

## 激光技术

# CCD对飞秒激光与连续激光响应特性实验研究

官上洪, 司汉英

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

**摘要:**开展了可见光CCD对脉宽为100 fs的808 nm高重频、低重频激光与808 nm连续激光的线性响应对比实验。实验结果表明,当CCD处于线性响应范围时,CCD对脉宽为100 fs的激光与连续激光的能量响应率之比均接近1,说明响应特性无差别。同时由CCD原理可知,响应输出与积分时间内接收到的激光能量成正比,说明CCD的能量响应率与脉冲宽度、激光重复频率无关。

**关键词:**飞秒激光;连续激光;CCD;响应特性;重复频率

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-04-0026-04

## Experimental Research on Responsivity of CCD to Femto-second Laser and Continuous Wave Laser

GUAN Shang-hong, Si Han-ying

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** The linear responsivity comparison experiment of charge-coupled device (CCD) to 808 nm high and low repetition frequency laser with 100 fs pulse width and 808 nm continuous wave (CW) laser is studied. Experimental results show that the power responsivity ratio of CCD to the laser with 100 fs pulse width and CW laser is close to 1 when CCD is in linear responsivity range, which means the responsivity is no difference. From CCD principle, the response output is in proportion to the laser power received in integrated time, which indicates that the CCD power responsivity has nothing to do with width of pulse and repetition frequency of laser.

**Key words:** femto-second laser; continuous wave (CW) laser; charge-coupled device (CCD); responsivity; repetition frequency

作为一种固体成像器件,CCD集光电转换、电荷存贮、电荷传输等功能于一体,具有体积小、质量轻、灵敏度与分辨率高、效费比高等优点,被广泛用于航空航天、测绘测量、摄像、监控等多个领域<sup>[1-6]</sup>。

激光具有方向性好、亮度高等优点,强激光与CCD的相互作用一直是国内外研究的重点,连续激光和宽脉冲(纳秒量级)的脉冲激光辐照CCD的相关研究工作进行了很多<sup>[2-7]</sup>。随着脉冲激光技术的进步,超短脉冲激光(脉冲宽度在皮秒量级以下)逐渐在各个领域中应用,同时随着超短脉冲激光大气传输特性研究的升温,人们开始关注超短脉冲激光与光电成像探测器之间相互作用,并开展了一些飞秒激光辐照CCD的研究工作<sup>[8-10]</sup>。

文中描述了IMPREX公司可见光CCD在100 fs脉冲激光与连续激光辐照下的线性响应实验,并对实验结果进行了分析。

### 1 实验概况

实验装置如图1所示。

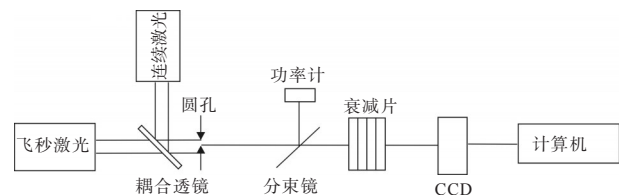


图1 实验装置示意图

开展了飞秒高重复频率与连续激光、飞秒低重复频率与连续激光两种条件辐照 CCD 实验,分析飞秒激光与连续激光作用下 CCD 的响应特性。实验中使用了连续 808 nm 光纤激光器、波长可调谐高重复频率(80 MHz) 100 fs 激光器、波长可调谐低重复频率(1 Hz~1 kHz) 100 fs 激光器等三台激光器,实验时飞秒激光波长均选择 808 nm。实验前将飞秒激光与连续激光耦合在同一光路上,并在耦合后的光路中安装小圆孔用以对激光光束进行整形,保证到达 CCD 探测器上的光束形状相同或相近。分束镜将一部分入射激光导入功率计,飞秒激光与连续激光输出功率由可调渐变衰减片控制,使两种激光到达功率计上的激光功率相同或相近,衰减片组(由 ND4 组成,ND4 在 808 nm 处平均透过率 0.27~0.32)调节到达 CCD 的激光功率,实验过程中激光直接辐照在无光学系统的 CCD 焦面上。探测器为 IMPREX

