

文章编号 1004-924X(2013)05-1365-07

CCD 中的激光光斑阴影现象及机理

张震*, 周孟莲, 张检民, 韦成华, 冯国斌, 叶锡生

(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:对 CCD 相机在激光辐照下的暂时性失真问题进行了研究。用 532 nm 连续激光辐照以线阵 CCD 为图像传感器的 Piranha HS-41-02K30 相机进行了实验, 实验发现, 激光光斑和 3 个与其大小、形状皆相似的暗斑同时、等间距地出现于感光阵列方向上。这些暗斑即为 CCD 相机在激光辐照下的一种暂时性失真现象, 本文称这 3 个暗斑为光斑阴影。根据实验数据分析了这一现象的规律和产生机理。分析认为, CCD 图像传感器 4 个并行读出电路因共用同一偏置源而相互影响是产生光斑阴影现象的内在机制。推导了共偏置并行电路信号之间相互影响的关系式, 由得到的关系式可知, 降低公共偏置源与并行读出电路公共节点之间的电阻可减弱上述阴影失真现象; 而用 4 个电压源分别为并行读出电路提供偏置, 可以消除这种光斑阴影现象。本文推导的共偏置并行电路影响关系式不仅可解释阴影现象, 也可为设计 CCD 器件时减弱或消除阴影失真提供借鉴。

关键词: CCD 相机; 激光光斑; 光斑阴影; 并行读出电路

中图分类号: TN386.5; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1365

Shadows of laser spots in CCD and their mechanism

ZHANG Zhen*, ZHOU Meng-lian, ZHANG Jian-min, WEI Cheng-hua, FENG Guo-bin, YE Xi-sheng

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

* Corresponding author, E-mail: zhyc8@126.com

Abstract: The transient distortion of a CCD under laser irradiation is explored. A HS-41-02K30 camera with a linear CCD image sensor is irradiated by a 532 nm CW laser, and the experiment shows that a laser spot and three dark spots with the similar size and shape appear in the direction of photosensitive array with an equal space synchronously. These dark spots are a transient distortion phenomenon of the CCD camera under laser irradiation, and are named the shadows of laser spot in this article. The regularity and generation mechanism of the shadow phenomenon are analyzed. It suggests that the inner mechanism of generating shadows is the interaction between four parallel readout circuits of CCD which share the same bias. The expression describing the interaction is deduced, which indicates that reducing the resistance between the bias source and the common node of four readout circuits can weaken the shadow phenomenon, and using four voltage sources to provide bias for four readout circuits respectively can eliminate the shadow phenomenon. Obtained results point out that the expression deduced by this paper not only can explain the shadow phenomenon but also can provide references for the design of CCD in weakening and eliminating the shadow phenomenon.

Key words: CCD camera; laser spot; spot shadow; parallel readout circuit

收稿日期: 2013-03-21; 修订日期: 2013-04-11.

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室创新基金资助项目 (No. SKL111101)

1 引言

CCD 相机与激光可组合为许多光学精密测量工具,用以完成尺寸^[1]、位移^[2]、形变^[3]与姿态角^[4]等物理量的非接触测量及特殊目标的探测^[5-6]等重要工作。另外,CCD 相机也直接用来测量激光的平行度^[7]、能量分布^[8]等重要参数。但由于激光具有高亮度的特性,CCD 相机在其辐照下可产生永久性的破坏^[9-11]和暂时性的失真^[12-20]这两类基本问题。其中,前者产生阈值较高,易于避免,而且其现象简单,容易识别,其一旦发生,人们便会停止对受损 CCD 相机的使用;后者产生阈值较低,容易发生,而且其现象复杂多样,难以辨别,其暂时性的特点易被人忽略而使其在测量工作中反复出现。因此,后者更能造成测量工作的失误。认识 CCD 相机在激光辐照下暂时性失真现象的规律并明确其产生机理,有助于改进 CCD 相机的设计,从而正确匹配 CCD 相机型号和激光测量环境,并正确识别和校正相关失真数据。

