

文章编号: 1001-4322(2007)11-1783-04

高重复频率飞秒激光对面阵 CCD 的干扰和破坏*

郭少锋¹, 程湘爱¹, 傅喜泉², 孙运强¹, 王 飞¹, 李文煜¹, 周玉平¹, 陆启生¹, 文双春²

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 湖南大学 计算机与通信学院, 长沙 410073)

摘 要: 采用 800 nm, 100 fs 的超短脉冲激光器对硅面阵 CCD 进行辐照实验, 观测到饱和、串扰以及永久性损伤等多种可能造成成像器件失效的现象, 特别是在激光能量较高时, 发现 CCD 在成像时出现了黑白屏的现象。在飞秒激光器以 1, 10 和 1 000 Hz 工作的条件下, 分别测量了硅面阵 CCD 的饱和阈值、串扰阈值和破坏阈值。对破坏后的 CCD 器件进行了显微分析。在 1 kHz 工作的条件下进行了视场外干扰实验, 观察到串扰和全屏饱和的现象。

关键词: 飞秒激光; 面阵 CCD; 破坏机理; 串扰; 饱和

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

作为一种固体成像器件, CCD 承担着侦察、监控和识别等重要功能, CCD 的损伤将导致系统功能的削弱甚至整体丧失。CCD 与强激光的相互作用一直是国内外研究的重点, 近年来随着脉冲激光技术的不断进展^[1-2], 以及 fs 激光大气传输研究的升温^[3], 人们开始关注 fs 激光对光电器件的干扰和破坏效应, 开展了一些单脉冲 fs 激光辐照线阵 CCD 的研究工作^[4-5]。本文对高重复频率 fs 激光辐照面阵 CCD 的破坏效应进行了初步的研究。

1 实验概况

实验装置如图 1 所示。实验所用激光波长为 800 nm, 脉宽为 100 fs, 发散角为 1.5 倍衍射极限, 光斑直径为 6 mm, 单脉冲能量为 1 mJ, 重复频率为 1 ~ 1 000 Hz 可调。fs 激光经可调衰减片做适当衰减后, 又经小孔滤掉杂散光, 分束镜将一小部分激光导入能量计, 大部分激光由扩束系统整形后辐照进入 CCD 相机系统。根据激光器的参数进行计算得到 CCD 入射处的光斑直径约为 4.2 mm。实验所用探测器为 BC131A1 面阵 CCD, 芯片型号为 SONY ICX405AL。该 CCD 的输出帧频为 25 帧/s, 每场 20 ms, 一行信号周期约为 64 μ s, 每个像素的信号周期约为 104 ns。CCD 摄像器件输出的视频信号经视频采集卡进入计算机处理, 可以实时观察并记录图像的变化。为了与摄像器件输出的视频信号进行对比, 我们在 CCD 芯片上的信号输出管脚上直接引出接线, 将芯片上的输出信号用示波器观察, 据此可判断像元是否饱和以及饱和个数。

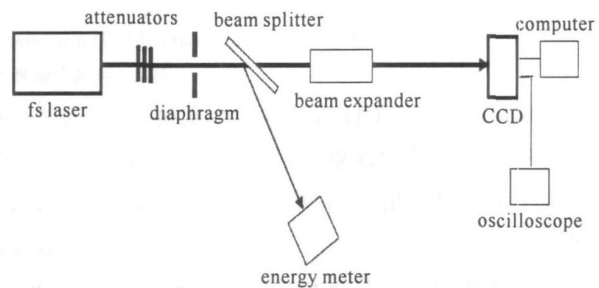


Fig. 1 Schematic of experiment setup

图 1 实验装置图

激光辐照 CCD 的方式分为视场内和视场外两种。激光束在探测系统的视场内入射时, 其光斑或像点直接落在 CCD 器件的感光区域; 视场外入射时, 激光束的几何像点应落在芯片之外。为了比较准确地得到各种阈值, 实验在暗室中进行。激光辐照结束后, 我们在正常使用环境下对 CCD 相机的成像效果进行了观测, 并用光学显微镜观察了像敏面的受损情况。

2 实验结果及讨论

硅 CCD 的响应波段为 400 ~ 1 100 nm, 实验所用激光的波长 (800 nm) 位于响应波段之内。CCD 与激光的相互作用过程首先是光电转换过程, 光电子被束缚在势阱中等待被垂直寄存器和水平寄存器转移。当激光由

