

文章编号: 1001-4322(2009)10-1449-06

532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究*

沈洪斌, 沈学举, 周 冰, 毛少娟, 姜 楠, 李 刚

(军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 采用 532 nm, 10 ns 的脉冲激光对面阵 CCD 进行辐照实验, 对每一阶段的实验现象和电路层面的破坏机理进行了深入分析, 根据实验现象, 把脉冲激光对 CCD 的硬破坏分为 3 个阶段: 第 1 阶段在低能量密度激光辐照下, 被破坏的 CCD 局部出现无法恢复的白色盲点, 但其它部分仍可正常成像; 第 2 阶段 CCD 探测器受到激光辐照后, 在光斑处的时钟线方向出现白色竖直亮线, 亮线处无法正常成像且激光辐照撤去后无法恢复; 第 3 阶段受高能量密度激光辐照后, CCD 完全失效, 无法恢复成像。针对 CCD 的饱和及恢复阶段, 利用 Matlab 编码对分辨力靶板的成像数据进行处理, 分析了激光辐照 CCD 对饱和像元数和对比度的影响。结果表明: 当 CCD 受到激光辐照时, 饱和像元数迅速增多, 图像对比度迅速下降为零, 激光脉冲消失后, 整个 CCD 成像亮度下降, 饱和像元数迅速下降为零, 经过一段时间后 CCD 又恢复至线性工作状态, 激光的能量密度越高, CCD 恢复所需的时间就越长。研究还发现: 当恢复时间超过 0.6 s, CCD 出现不可恢复的白色条带, 严重影响成像质量。

关键词: 激光辐照; 破坏机理; CCD 探测器; 光电对抗

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A

在光电对抗中, 以 CCD 探测器为核心的光电装备极易受到激光的干扰与破坏以致不能正常工作, 因此开展激光对 CCD 探测器的干扰及破坏机理研究具有十分重要的意义。国外早在 20 世纪 70 年代就已经开始了激光辐照探测器方面的研究^[1-3], 国内虽起步较晚, 但这方面的研究至今仍未停止^[4-5], 以往的工作都是针对不同探测器的破坏阈值、饱和干扰、热恢复等问题进行实验研究。近年来, 随着激光技术的发展, 人们对飞秒激光辐照 CCD 进行了研究, 郭少锋等人^[6]指出了作用于 CCD 的飞秒激光与纳秒激光相比, 没有带来更多的新现象。在理论方面, 李莉等人^[7]分析了双波段组合激光辐照光电探测器的温升情况, 姜楠等人^[8]利用有限元方法分析了脉冲激光辐照 CCD 多层结构的热应力分布。本文对 532 nm 脉冲激光对 CCD 的硬破坏进行研究, 根据实验现象把破坏过程分为 3 个阶段, 对每一阶段的实验现象和破坏机理进行电路层面的分析; 针对 CCD 的饱和及恢复阶段, 利用 Matlab 编码对分辨力靶板的成像数据进行处理, 深入分析激光辐照 CCD 对饱和像元数(或饱和面积)和对比度的影响。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 为研究激光辐照对 CCD 对比度的影响, CCD 对分辨力靶板进行成像, 利用计算机图像采集系统对 CCD 进行图像采集, 采集卡为 OK-C20A 型, 激光束经衰减片组、分束镜后汇聚到 CCD 摄像头进行干扰破坏, 激光器为北京镭宝光电公司生产的 SGR-10 型 Nd:YAG 脉冲激光器, 其输出倍频激光脉宽 10 ns、波长 532 nm, 能量可调。实验中使用美国相干公司的 EPM1000 型能量计对激光脉冲能量进行实时测量, 使用 Agilent 54622A 型示波器记录 CCD 输出脉冲波形, CCD 器件的微观形态用上海光学仪器厂生产的 6XB-PC 型正置金相显微镜观察并拍摄记录。

