

# CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究\*

江继军<sup>1,2</sup>, 罗 福<sup>2</sup>, 陈建国<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 用脉宽为 60 fs、波长为 800 nm 的 fs 激光辐照电荷耦合器件, 研究了电荷耦合器件在 fs 激光作用下的失效问题。实验得到 fs 激光作用下电荷耦合器件的失效阈值为  $4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 。这比 ns 激光作用下电荷耦合器件的损伤阈值低 2~3 个量级。对该器件进行显微观测, 在光敏元上没有发现损伤, 但在器件的栅极上发现了明显的激光引起的损伤痕迹。

**关键词:** fs 激光; 电荷耦合器件(CCD); 失效阈值

**中图分类号:** TN249; TQ171 **文献标识码:** A

电荷耦合器件 (CCD) 是一种固体成像器件。作为图像传感器的关键部件, 由于它具有体积小, 重量轻, 灵敏度与分辨率高, 功耗与成本低等特点, 因而广泛应用于监控、测量和识别等领域<sup>[1]</sup>。国内外对 CCD 在激光辐照下的损伤效应做了许多工作。以前实验中使用的激光光源多为连续激光或是脉宽大于亚 ns 的脉冲激光<sup>[2~8]</sup>, 对于 fs 激光辐照下 CCD 损伤效应方面的研究还未见报道。在本工作中, 我们通过监测 fs 激光辐照下 CCD 的输出信号的变化以及分析实验后 CCD 样品的表面形貌, 观察到了 fs 激光辐照下 CCD 中发生的硬损伤并对造成损伤的原因进行了探讨。

## 1 实验装置

实验使用的是 TOSHIBA 公司生产的 TCD132D 型含 1 024 像元的线阵 CCD, 其中包括 CCD 的激励电路和信号处理电路, 它的积分时间为 10 ms。这种 CCD 由于含有脉冲发生器和激励器, 因此通过简单的脉冲就可以驱动。它的信号处理电路包含有箝位电路, S/H (采样/保持) 电路和前置放大器, 如图 1 所示。

实验使用单脉冲钛宝石激光器, 输出波长为 800 nm, 输出口径 35 mm, 最大单脉冲能量为 30 mJ, 激光脉宽 (FWHM) 为 60 fs。光路中使用的透镜焦距为 50 mm, 透镜直径为 40 mm。到达 CCD 器件表面的光斑直径为 2.1 mm, 而到达表面的能量可以通过衰减片调节。为便于判断 CCD 是否发生硬破坏, 在 CCD 器件表面还同时使用位置固定的手电光辐照。使用示波器监测 CCD 对手电光的响应信号, 由这个信号来判断 CCD 是否损伤。实验装置及布局如图 2 所示。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验结果

在实验时, 先在激光光路上加上足够的衰减片, 使入射到 CCD 的激光能量足够小以防止饱和甚至直接损伤; 通过逐渐调节衰减量, 逐步提高 CCD 表面的激光辐照能量。在实验过程中, 手电光一直照射 CCD 表面, 能量密度在  $3.54 \times 10^{-5} \sim 4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  范围内单个 fs 激光脉冲只在某一时刻入射到 CCD 表面, 对应的功率密度  $5.9 \times 10^8 \sim 7.03 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 。在各种不同能量的脉冲辐照下, 从示波器测量到的信号如图 3 所示。

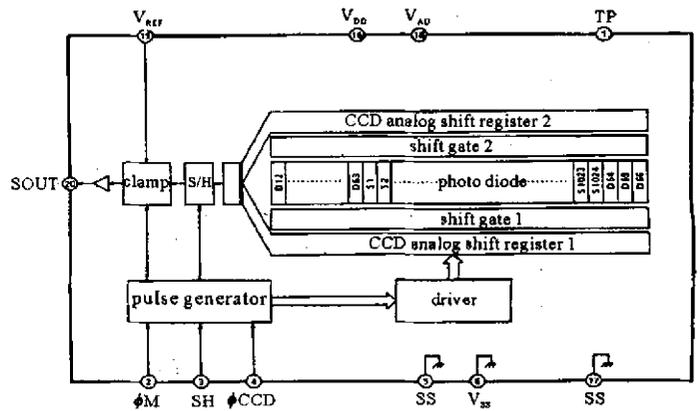


Fig. 1 Internal circuit diagram

图 1 内电路图

\* 收稿日期: 2004-10-20; 修订日期: 2004-12-28

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 江继军 (1979—), 男, 福建龙岩石人, 硕士研究生, 从事光电器件的激光辐照效应研究; 绵阳 919-113 信箱。

