与衬底间阻值的降低甚至短路,致使漏电流的产生。暗电流和漏电流的大量电荷使得没有被光照射的像素发生饱和,从而成像异常。随着激光能量增加,两种因素产生的电荷会有不同程度的增加,造成破坏程度的加深。当激光把遮光钨层烧蚀穿透并把多晶硅电极和二氧化硅层烧蚀而与衬底层短路

- Experimental study on 30.4 nm extreme ultraviolet imaging detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1925~1929  
朱香平, 赵宝升, 刘永安等. 30.4 nm 极紫外成像探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1925~1929
- 10 Bu Lingbing, Shan Kunling, Huang Xingyou. Studies on probe of cloud droplet[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 216~218  
卜令兵, 单坤玲, 黄兴友. 云粒子探测器研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 216~218
- 11 Li Li, Lu Qisheng. Numerical simulation of dynamic response of PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1952~1958  
李莉, 陆启生. 光导型 HgCdTe 光电探测器对双波段组合激光辐照动态响应的数值模拟[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1952~1958
- 12 Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS Image Sensor No Kiso to Ouyou [M]. Chen Rongting, Peng Meigui tranl., Beijing: Science Press, 1980, 113~114  
米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 陈榕庭, 彭美桂译., 北京: 科学出版社, 2006, 113~114
- 13 Li F. M., Nixon O., Nathan A.. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, **51**(12): 2229~2236
- 14 Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai, Jiang Zongfu. Investigation into the dynamical subordinate facula in the video of the CCD irradiated by high repetition pulses laser [J]. *Applied Laser*, 2010, **30**(1): 1~5  
张震, 程湘爱, 姜宗福. 高重频脉冲激光引起 CCD 视频中的动态次光斑现象研究[J]. *应用激光*, 2010, **30**(1): 1~5