

FT-CCD 的纳秒脉冲激光毁伤效应

张震,徐作冬,程德艳,师宇斌,张检民

(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: 用 1 064 nm 波长 8 ns 脉宽激光,以 1-on-1 模式辐照在评估板驱动工作下的 FT50M 型 FT-CCD 图像传感器进行实验。结果显示,随着脉冲能量密度的逐渐提高,在 FT-CCD 输出图像中依次出现辐照点单侧黑线、白点、两侧白线等典型毁伤现象。这区别于 IT-CCD 在脉冲激光辐照下依次出现白点、白线的毁伤过程。通过对比 FT-CCD 与 IT-CCD 的结构异同,结合已知的 IT-CCD 的毁伤机制,分析认为单侧黑线毁伤现象的首先出现表明了 FT-CCD 多晶硅电极先于硅衬底受损的激光毁伤模式。文中丰富了对 CCD 图像传感器激光毁伤效应的认识,为深入探索 CCD 激光毁伤机制提供了新的线索。

关键词: FT-CCD; 脉冲激光; 毁伤效应; 单侧黑线

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1003001

Effect of FT-CCD damaged by nanosecond pulse laser

Zhang Zhen, Xu Zuodong, Chen Deyan, Shi Yubin, Zhang Jianmin

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

Abstract: By the way of 1-on-1, the FT50M FT-CCD working on the evaluation kit is irradiated by the 1 064 nm pulse laser with 8 ns pulse width. The experiment shows that, along with the increase of laser pulse energy density, the damage phenomena of unilateral black line, white spot and bilateral white line from the position irradiated by laser successively appear in the output image of FT-CCD. This process distinguishes obviously from the IT-CCD, which presents successively the white spot and bilateral white line in the similar experiments. Comparing the structures of FT-CCD and IT-CCD, and combing the damage mechanism of IT-CCD, it is thought that the first occurrence of unilateral black line damage phenomenon indicate a FT-CCD damage mode of the poly-silicon electrode being damaged earlier than the Si substrate. This study enriches the knowledge of laser damaging CCD image sensor, and provides a new clue for deep searching the mechanism of laser damage CCD.

Key words: FT-CCD; pulse laser; damage effect; unilateral black line

收稿日期:2017-08-31; 修订日期:2017-09-25

基金项目:国家自然科学基金(11405132)

作者简介:张震(1981-),男,副研究员,博士,主要从事光电器件与系统激光辐照效应方面的研究。Email:zhangzhen11@nint.ac.cn

0 引言

CCD 图像传感器激光毁伤效应研究,自 20 世纪 80 年代末^[1]、90 年代初^[2-4]被公开报道至今,一直被人们所关注。它能够揭示 CCD 强光辐照的现象与机理,可促使人们更加充分与恰当地使用 CCD,并改进 CCD 的设计。

研究持续 20 余年,虽较难形成完备数据库或通用分析模型,但现有内容已颇具广度,且其中部分内容已达到一定深度。就作用激光来说:按脉宽分,研究已涉及毫^[5-7]、微^[8-10]、纳^[11-4,9-26]、皮^[25-28]、飞^[25,26,29-33]秒等各种脉宽和连续^[22,34-36]激光;按波长分,已涉及红外(800 nm^[25,26,30-33], 1064 nm^[1-16,18,19,22-24,26,28], 1315 nm^[35-36], 3 800 nm^[34]等)、可见(497 nm^[29], 532 nm^[10,13-15,20-21,25,27]等)与紫外(157 nm^[17])三个波段。就 CCD 器件来说,研究已涉及时间延迟积分 CCD(TDI-CCD)^[1-4]、线阵 CCD(LI-CCD)^[11,17,21,29-30]、行间转移面阵 CCD(IT-CCD)^[5,7,8,10,18-28,31-35]、帧转移面阵 CCD(FT-CCD)^[6]等。其中,报道最多、研究最充分的是 IT-CCD 受纳、皮、飞秒等窄脉冲激光毁伤的问题。IT-CCD 在工作过程中随辐照脉冲增强依次出现白点、白线与失效的典型毁伤现象及其机理基本得到明确^[24-26]。LI-CCD 的结构类似于 IT-CCD 感光区域的一列,其激光毁伤的研究报道虽然较少,但其规律和机理可从 IT-CCD 的相关研究中得到参考。而报道最少的是 FT-CCD 激光毁伤问题。参考文献[6]仅是对金属-氧化物-半导体结构的热力模型分析,其参考价值受限于 FT-CCD 已普遍采用多晶硅电极设计的现状。参考文献[1-4]报道的 TDI-CCD 激光毁伤研究,因 TDI-CCD 与 FT-CCD 结构在感光区基本一致,对 FT-CCD 激光毁伤研究有一定的参考价值。但该研究仅涉及 1 064 nm、10 ns 一种激光对两种型号 TDI-CCD 的毁伤实验,不能得到该类器件受激光毁伤的一般规律,且研究没有呈现受损 CCD 的成像效果。