* 收稿日期: 2006-11-20; 修订日期: 2007-09-15

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 郭少锋 (1975 -), 男, 副研究员, 主要从事激光破坏机理和高功率固体激光的研究工作; sfguo@nudt.edu.cn。

联系作者: 李文煜 (1970 -), 男, 副研究员, 研究方向为高能激光技术; wly@nudt.edu.cn。

弱逐渐增强时,首先出现局部电饱和现象,然后足够数量的光电子冲破光敏单元之间的势垒,产生串扰现象。短脉冲激光辐照 CCD 时,除了光电转换过程之外,还存在比较复杂的热-力学响应过程。激光的部分能量在 CCD 中形成热积累,达到一定程度可能发生热熔融以及热应力破坏。对于超短脉冲的 fs 激光来说,激光的功率效应将可能导致 CCD 材质的光学击穿,使 CCD 出现微损伤,而按照一定频率的重复作用将导致微损伤不断发展,最终 CCD 出现永久性的毁伤。

图 2 为视场内辐照情况下的几种典型 CCD 照片:图 5(a)为 CCD 局部饱和的结果;图 5(b)是 CCD 串扰的结果;图 5(c)给出的是点破坏的结果;图 5(d)给出的是破坏区域进一步扩大出现的黑白十字交叉线;在图 5(e)中,以过破坏点的纵线为界,一半区域黑屏,另一半区域白屏,这种现象称之为黑白屏。无论激光以何重复频率工作,这 5 种现象总能出现,只是重复频率不同,出现的阈值不同。

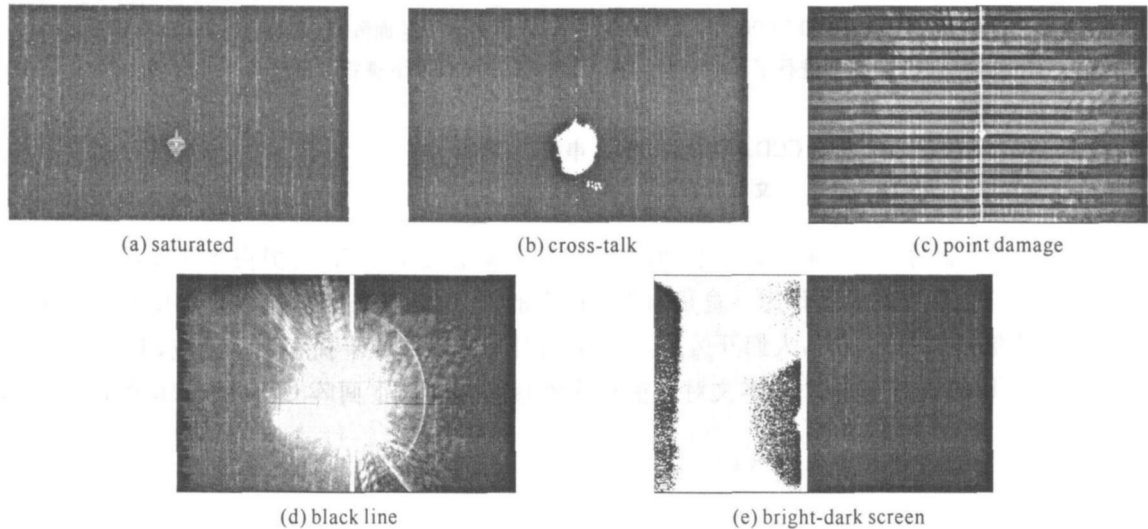


Fig. 2 Typical results of CCD irradiated by femto-second laser in field of view

图 2 视场内辐照的几种典型结果

不同重复频率下 CCD 器件的饱和阈值、串扰阈值和破坏阈值如表 1 所示,激光的作用时间均设定为 30 s。阈值定义为刚出现某种现象时对应的功率或能量密度,功率密度指平均功率密度,能量密度指单脉冲能量密度。从表 1 中可以看出,饱和现象对应的能量阈值很低,数量级为 10^{-11} J/cm²,且串扰现象对应的能量阈值的数量级为 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ J/cm²,且它们也都随着重复频率的增加有减小趋势。从功率密度阈值的角度看,由平均功率与单脉冲能量以及重复频率的关系,易知随着重复频率增加 3 个数量级,饱和和串扰对应的功率密度阈值下降了 3 个数量级。破坏现象对应的能量阈值比饱和阈值和串扰阈值普遍高出几个数量级,且随重复频率的变化非常明显,当重复频率自 1 Hz 增加至 1 kHz 时,破坏阈值减小了 3 个数量级(从 10^{-3} J/cm² 降到 10^{-6} J/cm²)。从功率密度阈值的角度看,破坏阈值在 10 Hz 时最小,1 kHz 最大,至于为何会出现这种现象,尚需进一步研究。总体来说,重复频率的增加将大大降低器件的干扰或破坏阈值,增强破坏效果。