目前,关于 CCD 相机在激光辐照下暂时性失真的现象有诸多表现,例如行间转移面阵 CCD 相机在连续激光辐照下的饱和亮斑^[12]、串扰亮线^[13]、串扰线缺口^[14]、过饱和全黑屏^[15]和在重复脉冲激光辐照下的漂移亮点^[16]、主光斑丢失^[17]等;又如线阵扫描 CCD 在单束激光辐照下的多光斑现象^[18-19]和重复脉冲激光辐照下的条纹现象^[20]等。目前,这些现象规律和内在机理受到学者们极大关注。综合对上述问题的报道可知,CCD 相机的结构、工作模式、设置参数和所用具体技术的变化以及激光模式或参数的更改等,都可能造成激光辐照暂时性失真,而且 CCD 相机系统复杂、种类繁多,其结构、模式和系统内的具体技术仍在不断更新,加之激光光源也是式样多杂且不断推陈出新,这些情况必将导致 CCD 相机系统在激光辐照下的暂时性失真存在或进一步产生诸多有待研究的问题。

本文对上述现象进行了研究,在用连续波段内激光辐照一种采用分区域并行读出技术的大阵列 CCD 相机进行实验时发现:当激光辐照在 CCD 图像传感器的某一区域时,其它并行读出的区域中会出现与激光光斑形状、大小相近似的暗斑。该暗斑在实际背景中并不存在,而是 CCD 相

机在激光辐照下的一种暂时性失真现象,因其尚未见诸报道,暂称之为激光光斑阴影现象。本文根据实验数据分析给出了出现该现象的规律,并通过分析并行读出电路之间的相互影响揭示了该现象的产生机理。

2 实验及现象

2.1 实验系统

实验装置如图 1 所示。所用光源为 532 nm 连续波激光器,其出光功率为 1.3 mW,用准直装置改善激光平行度并对其进行扩束,用衰减片和偏振片组合来调节其功率,用镀铜平面镜将其反射至相机镜头。所用 CCD 相机为以 DALSA TDI IT-E4-2048B 型 CCD 作为传感器的 Piranha HS-41-02K30 线扫相机,利用转台承载以实现其扫描动作,利用装有 xcelera-cl_px4 采集卡及其配套软件(Sapera LT)的计算机实现相机输出视频的采集与存储。

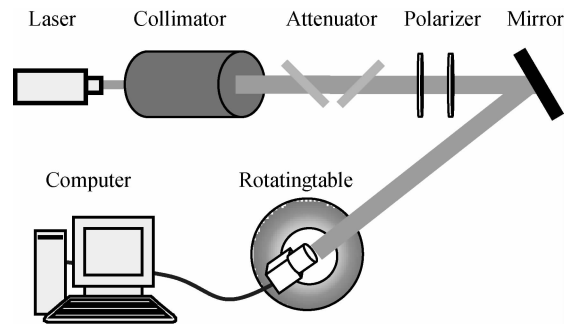


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Sketch of experiment system

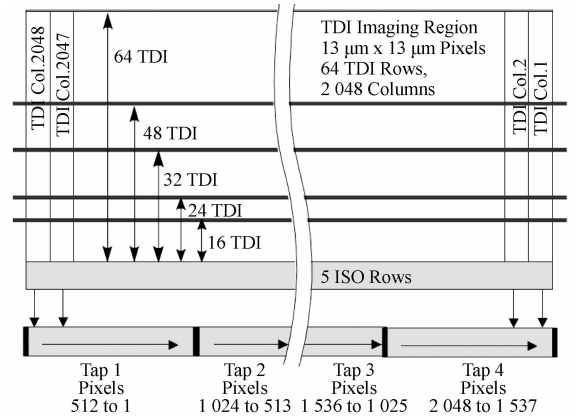


图 2 CCD 图像传感器结构

Fig. 2 CCD image sensor structure

图1中,CCD图像传感器具有 $2\,048\text{ pixel}\times 64\text{ pixel}$,像素尺寸为 $13\text{ }\mu\text{m}\times 13\text{ }\mu\text{m}$,采用时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)模式,积分级数有64、48、32、24和16等5种选择。需特别说明的是,该CCD采用了分区域并行读出的方式,如图2所示,整个图像传感器共分为4个区域,配置4个读出电路;每 $512\text{ pixel}\times 64\text{ pixel}$ 构成一个区域,每个区域配置一个读出电路;4个读出电路按统一的时序并行工作。