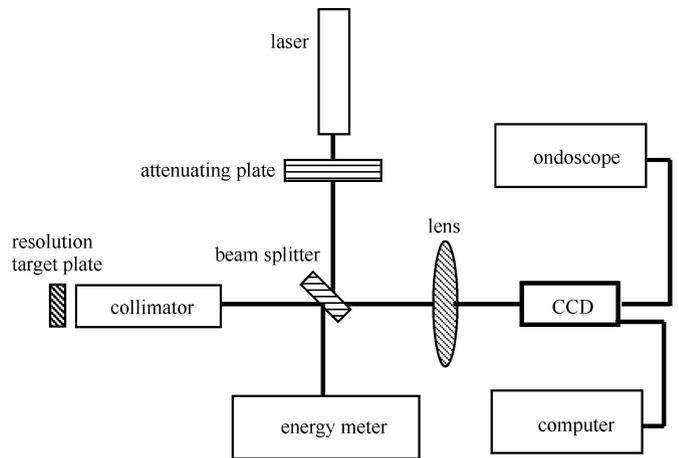


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

图 1 实验装置示意图

* 收稿日期: 2009-01-09; 修订日期: 2009-06-02

作者简介: 沈洪斌(1980—), 男, 硕士, 讲师, 从事激光技术与军用光学仪器的教学和研究工作; shenhongbin11@sina.com。

实验中所用 CCD 摄像头为敏通公司生产的 MTV-1881EX-3 型 CCD,它采用 SONY 公司的 ICX0559CL 型 CCD 芯片,是典型的行间转移型面阵 CCD(IT-CCD),尺寸为 8.47 mm,总像素数为 795(水平)×596(垂直),像素单元尺寸 6.50 μm (水平)×6.25 μm (垂直),实验中 CCD 探测器在 CCIR 制式下工作,50 场/s,共 525 线。

2 实验结果及分析

实验中逐步升高脉冲激光能量密度,使 CCD 摄像头由线性工作状态到发生饱和串音直至无视频信号输出,观察 CCD 随激光辐照能量密度增加而变化的全过程。根据实验中观察到的激光破坏情况不同,可把脉冲激光对 CCD 的硬破坏分为 3 个阶段:第 1 阶段在低能量密度激光辐照下,被破坏的 CCD 局部出现无法恢复的白色盲点,但其它部分仍可正常成像;第 2 阶段 CCD 探测器受到激光辐照后,在光斑处的时钟线方向出现白色竖直亮线,亮线处无法正常成像且激光辐照撤去后无法恢复;第 3 阶段受高能量密度激光辐照后,CCD 完全失效,无法恢复成像。

2.1 第 1 阶段破坏现象及分析

图 2 为 CCD 摄像头对分辨力靶板成像过程中受激光辐照后的干扰情况。在较低能量密度激光辐照下 CCD 可对靶板清晰成像,此时 CCD 处于线性工作状态,如图 2(a)所示。逐步增加辐照激光能量密度至 0.43 mJ/cm^2 时,CCD 开始出现饱和串音,被辐照区域的像元首先达到饱和,在饱和像元的上下方出现沿着竖直时钟线方向延伸的亮线,如图 2(b)所示,其原因是由于 CCD 的光敏元为并行排列,而转移电荷的垂直移位寄存器是串行的,各单元之间用沟阻隔开,基底相连,强激光辐照产生的大量电荷在光信号的积分时间内沿着竖直时钟线方向溢出进入附近的势阱,此外,垂直移位寄存器中前一场的剩余电荷与后一场信号电荷交叠在一起,导致 CCD 饱和串音的发生。继续增大激光能量至 1.81 mJ/cm^2 ,由于脉冲激光在短时间内造成的大量光生电荷远远超过了 CCD 的势阱容量,大量电荷越过沟阻溢出到整个探测器的各像元势阱中,整个分辨力靶板图像被辐照激光漂白,如图 2(c)所示,整幅图像背景变亮。