公司 ICL-210 可见光黑白数字 CCD,具有积分时间可调、增益可控等特点,像元数 640×480、像元尺寸 7.4 μm×7.4 μm、最大帧数 207 fps、8~12 bit 可选数字信号输出,实验时通过计算机采集 CCD 输出的 8 bit 数字图像。为了减少背景对实验的影响,实验在暗室中进行。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 高重频飞秒激光与连续激光实验比较

实验中 CCD 积分时间选取 3.85 ms、1.6 ms、1.0 ms、0.5 ms,增益系数 0 dB,调整衰减片个数控制到达 CCD 焦面的激光能量,使 CCD 探测器输出像元处于线性区。采集 100 帧数字输出图像,平均处理后数据结果如表 1 所示。CCD 响应输出光斑形状如图 2 所示。

表 1 实验条件及数据记录表

功率/μW	80 MHz 飞秒激光				连续激光			
	875±3				880±2			
积分时间/ms	3.85	1.6	1.0	0.5	3.85	1.6	1.0	0.5
衰减片个数	7	6	6	6	7	6	6	6
CCD 强度值/V	1.55×10 <sup>6</sup>	1.84×10 <sup>6</sup>	1.17×10 <sup>6</sup>	6.22×10 <sup>5</sup>	1.65×10 <sup>6</sup>	1.94×10 <sup>6</sup>	1.18×10 <sup>6</sup>	6.03×10 <sup>5</sup>

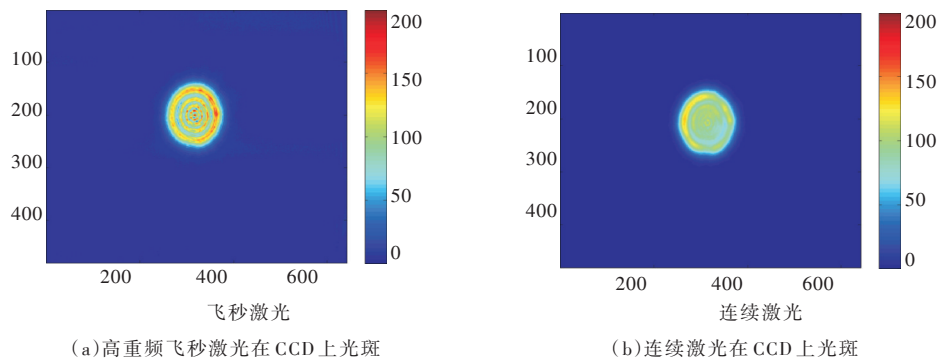


图 2 高重频飞秒激光与连续激光在 CCD 上光斑形状

根据 CCD 工作原理知道<sup>[1]</sup>:在 CCD 线性响应范围内,各像元的响应输出与该像元在积分时间内接收到的光能量成正比,整个探测器面上所有像元响应输出总和与积分时间内接收到的光能量成正比。利用这一性质,定义 CCD 响应输出灰度信号  $DL$  与积分时间内 CCD 接收到的光能量  $q$  之比为 CCD 的响应率  $K$ ,飞秒激光与连续激光的响应率之

比为  $\eta$  表示为

$$\eta = \frac{K_{fs}}{K_{cw}} = \frac{DL_{fs}}{DL_{cw}} \cdot \frac{q_{cw}}{q_{fs}} = \frac{DL_{fs}}{DL_{cw}} \cdot \frac{P_{cw} t_{intcw}}{P_{fs} t_{intfs}} \quad (1)$$

图 3 为 CCD 在不同积分时间下获得的  $\eta$  值随帧数的变化。由于激光器存在轻微抖动,为降低误差将 100 帧进行平均处理,获得  $\eta$  处于 0.94~1.06 之间。说明 CCD 对以上两种参数的激光在响应率上