2.2 光斑阴影现象

图3为实验获取的典型数据,对应的CCD相机相关设置为:图像传感器32级积分、2 000 Hz行频;镜头对焦于反射镜面。图片的横向对应于图像传感器阵列方向,纵向对应于相机扫描方向;所标注的功率密度值是光斑内的平均光强。

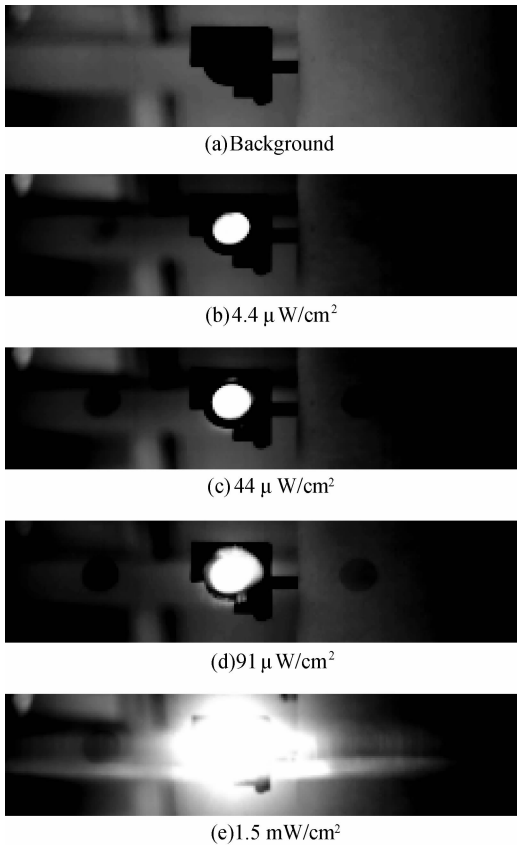


图3 CCD视频中激光光斑及其阴影

Fig. 3 Laser spot and its shadows in video of CCD

对比背景实物图3(a)可知,激光的辐照在光斑所处的阵列方向上造成了3个暗斑。图3(b)中暗斑与光斑相比面积明显较小且形状差别也较大,这说明造成明显暗斑的光强阈值介于光斑内

光强最大值与最小值之间。本次实验中的光斑代表反射镜面中被激光照亮的区域,因激光经过一定程度的准直,故强度分布比较均匀,因此,该阈值在图3(b)光斑平均光强附近。当激光增强使光斑内的光强都高于该阈值时,暗斑的大小和形状都将近似于光斑,如同光斑的影子,如图3(c),故暂称这种暗斑为光斑阴影。当入射激光增强至一定程度时,其杂散光也造成了饱和亮区而令光斑产生畸变,如图3(d);但因杂散光强远低于光斑主体区域的光强而不足以造成明显阴影,此时可用光斑阴影来判断光斑主体区域的面积。图中标注的功率密度值是以镜头后的激光功率除以图3(d)中光斑阴影的面积所得。如图3(e),激光继续增强十几倍,随之增强的杂散光未能使阴影面积增加,说明其强度仍低于明显阴影的产生阈值;但杂散光引起的背景亮度增强可将阴影淹没。

图3(d)中,沿穿过光斑及3个阴影中心区域的直线读取灰度分布,如图4所示,通过光斑和阴影区边缘的横坐标位置可知:光斑及阴影的相邻间距为512 pixel,即 $1/4$ 阵列长度。3个阴影区灰度下降的值也略有差别。