文中通过 FT-CCD 的脉冲激光毁伤实验获取了 FT-CCD 受激光毁伤后的成像结果。其中,辐照点单侧黑线毁伤现象,在已查阅的 CCD 激光毁伤效应研究文献中未见报道。根据毁伤现象与 FT-CCD 的结构和原理,明确了在文中实验中多晶硅电极先于硅衬底受损的毁伤实质。基于 FT-CCD 像素的结构特

点,分析得出 FT-CCD 电极先受损的概率高于硅衬底的一般性结论。而在 IT-CCD 中,电极先于衬底受损的概率几乎为零。研究内容扩展了对 CCD 激光毁伤效应的认识。

1 FT-CCD 脉冲激光毁伤现象

1.1 实验方法

用 1 064 nm、8 ns 脉冲激光以 1-on-1 方式^[37]辐照在评估板驱动下工作的 FT50M 型 FT-CCD 图像传感器。实验布局如图 1 所示。

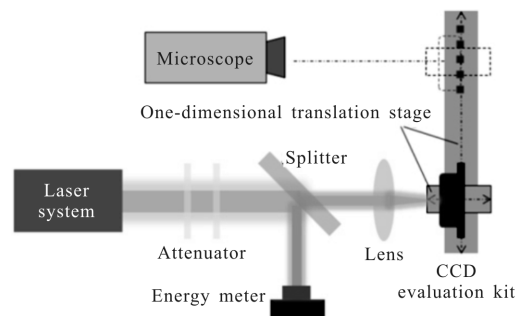


图 1 CCD 脉冲激光辐照实验布局

Fig.1 Experiment layout of pulse laser irradiating CCD

用镜片组合衰减和分光监测的方法控制并测量 CCD 辐照激光脉冲能量的大小。用透镜汇聚光束的方法提高 CCD 辐照激光脉冲能量密度的最大限度。用烧蚀相纸的方法确定最小光斑位置及光斑大小。通过显微镜对焦一致的方法将 CCD 感光面定位于由相纸所确定的最小光斑处。方法具体如下:

首先,以相纸确定最小光斑水平位置并记录最小光斑痕迹。将相纸固定于二维平移台,令其可在垂直和平行(水平)于激光光束的两个方向移动;反复用平移台精确调整相纸位置并以单脉冲烧蚀相纸,直至找到最小光斑的水平位置并固定。其次,将显微镜准确对焦于相纸上的最小光斑痕迹。安装显微镜,令其主轴平行于激光光束并固定;保持水平位置不变,垂直移动相纸至显微镜主轴;调节显微镜并在实现对焦后保持设置不变。再次,将 CCD 感光面移至该显微镜对焦位置。用 CCD(无镜头)替换相纸;仅调节 CCD 水平位置,直至实现显微镜对 CCD 感光面的准确对焦,固定水平位置。最后,垂直移动 CCD,令激光最小光斑辐照 CCD 感光面。

激光单脉冲辐照 CCD 感光面。每辐照一次,垂

直移动 CCD 感光面, 使任意两次辐照区域无重合, 以实现 1-on-1 辐照。

以 CCD 感光面上的脉冲能量与光斑面积相除获取能量密度值。感光面脉冲能量由能量计读数与事先标定的激光分束比求得; 光斑面积由相纸最小光斑痕迹求得。以计算机保存 CCD 受激光脉冲辐照前、后的输出图像, 并对比出现的毁伤现象。

1.2 实验现象

实验发现, 随着感光面上能量密度的逐渐增加, CCD 首先出现辐照点单侧黑线毁伤现象, 继而在单侧黑线上先后叠加出现白点和两侧白线的毁伤现象。值得注意的是, 随辐照脉冲能量密度的增加, 叠加出现白点或白线后, 黑线灰度有所提高。其典型图像如图 2 所示。