非常接近,可以认为不存在差别。

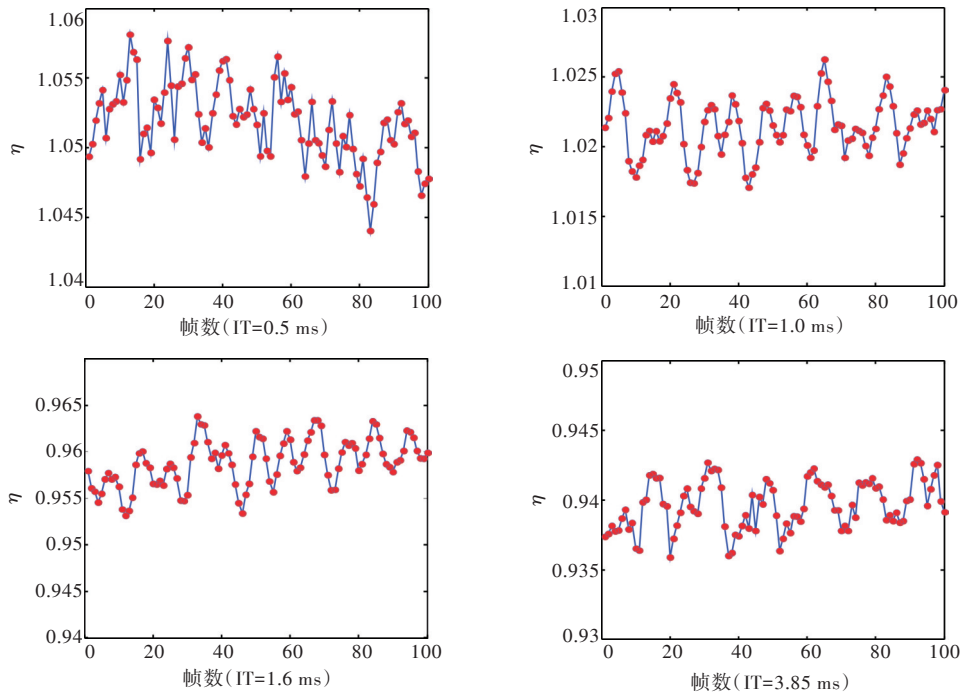


图3 高重频飞秒激光与连续激光响应率之比  $\eta$  随帧数的关系

### 2.2 低重频飞秒激光与连续激光实验比较

实验中设定 CCD 积分时间为 4.83 ms, 增益系数 0 dB, 调整衰减片个数控制到达 CCD 焦面的激光能

量,使 CCD 探测器输出像元处于线性区,记录帧数为 50 帧。实验条件及数据处理记录表如表 2 所示。CCD 响应输出图像如图 4 所示。飞秒激光与连续激光响应率之比  $\eta$  如图 5 所示。

表 2 实验条件及数据记录表

	1 kHz 飞秒激光			连续激光		
功率 / mW	6.83±0.03			7.42±0.02		
积分时间/ms	4.83			4.83		
衰减片个数	10	9	8	10	9	8
CCD 强度值/V	$2.31 \times 10^5$	$8.61 \times 10^5$	$3.23 \times 10^6$	$2.65 \times 10^5$	$9.93 \times 10^5$	$3.55 \times 10^6$