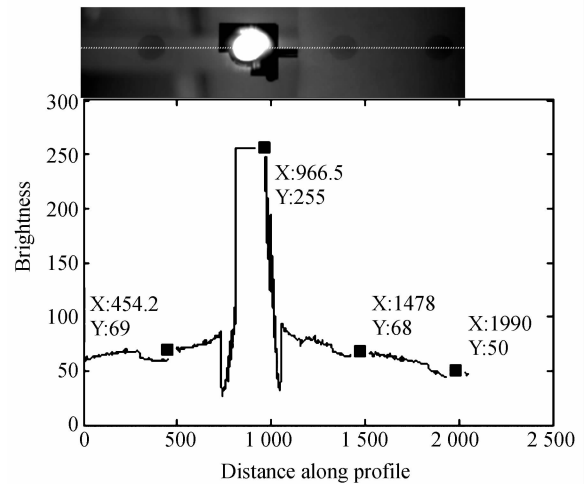


图4 光斑及阴影的灰度分布轮廓

Fig. 4 Grey value distribution profile of spot and its shadows

将图4中光斑右侧阴影及其灰度分布放大如图5(a)所示,可以看出灰度分布存在梯度且叠加有杂乱的噪声,难以直接读取灰度下降的具体数值。选取位于阴影两侧的两块方形区域,取其灰度平均值,然后与阴影区内的一块方形区域的灰度平均值作差,得到灰度差值为6。用背景图像

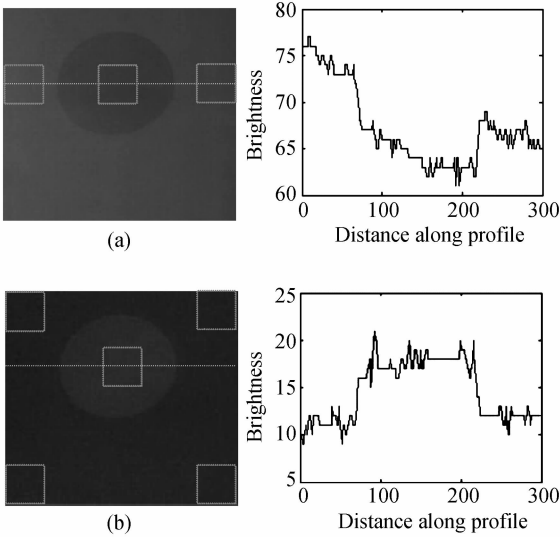


图 5 光斑阴影程度示意图

Fig. 5 Sketch of extent for spot shadow

的对应区域与图 5(a)作差,得到图 5(b),其灰度分布梯度降低,阴影转化为亮斑;选择亮斑周边区域,取灰度平均值,与亮斑中间区域的灰度平均值作差,其差值也等于 6。分别按上述两种方式,反复选取区域进行计算,最终确定其差值为 6。利用上述方法计算图 3(c)中光斑右侧第一个阴影的灰度下降值结果也为 6。光强增加一倍多而灰度下降程度不变,这说明该阴影的灰度下降存在饱和。按上述过程确定自左至右 3 个光斑阴影的灰度下降的饱和性质并计算其饱和值分别为 9、6 和 6。

3 阴影机理及其特性解释

下面用 CCD 图像传感器 4 个并行读出电路共用同一偏置源的模型,给出光斑阴影的产生机理,并根据机理解释阴影现象的特点。

3.1 阴影产生机理

如图 6 所示,4 个并行读出电路共用偏置电压 V_{DC} ;并行读出电路公共节点 O 的电压 V_0 ;偏置源与节点 O 之间的电阻为 R_0 ,其电流为 I_0 ;各读出电路中的电荷检测电容、可变电阻、电流、固定电阻和电压输出分别记为 C_i, R_{Si}, I_i, R_i 和 V_i ,其中 $i=1, 2, 3, 4$ 。上述物理量满足如下关系:

$$V_i = I_i R_i, \quad (1)$$

$$I_0 = \sum_{i=1}^4 I_i, \quad (2)$$

$$V_0 = V_{DC} - I_0 R_0, \quad (3)$$

$$V_0 = I_i (R_i + R_{Si}), \quad (4)$$

其中: V_{DC}, R_0 和 R_i 为常量;其余为变量。当信号电荷包注入 C_i , 改变电阻 R_{Si} , 从而改变 I_i 和 V_i, V_i 的变化即是 CCD 的输出信号。同时, I_i 的变化造成 I_0 和 V_0 的变化, 从而影响其它读出电路。