表 1 CCD 饱和阈值、串扰阈值和破坏阈值的实验测量结果

Table 1 Experimental measurements of thresholds of saturation, cross-talk and damage

repetitive frequency/ Hz	saturated threshold / (10^{-11} J · cm ⁻²)	cross-talk threshold / (10^{-10} J · cm ⁻²)	energy threshold for damage/ (J · cm ⁻²)	power density threshold for damage/ (10^{-3} W · cm ⁻²)
1	4.2	1.60	2.1×10^{-3}	2.10
10	5.2	1.10	4.7×10^{-5}	0.47
1 000	2.5	0.36	3.4×10^{-6}	3.40

图 3 为轻度破坏(对应图 2(c))和重度破坏(对应图 2(e))时 CCD 的显微照片和成像效果照片,重度破坏对应的功率密度为轻度破坏的几十倍。轻度破坏情况下,CCD 的受损区域较小,深度较浅,用光学显微镜很难测得具体的深度值,但可以看出,其中一个单元的微透镜已部分被激光清除,内部的 MOS 结构也可能伤及,激光作用之后,成像时总有一点纵向贯穿破坏点的饱和线。深度破坏时,光学显微镜测得的深度约为 5 μm,此时电荷包的转移电路很可能已被破坏^[6],因此使 CCD 完全丧失成像功能。

图 4 是重复频率为 1 kHz 时 CCD 相机视场外干扰实验的结果。实验中相机的主轴与激光的传播方向呈

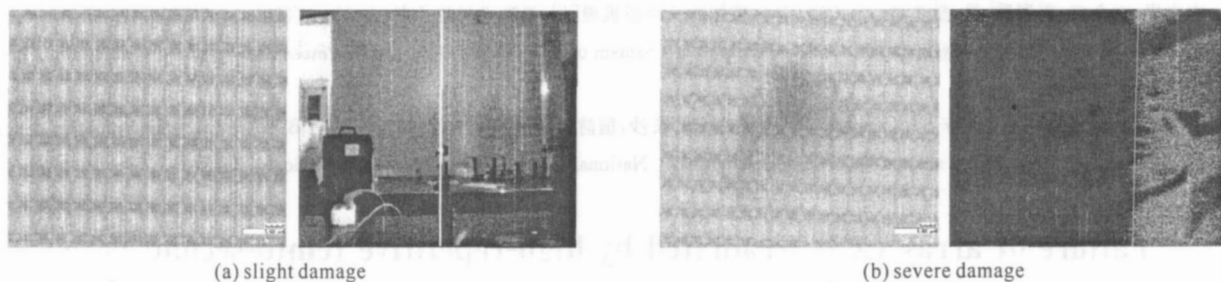


Fig. 3 Microscopy photos of damaged spots and image effects of CCD after damaged

图 3 破坏后 CCD 芯片的光学显微照片以及成像效果

30 夹角。撤去激光后, CCD 显示正常。局部串扰时对应的功率密度阈值约为 $6.5 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$, 全屏饱和时对应的功率密度阈值约为 1.2 W/cm^2 。局部饱和的阈值甚至大于视场内的破坏阈值。视场外干扰不是 fs 激光的优势。

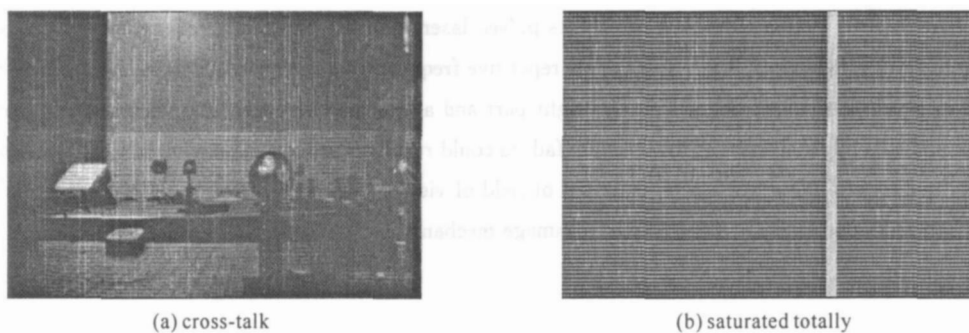


Fig. 4 Typical results of CCD irradiated by femto-second laser out of field of view