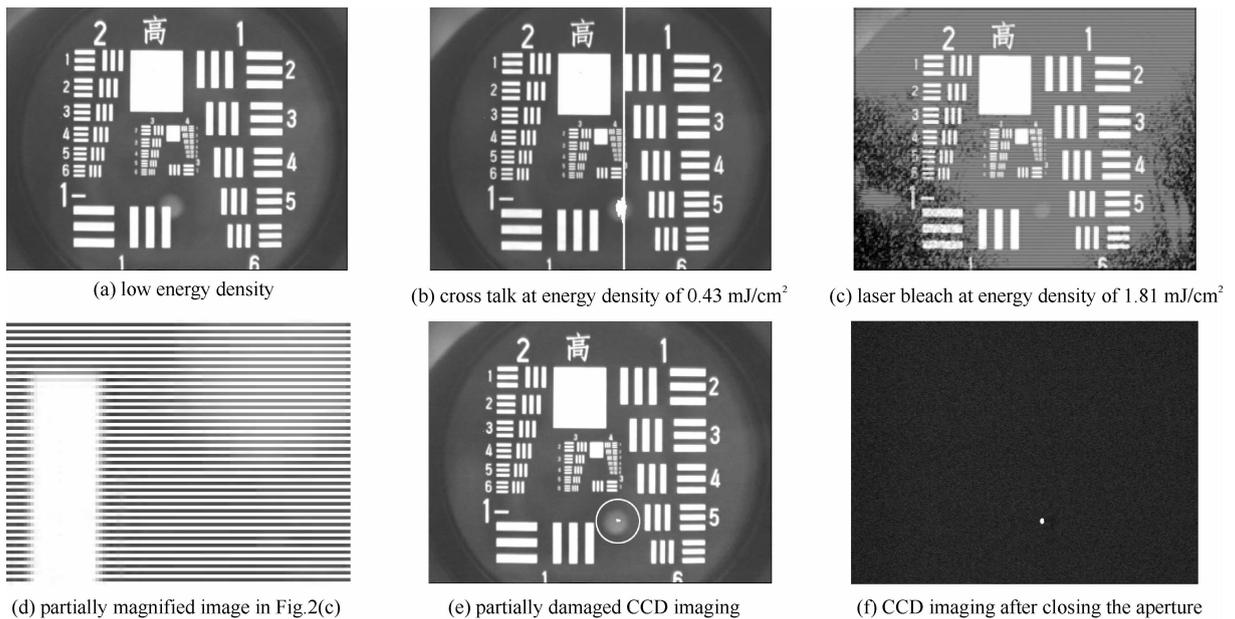


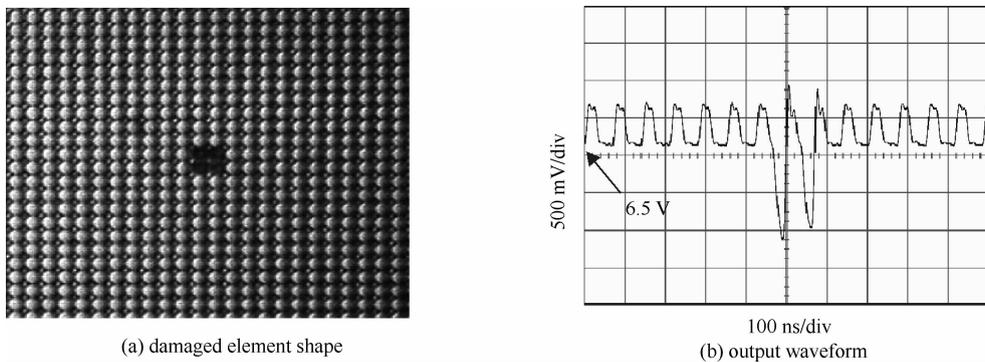
Fig. 2 Resolution target plate imaging for CCD under irradiation of pulsed laser

图 2 脉冲激光辐照下 CCD 对分辨力靶板成像

取图 2(c)中部分图像进行放大,如图 2(d)所示,可看到图像中沿着扫描线方向存在均匀分布的黑白相间的横条纹,这是 CCD 器件在窄脉冲激光辐照下发生的单场饱和现象。实验中 CCD 工作在 CCIR 制式下,每 s 有 50 场,共 25 帧图像,每一帧图像由奇偶两场构成。扫描每一场所需时间为 0.02 s,远大于激光的脉宽 10 ns,如果脉冲激光恰好落在某一场,造成此场的图像饱和,然而,相邻的下一场图像脉冲激光已不存在,CCD 又正常成像,图像扫描电路得到的这两场图像叠加起来便出现这种黑白相间的条纹。由 CCD 单场饱和现象产生机理可知,这种现象与 CCD 采用的工作制式和激光脉宽有关。

随着激光能量密度进一步增大, CCD 饱和区域不断扩大, 当能量密度为 1.96 mJ/cm^2 的脉冲激光辐照时, CCD 全屏饱和, 靶板图像被淹没, 激光脉冲刚撤去后的若干帧, CCD 成像亮度整体变暗, 图像的对比度严重下降。若干 min 后, CCD 成像恢复正常, 总体成像清晰, 但在视场中的原激光辐照部位出现一个白色损伤点, 且其灰度值为 255, 如图 2(e) 所示, 白色损伤光点在图中用圆圈做了标示。关闭镜头光圈后白色损伤光点依然存在, 如图 2(f) 所示。