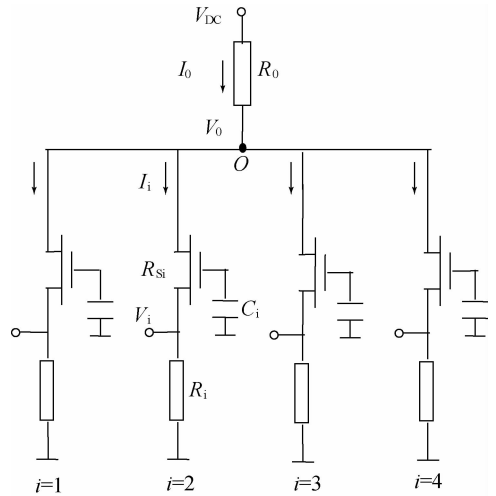


图 6 光斑阴影形成机理图

Fig. 6 Mechanism schematic of laser spot shadows

假设相对于上一像素周期,第 j 读出电路中 C_j 的注入电荷量发生变化,其它读出电路检测电容的电荷量不变,则在图 6 模型中发生变化的量为 R_{Si}, I_j, I_0 和 V_0 。为考察第 j 读出电路对第 i 读出电路的影响,联立式(2)、(3)和(4),消去除 I_i 与 I_j 以外的其它发生变化的量,得到如下公式:

$$I_i = \frac{V_{DC} - I_j R_0}{R_0 + (R_i + R_{Si}) \left(1 + \sum_{k \neq i, j} \frac{1P}{R_k + R_{Sk}} \right)}, \quad (5)$$

式中: i, j, k 为变量,取值为 1, 2, 3, 4;若 I_j 升高,则引起 I_i 降低;若 I_j 降低,则引起 I_i 升高,此即光斑阴影的产生机理。

3.2 阴影特性的解释

一般来说,在实际器件中满足 $R_0 \ll R_i, R_{Si}$, 由式(5)可知, I_j 的变化所能引起 I_i 的改变很小,普通的光照,并不能造成明显的阴影;因激光强度高,所造成的电流改变量较大,所以激光光斑能够形成明显的阴影。

CCD 中,信号读出时刻与其所在的像素位置对应;相对于每个像素单元的读出周期,并行读出

电路之间的影响可视为瞬时发生的事件,没有时间延迟;所以,只有同时读出的信号才会互相影响,它们所在的像素在四段 CCD 中所处的相对位置相同。这就解释了阴影与激光光斑在大小与形状上的相似性,也解释了光斑及其阴影之间的等间距(512 pixel)特性。

读出电路电流的变化由检测电容上的信号电荷量变化造成,而 CCD 的信号电荷量存在一个饱和值,它所引起的电流变化也存在饱和值,这就决定了光斑阴影深度的饱和特性。

在 CCD 器件制作过程中,各读出电路中的 R_i 与 R_{si} 并不能保证完全一致,使得式(5)中 I_i 的系数随读出电路而有所差异,这就是不同阴影区灰度下降程度不一致性的原因。根据系数公式还可推知,当激光辐照在不同读出电路对应的区域,所带来的阴影程度也会不同。

一般来说,在 CCD 相机系统的模数转换过程中,仅截取模拟信号的线性区来转化为数字信号。当阴影区内像素的信号达到一定强度而使其数字信号饱和时,图像中阴影即被淹没。