图 4 视场外辐照的两种典型结果

强激光与 CCD 的相互作用研究目前只停留在实验观察阶段, 由于 CCD 的结构非常复杂, 实验结果也呈现出多样化, 其中许多结果得不到令人满意的解释。若深入探讨 CCD 的激光辐照效应, 必须在深入透彻理解 CCD 工作原理的基础上, 建立具有较高置信度的物理模型。

本文测得的各种阈值代表着 CCD 的本征特性, 即是刚出现某种现象时对应的激光参数, 例如破坏阈值是指刚出现不可恢复的点损伤时对应的激光能量密度, 这并不代表 CCD 在该阈值下就会失效, 事实上, 此时 CCD 有可能还能正常工作。这种阈值只能为研究激光与 CCD 的相互作用机理提供参考。

从实际的效果评估的角度来看, CCD 应该存在一个失效阈值, 即在该阈值功率下, CCD 失去了其设计功能。失效阈值的获得取决于失效准则, 这项工作须和图象质量评价以及特定 CCD 的特定任务联系起来。

3 结 论

本文以普通的面阵 CCD 作为靶目标, 考察了高重复频率 fs 激光对其作用的特点和效果, 测量了其饱和阈值、串扰阈值和破坏阈值。定性地看, fs 激光并没有带来更多的新现象, 和 ns 激光辐照情形类似^[7], 均经历了饱和、串扰、点破坏、黑白屏和黑屏等过程。重复频率对干扰和破坏的效果影响明显, 随着重复频率由 1 Hz 增加至 1 kHz, 破坏效应对应的能量阈值和饱和效应对应的平均功率阈值均下降约 3 个数量级。

致 谢 感谢范滇元院士对此项工作的大力支持。

参考文献:

- [1] Nisoli M, Silvestri S D, Svelto O, et al. Compression of high-energy laser pulses below 5 fs[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**:522-526.
- [2] Morger U, Kartner F X, Cho S H, et al. Sub-two-cycle pulse from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**:411-415.
- [3] Kasparian J. White-light filaments for atmospheric analysis[J]. *Science*, 2003, **301**:61-64.
- [4] 江继军, 罗福, 陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究. 强激光与粒子束[J]. 2005, **17**(4):515-517. (Jiang J J, Luo F, Chen J G. Research on femtosecond laser induced damage to CCD. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4):515-517)
- [5] 黄绍艳, 张永生, 唐本奇, 等. 500 fs 超短脉冲激光对 CCD 探测器的破坏效应[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(10):1445-1448. (Huang S Y, Zhang Y S, Tang B Q, et al. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10):1445-1448)

- [6] 李文煜, 王金宝, 程湘爱, 等. 激光对面阵 CCD 器件破坏的一种新机理[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(10):1457-1460. (Li W Y, Wang J B, Cheng X A, et al. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10):1457-1460)
- [7] 王金宝. 激光辐照可见光面阵 Si-CCD 探测器实验研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003. (Wang J B. Experiment investigation of the visible light arrays of Si-CCD irradiated by the laser. Changsha: National University of Defense Technology, 2003)

Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser

GUO Shao-feng¹, CHENG Xiang-ai¹, FU Xi-quan², SUN Yur-qiang¹, WANG Fei¹,
LI Weir-yu¹, ZHOU Yu-ping¹, LU Qi-sheng¹, WEN Shuang-chun²

(1. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410073, China)

Abstract: Silicon-CCD is irradiated by 800 nm 100 fs pulsed laser, and the phenomena of saturation, cross-talk and totally damage are observed and corresponding thresholds versus repetitive frequency are measured. Particularly, a new damage phenomenon characterized by a degraded image divided into a bright part and a dark part is observed. Microscope is used to analyze the damage mechanism and it is inferred that the most severe failure could result from the malfunction of CCD circuits because of laser irradiation. Typical results of CCD irradiated by laser out of field of view is also presented.

Key words: Femto-second laser; Array CCD; Damage mechanism; Cross-talk; Saturation

www.cnki.net