在显微镜下观察损伤后的 CCD 芯片, 发现有 4 个像元遭到破坏, 如图 3(a) 所示。用示波器观察此时 CCD 输出端的输出波形, 发现每隔 20 ms (恰为 CCD 的单场时间) 白色损伤光点的波形重复出现, 展开其中任意一场的波形, 如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可见, CCD 在沿着扫描线的某一行方向有两个像素遭到损伤, 与图 3(a) 的结果相吻合。由图 3(a) 知, 破坏区域为芯片中间的垂直移位寄存器部分, 用示波器测量 CCD 芯片驱动脉冲信号, 对比 ICX059CL 规格手册, 它们均处在正常的工作范围内, 说明内部时钟脉冲的多晶硅栅极间没有发生短路, 驱动脉冲正常, 同时测得的时钟线间的阻抗及时钟线对地端的阻抗也正常。说明此白色损伤光点类似于由 CCD 在制造过程中产生的瑕疵像元导致的亮点, 可认为是激光辐照 CCD 造成的后发性固定图形噪声。



(a) damaged element shape

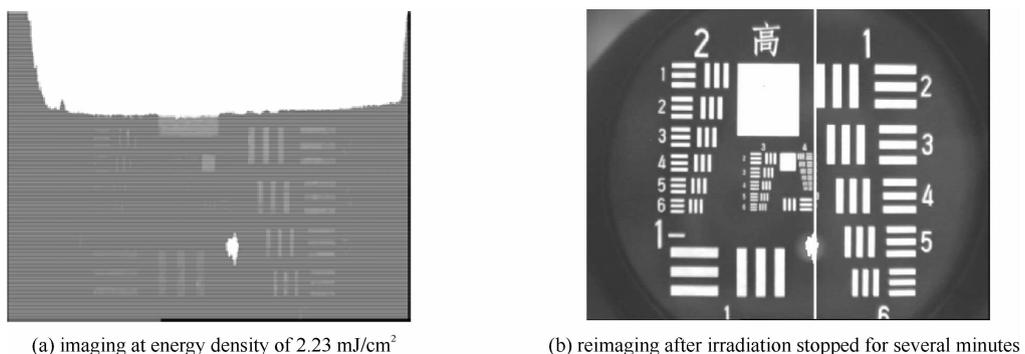
(b) output waveform

Fig. 3 Damaged element shape and output waveform of CCD in the first stage

图 3 第 1 阶段 CCD 损伤像元形态及输出波形

2.2 第 2 阶段破坏现象及分析

当脉冲激光能量密度增至 2.23 mJ/cm^2 时, 部分区域完全被激光漂白, 如图 4(a) 所示。停止激光辐照若干 min 后重新成像, 在 CCD 视场中原激光斑位置, 沿着时钟线方向出现一条垂直的永久性白色亮线, 类似于发生饱和和串音亮线, 如图 4(b) 所示, 表明 CCD 器件发生严重的永久性损伤。在显微镜下观察并拍摄的 CCD 芯片损伤形态如图 5(a) 所示, 可以看到大面积的微透镜熔融剥落, 露出了芯片内部的网格状结构, 同时用示波器测得 CCD 某一行的输出端信号如图 5(b) 所示, 可见沿扫描线方向有 11 个像素遭到破坏, 与图 5(a) 结果基本吻合。

(a) imaging at energy density of 2.23 mJ/cm^2

(b) reimaging after irradiation stopped for several minutes

Fig. 4 Damaged CCD imaging in the second stage

图 4 第 2 阶段破坏的 CCD 成像

2.3 第 3 阶段破坏现象及分析

当增大辐照激光能量密度到 52.48 mJ/cm^2 时, CCD 无信号输出, 10 min 后 CCD 摄像头仍不能正常工作, 已经完全破坏。与致使 CCD 饱和的激光能量相比, 完全破坏 CCD 的激光能量是前者的数十倍。破坏实验后完全失效的 CCD 像元损伤形态如图 6 所示。测量 CCD 时钟脉冲线 $V\phi 1-V\phi 4$ 间及 $V\phi 1-V\phi 4$ 对地端间的电