根据式(5),降低偏置源与并行读出电路之间的电阻,可降低阴影失真的程度。根据阴影的产生机理,用4个相同的电压源分别为4个并行读

出电路提供偏置,除去电路之间的公共节点,则会消除阴影失真现象。

4 结 论

为提高读出速度,大阵列 CCD 通常采用区域并行处理的读出方式;同时为避免在不同分段之间引入固定噪声,各检测端电路通常共用同一个偏置源,这就在并行读出电路之间引入了公共节点。公共节点的存在,使得各读出电路的信号相互影响。对于普通的光信号,这种影响极小,可以忽略。但对于激光信号来说,其强度可变的范围很大,当激光增强至一定程度,这种影响就会造成 CCD 输出图像的失真,表现为激光光斑的阴影。对于以 DALSA TDI IT-E4-2048B 型 CCD 为图像传感器的 Piranha HS-41-02K30 线扫相机,在 32 级时间延迟积分、2 000 Hz 行频输出的设置下,当其光敏面上 532 nm CW 激光强度达到 $4.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,就可造成较明显的阴影;当上述激光强度达到 $44 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,其阴影区的灰度下降已达饱和。本文推导的共偏置并行读出电路影响关系模型不仅可实现对阴影的解释,也可在 CCD 器件设计中为减弱或消除阴影失真提供一定借鉴。

参考文献:

- [1] 林棋榕,谢树森,周川钊,等. 激光-CCD 实时、无接触、动态线径测量的研究[J]. 光学精密工程, 1997,5(2):109-115.
LIN Q R, XIE S S, ZHOU C Z, *et al.*. Laser-CCD system for real-time, non-contact and dynamic measurement of diameter of wire [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,5(2):109-115. (in Chinese)
- [2] 陈骥,王鑫,曹久大,等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. 光学精密工程, 2008,16(4): 611-616.
CHEN J, WANG X, CAO J D, *et al.*. Development of high-speed CCD laser displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 611-616. (in Chinese)
- [3] 王希军. 激光散斑的亚像素位移法计算及比较[J]. 中国光学, 2012,5(6): 652-657.
WANG X J. Computation and comparison of laser speckle with sub-pixel measurement methods [J].

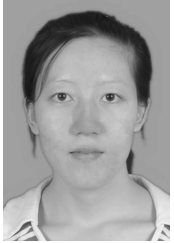
- Chinese Optics*, 2012, 5(6): 652-657. (in Chinese)
- [4] 王瑞,孙卫平,李红兵,等. 基于面阵 CCD 的激光高速摄影技术在弹道测试中的应用 [J]. 弹箭与制导学报, 2009,29(5):197-199.
WANG R, SUN W P, LI H B, *et al.*. Application of laser high-speed photography based on area-array CCD to Ballistic Test [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009,29(5):197-199. (in Chinese)
- [5] 刘秉琦,周斌,武东生,等. 双通道激光主动探测系统 [J]. 光学精密工程, 2012,20(2):241-246.
LIU B Q, ZHOU B, WU D S, *et al.*. Dual-channel active laser detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(2):241-246. (in Chinese)
- [6] 孟庆季,张续严,周凌,等. 机载激光 3D 探测成像系统的关键技术 [J]. 中国光学, 2011,4(3): 327-339.
MENG Q J, ZHANG X Y, ZHOU L, *et al.*. Key technologies of airborne laser 3D detection imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 327-339.