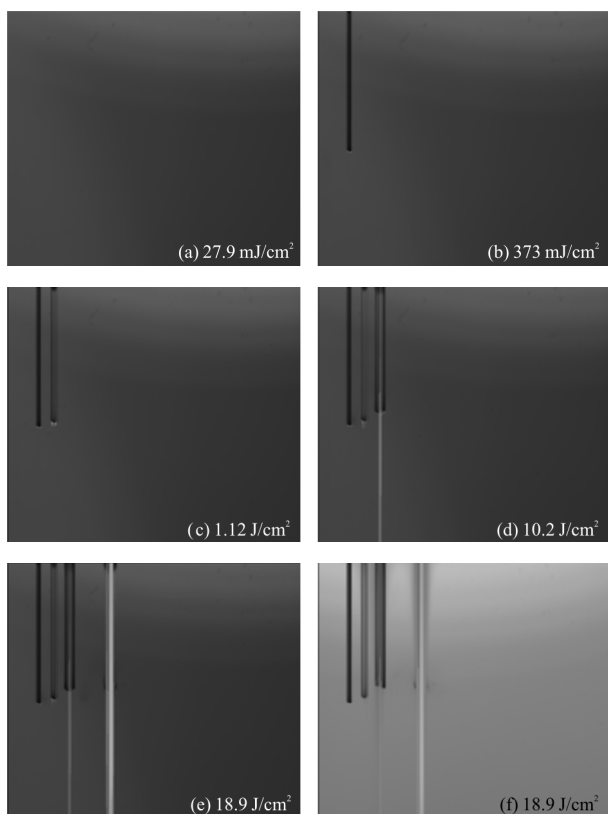


图 2 FT-CCD 脉冲激光毁伤现象

Fig.2 Phenomena of FT-CCD damaged by pulse laser

由图 2(a)、(b)可知, 单侧黑线毁伤现象的激光能量密度阈值在开区间 $(27.9, 373) \text{ mJ/cm}^2$ 之内; 由图 2(b)、(c)可知, 黑线上辐照点一端叠加白点的激光能量密度阈值在开区间 $(0.373, 1.12) \text{ J/cm}^2$ 之内; 由图 2(c)、(d)知, 黑线上叠加白线的激光能量密度

阈值则在开区间 $(1.12, 10.2) \text{ J/cm}^2$ 之内。由图 2(d)、(e)可知, 白线随激光增强而变宽变亮。图 2(f)仅是 CCD 受损伤(见图 2(e))后, 当环境背景变亮时的输出效果。上述毁伤现象已成为受损 CCD 图像传感器的固定图形噪声, 与环境亮度无关。

在脉冲激光毁伤过程中, 辐照点单侧首先出现黑线现象是 FT-CCD 与 IT-CCD 的重要区别, 而随后出现的白点与白线毁伤则是 FT-CCD 与 IT-CCD 的共同点。

2 FT-CCD 激光毁伤机制分析

2.1 单侧黑线首先出现由电极先于衬底受损造成

根据 FT-CCD 的结构和原理分析, 激光辐照区域单侧黑线毁伤现象由辐照区多晶硅电极先于硅衬底受损造成。

首先, 电极受损造成单侧黑线毁伤现象。FT-CCD 感光区各像素收集的光生电荷需要沿一定沟道被传输至检测端才能有效读出; 这种传输依靠相邻电极下的势阱耦合来实现; 而势阱耦合则通过在电极上施加驱动时钟来实现; 辐照区域电极的失效导致该区域永远为势垒, 使两侧势阱无法再相互耦合, 从而使上游像素因信号无法被读出而在输出图像的对应位置呈现黑色。

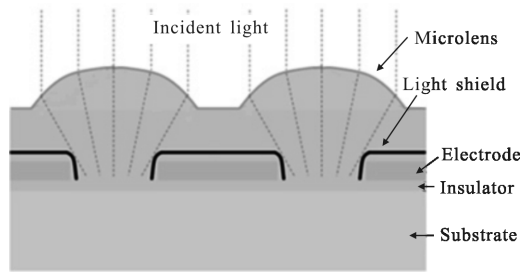
其次, 硅衬底受损造成白点与白线毁伤现象。硅衬底受损造成硅晶格完美周期结构的局部破坏; 在受损局部的硅禁带中存在一定能态密度; 这些能态中的电子通过热运动即可跃入导带成为自由载流子; 自由载流子扩散至邻近势阱中即被收集为信号, 该信号产生因不依赖于光照而被称为暗电流; 扩散至下游像素势阱中的暗电流将被有效传输并读出。暗电流较小, 需一个 CCD 积分周期的时间才能累积为明显信号时, 则形成白点; 而当暗电流较大, 仅在传输时钟的一个最小单元周期 (信号向前传输一个像素的时间)内即可累积为明显信号时, 则形成白线损伤。