图 3 中纵坐标表示 CCD 各像元在手电光辐照下的光电压输出, 每隔 10 ms 输出一幅时间积分图像, 用它表现手电辐照在 CCD 上的积分强度分布。

图 3 中出现的波形突然上跳是单个脉冲介入的结果。从图 3(a) 可以看出, CCD 像元已经出现串扰。随着入射激光能量的增大, CCD 串扰区域不断增大。图 3(b) 在两次积分时间都有响应, 这是因为在前后两次积分时间之间激光脉冲正好作用在 CCD 上。图 3(c) 中器件在激光作用过后两次积分时间没有响应, 这表明在该能量密度下, 其间出现了瞬态失效, 这种失效是可恢复的, 因此在第三次积分时间器件的响应开始恢复正常, 而在该图中的负脉冲, 是电路的一种过冲现象。图 3(d) 在当能量率密度达到  $4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  时, CCD 响应信号突然从串扰区峰值急剧下降, 直至无响应, 从该图中我们还可以看出, 从信号峰值到信号消失的时间约为 150 ms。等待几分钟以后, 电筒辐照下的 CCD 依然无输出信号, 这表明激光能量密度为  $4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  时, CCD 已发生永久性的硬破坏。

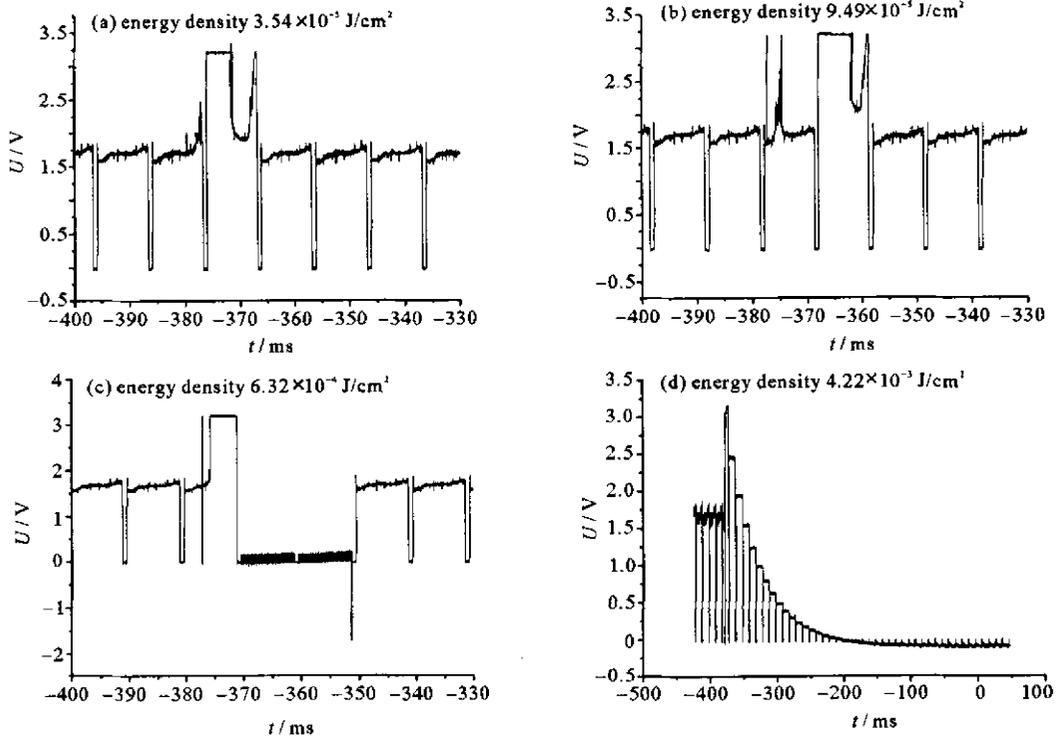


Fig. 3 Signal of CCD irradiated by laser with different energy density

图 3 不同激光能量密度下 CCD 的信号

## 2.2 实验结果分析

激光对 CCD 的破坏效应可分为软破坏和硬破坏。硬破坏指的是辐照到 CCD 表面的激光引起器件关键部分热熔融、龟裂、断裂或击穿等。如果激光辐照使 CCD 的栅极、传输极的铝覆盖层熔化或汽化, 就会引起栅极和传输极、传输极与传输极之间的短路或断路。由于短路可能会造成某些电极的错误连通, 这就可能引起驱动信号的混乱而导致 CCD 无信号输出。而发生断路时, 串行输出的结构将可能会导致当中间某处的中断而使整个器件输出为零。这是一种永久性的破坏。

在实验中, 我们观察到了在能量密度为  $4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  时, 线阵 CCD 就出现了永久性信号消失现象。之后我们对器件进行了显微观察, 并没有发现光敏单元有损伤, 因此可以推断 CCD 的永久性损伤并非发生在光敏元上。我们在传输电路上发现了损伤, 损伤形貌如图 4 所示。从图中可以看出栅极并没有出现裂纹, 我们推断并没有发生力学破坏; 可以看出的是 CCD 的内电路局部已经被激光烧坏, 因此可能是发生烧蚀引起断路或是烧蚀堆积物引起短路, 导致了 CCD 的完全失效。对比文献[8], fs 激光损伤 CCD 的能量密度阈值比脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 脉冲激光 ( $1.0 \text{ J/cm}^2$ ) 低 2~3 个量级。这是因为在 fs 激光辐照下, 激光能量在极短的时间内沉积于激光辐照区域并且不能及时以热扩散的形式(发生的时间尺度为 ns 量级)向周边传递, 致使吸收的