- (in Chinese)
- [7] 张磊,郭劲. 分体式激光扩束系统平行度测量装置的设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 789-795.
ZHANG L, GUO J. Design of parallelism measuring equipment for laser beams from independent laser expanding beam system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 789-795. (in Chinese)
- [8] 张爱丽,佟首峰,韩成,等. 基于 CCD 的光斑能量分布测量及特性分析 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 622-626.
ZHANG A L, TONG S F, HAN C, *et al.*. Facula energy measurement and analysis based on CCD [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(6): 622-626. (in Chinese)
- [9] 毕娟,张喜和,倪晓武. 长脉冲激光对组成 CCD 图像传感器的 MOS 光敏单元的硬破坏机理研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 114210-1-114210-6.
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): 114210-1-114210-6. (in Chinese)
- [10] 邱冬冬,张震,王睿,等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214006-1-0214006-5.
QIU D D, ZHANG Z, WANG R, *et al.*. Mechanism research of pulse-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2011, 31(2): 0214006-1-0214006-5. (in Chinese)
- [11] 蔡跃,叶锡生,马志亮,等. 170 ps 激光脉冲辐照可见光面阵 Si-CCD 的实验 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 457-462.
CAI Y, YE X S, MA Z L, *et al.*. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 457-462. (in Chinese)
- [12] 邵立,汪亚夫,宋伟. 连续激光干扰 CCD 成像研究 [J]. *激光杂志*, 2012, 33(2): 38-40.
SHAO L, WANG Y F, SONG W. Research on CW laser jamming CCD imaging [J]. *Laser journal*, 2012, 33(2): 38-40. (in Chinese)
- [13] JIANG T, ZHANG Z, CHENG X A, *et al.*. Study on vertical bright line image of CCD camera irradiated by laser [C]. *Proc. SPIE*, 2010, 7656: 76561A-1-76561A-5.
- [14] 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): 1505-1510.
ZHANG Z, JIANG T, CHENG X A, *et al.*. Gap on crosstalk line about CCD crosstalk effect induced by intense light and its mechanism [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1505-1510. (in Chinese)
- [15] 张震,程湘爱,姜宗福. 强光致 CCD 过饱和效应机理分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(2): 233-237.
ZHANG Z, CHENG X A, JIANG Z F. Mechanism analysis of CCD excessive saturation effect induced by intense laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 233-237. (in Chinese)
- [16] 张震,程湘爱,姜宗福,等. 高重频脉冲激光引起 CCD 视频中的动态次光斑现象研究 [J]. *应用激光*, 2010, 30(1): 45-49.
ZHANG Z, CHENG X A, JIANG Z F, *et al.*. Investigation into the dynamical subordinate facula in the video of the CCD irradiated by high repetition pulses laser [J]. *Applied Laser*, 2010, 30(1): 45-49. (in Chinese)
- [17] 张震,程湘爱,江天,等. 重频激光辐照面阵 CCD 的主光斑丢失现象及其原因 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(增): 429-432.
ZHANG Z, CHENG X A, JIANG T, *et al.*. Disappearing of main spots in the video of CCD camera being irradiated by repetition pulse laser and its reason [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(Supp.): 429-432. (in Chinese)
- [18] ZHANG Z, CHENG X A, JIANG T, *et al.*. A dazzling phenomenon of CW laser on linear CCD camera [J]. *Optik*, 2012, 123(3): 223-227.
- [19] SUN K, HUANG L J, CHENG X A, *et al.*. Analysis and simulation of the phenomenon of secondary spots of the TDI CCD camera irradiated by CW laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23901-23907.
- [20] ZHANG Z, CHENG X A, WANG R, *et al.*. Dazzling effect of repetitive short pulse laser on TDI camera [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2011, 49(2): 292-296.

作者简介:



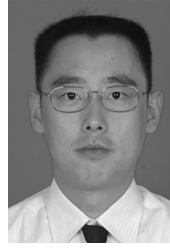
张震(1981—),男,山东日照人,博士,助理研究员,2003年于山东师范大学获得学士学位,2005年和2010年于国防科学技术大学分别获硕士、博士学位,现主要从事光电探测器的激光辐照效应研究。E-mail: zhyc8@126.com



周孟莲(1980—),女,河南焦作人,硕士,2002年于吉林大学得学士学位,2005年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事光学元件及光电器件的激光辐照效应研究, E-mail: menglianzhou@yahoo.cn



张检民(1982—),男,湖南祁阳人,硕士,助理研究员,2003年于中国科学技术大学获理学学士学位,2006年于西北核技术研究所获工学硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理及强光参数测量技术研究。E-mail: jmzhang82@gmail.com



韦成华(1974—),男,辽宁喀左人,硕士,副研究员,1996年和1999年于国防科学技术大学分别获学士、硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: 92dawei@163.com



冯国斌(1971—),男,湖北大冶人,硕士,研究员,1994年于国防科技大学获学士学位,2000年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: fenggb1971@163.com



叶锡生(1967—),男,江苏泰兴人,博士,研究员,1989年和1997年于浙江大学分别获学士、博士学位,现主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: yxschx@yeah.net

(本栏目编辑:李自乐)

(版权所有 未经许可 不得转载)