基于上述机制, 白点、白线将削弱或覆盖单侧黑线。因此, 单侧黑线仅在电极受损而衬底未受损时最为明显。

2.2 电极先于衬底受损由像素结构决定

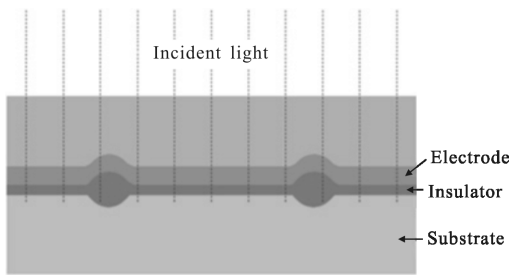
与 IT-CCD 衬底先受损的规律不同, FT-CCD 的像素结构决定了其在激光辐照下, 电极先受损的

概率高于硅衬底。两者像素结构对比如图 3 所示。



(a) IT-CCD 的像素结构

(a) Pixel structure in IT-CCD



(b) FT-CCD 的像素结构

(b) Pixel structure in FT-CCD

图 3 IT-CCD 和 FT-CCD 的像素结构对比

Fig.3 Pixels structure contrast of IT-CCD and FT-CCD

由图 3(a)所示的像素结构可知,在激光辐照下,IT-CCD 电极先于硅衬底损伤的概率几乎为零。一方面,多晶硅受到金属遮光层的保护;另一方面,微透镜已将绝大多数的激光能量汇聚至感光区域的硅衬底中。因此,IT-CCD 激光毁伤研究的文献虽然繁多,但未见有单侧黑线毁伤现象的报道。

相对的,由图 3(b)所示的像素结构可知,FT-CCD 既无金属遮光膜保护多晶硅电极,也无专门的硅衬底感光区直接接受光照。在 FT-CCD 中,入射激光要到达硅衬底,必须先经过多晶硅电极。对于 CCD 感光面,假如入射光为平行或发散,则多晶硅比硅衬底的光更强。同样是硅材料,受较强激光辐照的必然先受损。假如入射光为汇聚光,则仅当汇聚焦点在硅衬底内才可能导致硅衬底先损伤,若汇聚焦点在多晶硅电极内,仍然是多晶硅电极先受损。因此,总的来说,FT-CCD 中多晶硅电极先受损的概率高于硅衬底。

3 结束语

相对于 IT-CCD,在脉冲激光辐照下,FT-CCD

多晶硅电极先于硅衬底受损的概率较高。在文中 1 064 nm 8 ns 脉冲激光对 FT50M 型 FT-CCD 的 1-on-1 辐照实验中,多晶硅电极先受到损伤造成了辐照点单侧黑线的现象。该现象从未被之前的 CCD 激光毁伤效应研究文献所报道。

文中丰富了对 CCD 图像传感器激光毁伤效应现象的认识,为深入探索 CCD 毁伤效应机理提供了新的线索,为 CCD 激光毁伤数据库和通用分析模型的发展与完善提供了新的参考素材。

参考文献:

- [1] Becker M F, Zhang C, Watkins S E. Laser-induced damage to silicon CCD imaging sensors[C]//SPIE, 1989, 1105: 68-77.
- [2] Becker M F, Zhang C Z, Blarre L. Laser-induced functional damage to silicon CCD sensor arrays[C]//SPIE, 1991, 1624: 67-79.
- [3] Zhang C Z, Steve E W, Rodger M W. Laser-induced damage to Silicon charge-coupled imaging devices [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(5): 651-656.
- [4] Zhang C Z, Blarre L D, Walser R M. Mechanisms for laser induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(27): 5201-5210.
- [5] Li Wenyu, Wang Jinbao, Cheng Xiang'ai. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1457-1460. (in Chinese)
- [6] Bi J, Zhang X H, Ni X W. Mechanism for long pulse laser-induced hard damage to the MOS pixel of CCD image sensor[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(11): 114210. (in Chinese)
- [7] Li Zewen, Wang Xi, Shen Zhonghua. Mechanisms for the millisecond laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. *Appl Opt*, 2015, 54(3): 378-388.
- [8] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Study of hard-destructive mechanism of the charge-coupled devices by a laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, 43(11): 1795-1802. (in Chinese)
- [9] Liu Zejin, Lu Qisheng, Jiang Zhiping, et al. Research on damaging mechanism of CCD video camera irradiated by a focusing laser beam[J]. *Applied Laser*, 1995, 15(2): 85-86. (in Chinese)
- [10] Wang Jinbao. Experimental investigation of the visible light arrays of Si-CCD irradiated by the laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [11] Liu Zejin, Lu Qisheng, Jiang Zhiping, et al. Study of damage effect in CCD detectors irradiated locally by laser[J].

- Laser Technology*, 1994, 18(6): 344–347. (in Chinese)
- [12] Ni X W, Lu J, He A Z. Diagnosis of plasma in CCD damage process induced by laser[C]//SPIE, 1993, 2005: 273–276.
- [13] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices [J]. *Laser Technology*, 1994, 18(3): 153–156. (in Chinese)
- [14] Ni X W, Lu J, Lin Z H, et al. Measurement of kinds of thresholds during the interaction between the laser beam and the CCD [C]//SPIE, 1995, 2415: 250–254.
- [15] Lu J, Ni X W, Lin Z H, et al. Measurement of thresholds of damage to a charge-coupled device caused by a Q-switched laser [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 1996, 11(4): 194–196.
- [16] Ni X W, Lu J, Shen Z H, et al. Detection of plasma produced in the interaction between an Nd:YAG laser and a metal-nitride-oxide-semiconductor-type charge-coupled device [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 1997, 16(3): 160–162.
- [17] 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.
- [18] Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua, et al. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2008, 27(6): 475–478. (in Chinese)
- [19] Jiang Nan, Zhang Chu, Niu Yanxiong, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1004–1007. (in Chinese)
- [20] 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. (in Chinese)
- [21] Liao Hai, Sun Nianchun, Feng Guoying, et al. Experimental study on 532 nm laser-induced failure of array and linear CCD [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 663–666. (in Chinese)
- [22] Hao Xiangnan, Li Hua, Nie Jinsong, et al. Experiment of visible CCD damaged by laser operating in different state [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(9): 113–118. (in Chinese)
- [23] Gang L, Bin S H, Li L, et al. Laser-induced damages to charge coupled device detector using a high-repetition-rate and high-peak-power laser [J]. *Opt Laser Technol*, 2013, 47(7): 221–227.
- [24] Zhu Zhiwu, Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai. Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 113–118. (in Chinese)
- [25] Cai Yue, Ye Xisheng, Ma Zhiliang. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 457–462. (in Chinese)
- [26] Zhu Zhiwu. Short pulsed laser induced damage to visible light CCD and optical filter module [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [27] Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214006. (in Chinese)
- [28] Gao Liuzheng, Shao Zhengzheng, Zhu Zhiwu, et al. Thermal damage mechanism on CCD Detector irradiated by pulsed laser [J]. *Chinese J of Laser*, 2013, 40(s1): s103002. (in Chinese)
- [29] Huang Shaoyan, Zhang Yongsheng, Tang Benqi, et al. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1445–1448. (in Chinese)
- [30] 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. (in Chinese)
- [31] 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(11): 1783–1786. (in Chinese)
- [32] Gao L Z, Zhu Z W, Shao Z Z, et al. Electric-induced oxide breakdown of a charge-coupled device under femtosecond laser irradiation[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(31): 7524–7529.
- [33] Wang Ming. Damage effects and mechanisms research of femtosecond laser on CCD [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [34] Wang Fei. Damage mechanisms of laser on PV-type single element HgCdTe device and visible-light CCD [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [35] Ma Jinlong, Liu Chang'an, Qiu Wei, et al. Infrared laser induced hard damage to visible light imaging system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 2023–2026. (in Chinese)
- [36] Li Jing, Chen Zuhong. Study of thermal and mechanical damage in Si-CCD induced by laser [J]. *Electronic Sci & Tech*, 2011, 24(4): 122–124. (in Chinese)
- [37] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, et al. Laser Radiation Effects [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 265. (in Chinese)