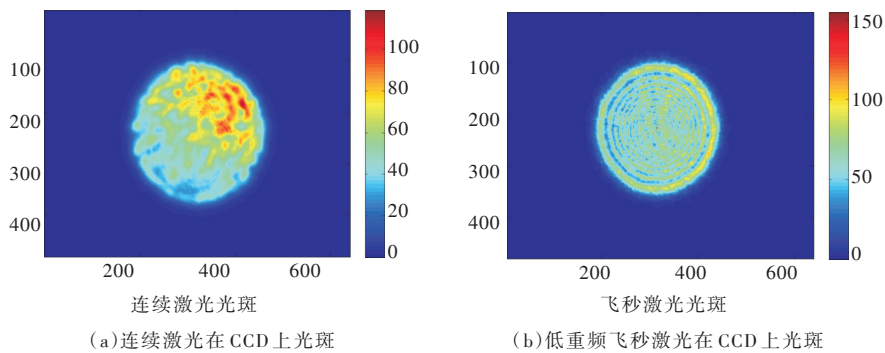


图4 低重频连续激光与飞秒激光在 CCD 上光斑形状

图5显示CCD在不同衰减条件下 $\eta$ 值出现较大抖动的结果。

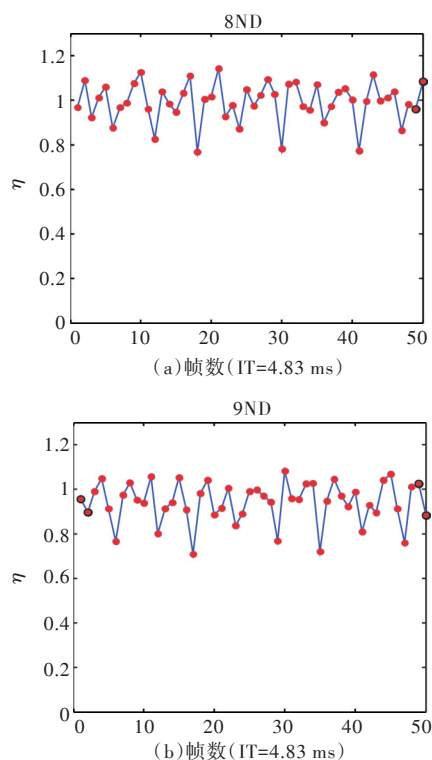


图5 1 kHz飞秒激光与连续激光响应率之比 $\eta$ 随帧数的关系

分析认为,CCD积分时间4.83 ms时,大部分帧图像接收到4个激光脉冲而少部分帧图像接收到5个,导致不同帧图像中的激光能量起伏达到25%左右,与实验结果基本吻合。因此,可以将50帧数据进行平均,平均后获得不同衰减下飞秒激光与连续光的响应率比值 $\eta$ 分别为:0.95、0.94、0.99,均接近1,认为CCD对两种激光的响应无差别。

改变飞秒激光重复频率(1 Hz、10 Hz、100 Hz),均可以获得飞秒激光与连续激光响应率之比 $\eta \approx 1$ 的结果。

### 3 结 论

通过对比实验发现,在线性响应范围内,CCD

对相同波长的100 fs激光、连续激光的响应率之比非常接近1,说明其响应对激光脉冲宽度不敏感。同时,CCD的响应输出与积分时间内接收到的激光能量成正比关系,激光重复频率对CCD的响应率不产生影响,与CCD工作原理完全吻合。

### 参考文献

- [1] 米本和也. CCD/CMOS图像传感器基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2006:15-37.
- [2] Li F M, Nixon O, Nathan A. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2004, 51 (12):2229-2236.
- [3] 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.
- [4] 周建民,付有余,郭劲,等. 脉冲激光对CCD的软损伤技术研究[J]. 激光杂志,2005,26(2):20-21.
- [5] 张震,江天,程湘爱,等. CCD强光串扰效应的串扰线缺口现象及其机制[J]. 强激光与粒子束,2010,22(7):1505-1509.
- [6] 王世勇,付有余,郭劲. 脉冲激光辐照CCD面阵探测器系统局部的干扰效应研究[J]. 应用激光,2001,21(5):317-318.
- [7] 沈洪斌,沈学举,周冰,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.
- [8] Gamaly E G, Rode A V, Luther-Davis B. Ablation of solids by femto-second lasers I ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics[J]. Physics of Plasma, 2002,9(3):949-957.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 江继军,罗福,陈建国. CCD在飞秒激光辐照下的损伤研究[J]. 强激光与粒子束,2005,17(4):515-517.