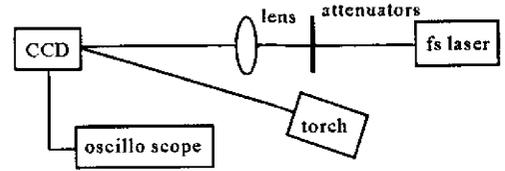


Fig. 2 Schematic of experimental setup

2 实验结果与分析

能量几乎都用于促使激光辐照区域的电子及晶格的温度上升;而在ns激光辐照下,激光的能量会有相当部分以热的形式向四周传递,因而要达到破坏需要的温度,所需fs激光的能量要比ns激光小。

### 3 结论

实验结果表明,在fs激光辐照下,CCD的永久性破坏阈值为 $4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ 。fs激光破坏传输电路引起CCD损伤的能量密度阈值比ns脉冲激光引起CCD损伤的能量密度阈值低2~3个量级。但是对于fs激光作用于CCD光敏元的损伤阈值和其它脉宽的脉冲激光或是连续激光作用于CCD光敏元的损伤阈值之间是否存在类似关系还不是很清楚,接下来的工作将着重于这方面的研究。

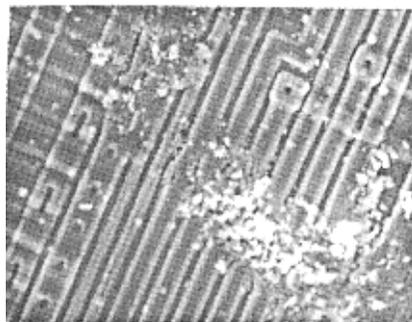


Fig. 4 Pattern of CCD irradiated by fs laser

图4 CCD经过fs激光作用后的形貌

致谢 在研究工作过程中得到中国科学院物理研究所李玉同、李英骏老师的帮助,在此深表感谢!

### 参考文献:

- [1] 王世勇. 激光对CCD探测器干扰损伤的研究和模糊评估[D]. 北京:中国科学院研究生院,2002. (Wang S Y. Study on laser-induced CCD detector vulnerability and survivability and fuzzy synthetic evaluation on CCD fanning effects. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2002)
- [2] Zhang C Z, Walkins S E, Becher M F. Laser-induced damage to silicon charge-coupled imaging devices[J]. *Optical Engineering*, 1991, **30**(5): 651—657.
- [3] Becker M F, Zhang C Z, Blarre L, et al. Laser-induced functional damage to silicon CCD sensor arrays[A]. Proc of SPIE[C]. 1991, **1624**: 67—79.
- [4] Zhang C Z, Blarre L, Walser R M, et al. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(27): 5201—5210.
- [5] 沈中华, 陆建, 倪晓武. 皮秒和脉冲激光作用于半导体材料的加热机理研究[J]. *中国激光*, 1999, **26**(9): 859—863. (Shen Z H, Lu J, Ni X W. Study of the heating mechanism of a semiconductor irradiated by picosecond and nanosecond laser pulses. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(9): 859—863)
- [6] 倪晓武, 陆建, 贺安之. 激光对CCD器件破坏时几种阈值的测量[J]. *激光技术*, 1994, **18**(3): 153—156. (Ni X W, Lu J, He A Z. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices. *Laser Technology*, 1994, **18**(3): 153—156)
- [7] 钟海荣, 刘天华, 陆启生, 等. 激光对光电探测器的破坏机理研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(4): 423—428. (Zhong H R, Liu T H, Lu Q S, et al. Review on the laser-induced damage mechanism study of photoelectric detector. *High Power Laser And Particle Beams*, 2000, **12**(4): 423—428)
- [8] 钟海荣, 陆启生, 文铁峰, 等. 激光辐射CCD的破坏机理分析[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(4): 537—542. (Zhong H R, Lu Q S, Wen T F, et al. Review on the laser-induced damage mechanism of CCD detector. *High Power Laser And Particle Beams*, 1998, **10**(4): 537—542)

## Research on femtosecond laser induced damage to CCD

JIANG Ji-jun<sup>1,2</sup>, LUO Fu<sup>2</sup>, CHEN Jian-guo<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The failure of charge coupled devices (CCD) irradiated by 800nm fs laser with pulse duration of 60 fs was studied. The result shows that the failure threshold of CCD irradiated by fs laser is  $4.22 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$ . and it is 2~3 order lower than the failure threshold of CCD irradiated by ns laser. According to the micro-analysis of CCD, it is found that the damage does not take place at the light activated elements but at the grid electrode of the device.

**Key words:** Femtosecond laser; Charge coupled devices (CCD); Failure threshold