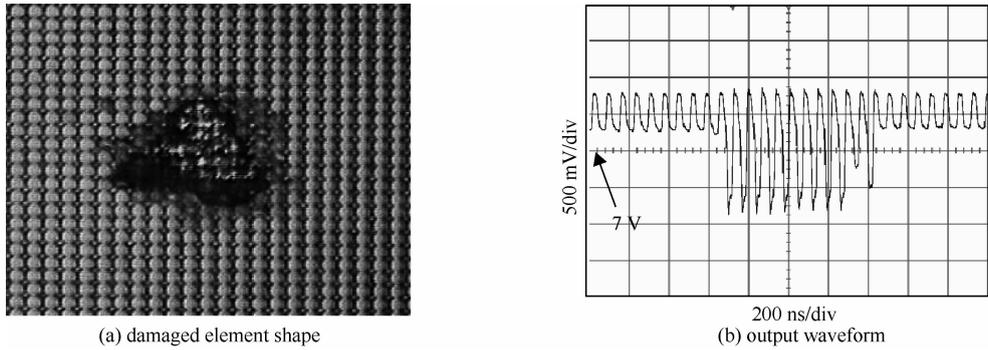


Fig. 5 Damaged element shape and output waveform of CCD in the second stage

图 5 第 2 阶段 CCD 损伤像元形态及输出波形

阻,按照管脚的排列顺序,其电阻分别为: $R_{V\phi 4-V\phi 3} = 61.60 \text{ k}\Omega$,
 $R_{V\phi 4-V\phi 2} = 100.24 \text{ k}\Omega$, $R_{V\phi 4-V\phi 1} = 27.37 \text{ k}\Omega$, $R_{V\phi 3-V\phi 2} = 61.49 \text{ k}\Omega$,
 $R_{V\phi 3-V\phi 1} = 35.25 \text{ k}\Omega$, $R_{V\phi 2-V\phi 1} = 72.63 \text{ k}\Omega$, $R_{V\phi 4-GND} = 50.79 \text{ k}\Omega$,
 $R_{V\phi 3-GND} = 12.27 \text{ k}\Omega$, $R_{V\phi 2-GND} = 50.80 \text{ k}\Omega$, $R_{V\phi 1-GND} = 23.32 \text{ k}\Omega$,测
 得其水平时钟脉冲线间及其对地电阻 $R_{H\phi 1-H\phi 2} = R_{H\phi 1-GND} = R_{H\phi 2-GND}$
 $= \infty$,由于二氧化硅绝缘层的存在,正常情况下这些电阻值都为
 无穷大,由测量结果可见,CCD 在强激光辐照后水平时钟脉冲线
 未受到损伤,但垂直脉冲时钟线之间或者时钟脉冲线对地间的电
 阻显著减小,造成时钟线间及时钟线对地间的漏电流增大,并引
 起电势分布的改变及势阱的降低,从而导致时钟脉冲混乱使信号
 电荷无法正常转移。由于 CCD 的驱动脉冲及时序由外部 IC 提供,使用示波器测量 CCD 的时钟脉冲信号,发
 现时钟脉冲信号在破坏前后并无明显变化。事实上,CCD 的时钟控制栅极均在 Si 基板上,两层多晶硅电极之
 间夹着绝缘层重叠配置形成,CCD 控制电极间隙必须很小,信号电荷才能不受阻碍地由一个电极转移到相邻
 电极,如果控制电极间隔过大,两相邻电极间的势阱将被势垒隔开,不能合并形成电荷传送沟道,信号电荷将无
 法顺利传送,所以 CCD 的控制电极间相距很近,两层电极有部分重叠。在激光辐照下这种电极结构就有可能
 导致多晶硅控制电极发生熔融,或者是控制电极下的绝缘层发生熔融损伤,造成相邻时钟线间及时钟线对地间
 电阻减小甚至发生短路,时钟驱动脉冲混乱使电荷无法正常传输最终导致 CCD 无法正常成像。

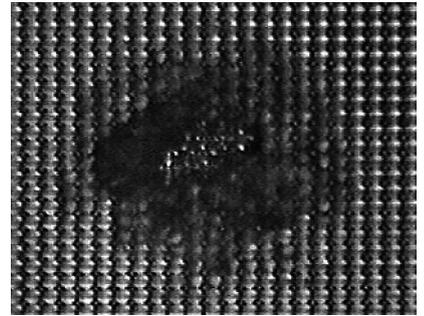


Fig. 6 Damage shape of completely failed CCD elements
 图 6 完全失效后 CCD 像元的损伤形态

2.4 激光辐照 CCD 对饱和和像元数和对比度的影响

辐照 CCD 的脉冲激光能量密度未达到永久性损伤的能量密度时,CCD 成像过程经历了“线性工作状态→
 饱和→亮度和对比度下降→恢复线性工作状态”4 个过程。图 7(a)所示为激光能量密度较小时,CCD 正常工
 作状态下所成像,图 7(b)所示为激光能量密度为 0.95 mJ/cm^2 时,CCD 处于饱和状态下所成像,此时图像对
 比度明显降低。图 7(c)所示为刚停止激光辐照时 CCD 所成像,此时图像灰度值和图像分辨率明显降低。图 7
 (d)所示为经过一段时间恢复后 CCD 所成像,可以看到,所成像基本恢复到图 7(a)的状态。

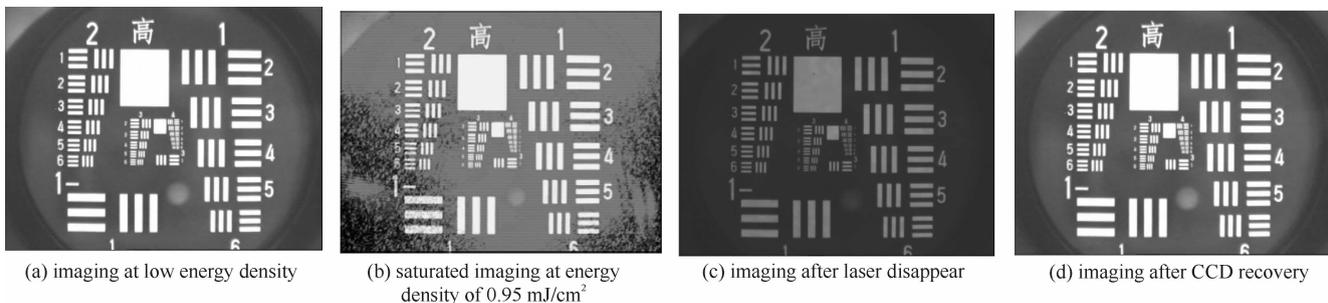


Fig. 7 Saturation and recovery of CCD

图 7 CCD 的饱和及恢复

利用 Matlab 编码对实验中的 13 组数据 290 张图像进行数据处理,得到不同能量密度的脉冲激光辐照下
 CCD 饱和和像元数所占比例的变化曲线,如图 8 所示,横坐标为图像帧数目,每帧 0.04 s,纵坐标为归一化饱和

像元数所占比例。可见,当 CCD 探测器受到激光辐照时饱和像元数迅速增多,激光脉冲消失后,整个 CCD 成像的亮度下降,图像中不存在灰度值为 255 的饱和像元,饱和像元数迅速下降为零,经过一段时间后 CCD 又恢复至线性工作状态,激光的能量密度越高,CCD 恢复所需的时间就越长。图 9 为图像对比度随图像帧数的变化,曲线由图 7(a)中白色圆圈内直线靶部分进行图像处理计算得到。由图 9 可知,当脉冲激光辐照时,图像对比度迅速下降到零,说明图像迅速饱和,脉冲激光消失后,图像对比度逐步恢复。实验中发现,在低于 CCD 硬损伤阈值的激光能量密度下,CCD 的成像质量总是可以逐步恢复的,且恢复时间随激光能量密度的增大而延长,但当恢复时间超过 0.6 s 以后 CCD 出现不可恢复的白色条带,已严重影响成像质量,若进一步增大激光能量密度则造成 CCD 无法恢复而彻底失效。

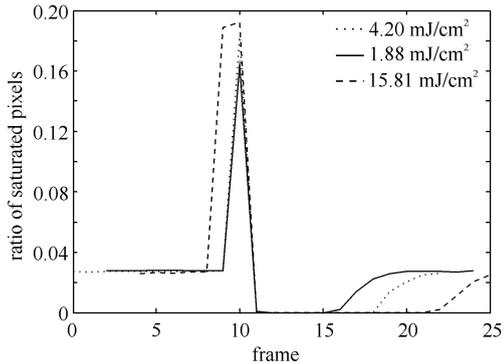


Fig. 8 Relation between saturated pixel number and picture frame

图 8 饱和像元数随图像帧数的变化

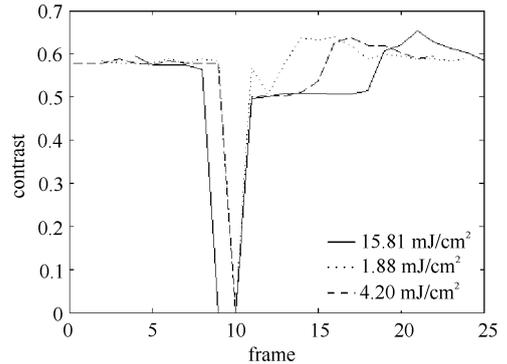


Fig. 9 Relation between contrast and picture frame

图 9 对比度随图像帧数的变化

3 结论

本文采用 532 nm, 10 ns 的脉冲激光对面阵 CCD 进行辐照实验,根据实验现象,把脉冲激光对 CCD 的硬破坏分为 3 个阶段,对每一阶段的实验现象和电路层面的破坏机理进行了分析。针对 CCD 的饱和和恢复阶段,分析了激光辐照 CCD 对饱和像元数和对比度的影响。结果表明:当 CCD 受到激光辐照时,饱和像元数迅速增多,图像对比度迅速下降为零,激光脉冲消失后,整个 CCD 成像的亮度下降,饱和像元数迅速下降为零,经过一段时间后 CCD 又恢复至线性工作状态,激光的能量密度越高,CCD 恢复所需的时间就越长。研究还发现:当恢复时间超过 0.6 s 时,CCD 出现不可恢复的白色条带,严重影响成像质量。

参考文献:

- [1] Bartoilo F J, Esterowitz L, Kruer M R, et al. Thermal recovery processes in laser irradiated HgCdTe (PC) detectors[J]. *Appl Opt*, 1975, **14**(10): 2499-2507.
- [2] Bartoilo 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] Bartoilo F J, Esterowitz L, Kruer M, et al. Irreversible laser damage in IR detector materials[J]. *Appl Opt*, 1977, **16**(11): 2934-2937.
- [4] 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 Shaoyan, Zhang Yongsheng, Tang Benqi, et al. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10): 1445-1448)
- [5] 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 Wenyu, Wang Jinbao, Cheng Xiang'ai, et al. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10): 1457-1460)
- [6] 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**(11): 1783-1786. (Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan, et al. Failure of array CCD irradiated by high-repetitive femto-second laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1783-1786)
- [7] 李莉, 陆启生. PC 型 HgCdTe 光电探测器在双波段组合激光辐照下的升温计算[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(6): 912-916. (Li Li, Lu Qisheng. Temperature changes in PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(6): 912-916)
- [8] 姜楠, 张雏, 牛燕雄, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(10): 1004-1007. (Jiang Nan, Zhang Chu, Niu Yanxiong, et al. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays. *Laser and Infrared*, 2008, **20**(6): 1004-1007)

Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD

Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing, Mao Shaojuan, Jiang Nan, Li Gang

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The array CCD is irradiated by a 532 nm, 10 ns pulsed laser. According to the experiment phenomenon, hard damage process of CCD can be divided into 3 stages. In the first stage, when the CCD is irradiated by the laser with a low energy density, local white blind spots appears, which can not be recovered, while other parts of CCD can work normally. In the second stage, vertical bright white lines appear in the clock line direction of the light spot after irradiation, which can not work normally and can not be recovered by stopping irradiation. In the third stage, the CCD is damaged completely after being irradiated by the laser with a high energy density, and can not be recovered. Damaging mechanism of each stage is analyzed. Finally, aiming at the saturation and recovery stage of the CCD, the imaging of resolution target plate is processed with Matlab, and the influence on saturated elements and contrast of laser irradiation is analyzed. The result shows that, when CCD is irradiated by the laser, the number of saturated elements increases, and the contrast reduces to zero quickly. After the laser pulse disappears, the brightness of the whole CCD imaging reduces, and the number of saturated elements reduces to zero immediately. A moment later, the CCD returns to linear working region, and the higher the laser energy density is, the longer the recovery time is. It is found that when the recovery time is longer than 0.6 s, white stripes that can not be recovered appear, which influence imaging quality seriously.

Key words: laser irradiation; damaging mechanism; CCD detector; electro-optic warface against