

文章编号 1004-924X(2013)07-1676-07

重复脉冲激光造成扫描型 CCD 背景条纹的规律

张震*, 周孟莲, 蔡跃, 张检民, 韦成华

(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:为了描述重复脉冲激光使扫描型 CCD 输出视频产生背景条纹的规律,基于这种背景条纹现象的产生机理对理想矩形脉冲激光产生的条纹建立了数学描述模型。通过该模型,可根据相机的时间延迟积分级数、单级积分时间和激光脉冲的脉宽、脉冲重复周期等参量之间的关系来判断背景条纹能否出现并计算背景条纹的尺寸参量,计算精确度为 1 pixel。利用重复皮秒脉冲激光和日光灯分别辐照扫描型 CCD 进行了实验,验证了上述模型计算结果的正确性。在该模型的基础上,结合背景光强与脉冲散射光强的关系,给出了条纹可见度的表达式,并通过实验验证了该表达式所反映出的条纹可见度随着相关参量变化的规律。

关键词:激光辐照;重复脉冲激光;背景条纹;扫描型 CCD

中图分类号:TN386.5;TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1676

Law of background fringes of scanning CCD induced by repetitive pulse lasers

ZHANG Zhen*, ZHOU Meng-lian, CAI Yue, ZHANG Jian-min, WEI Cheng-hua

(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: In order to obtain the generating law of background fringes in the video of a scanning CCD camera induced by repetitive pulse lasers, a mathematic model describing fringes induced by repetitive square pulse lasers is established. In this model, the relation of camera parameters including stage number of time delay integrations, integration time of one stage as well as laser pulse width and laser repetitive period can be used to estimate whether the fringes appear or not and to calculate what is the dimensions of fringes, in which the precision of calculation is 1 pixel. An experiment is performed by using repetitive picosecond pulse lasers and a fluorescent lamp to irradiate the scanning CCD camera respectively, and the results validate the correction of estimation and calculation based on the model. Finally, combing the intensity relation of background light and scattered laser with the model, the visibility expression of fringes is given, which is also validated in the experiment.

Key words: laser irradiation; repetitive pulse laser; background fringe; scanning CCD

收稿日期:2013-01-21;修订日期:2013-03-04.

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. SKL1111101)

1 引言

CCD是目前最重要的图像传感器,以它为核心的 CCD 相机已被广泛应用于生活、生产、科研和军事等各大领域,在拍摄、探测、测量和监控等方面发挥着重要的作用。在许多探测和测量工作中,CCD需结合激光来使用^[1-2]。但由于激光具有高亮度的特性,在其辐照下 CCD 相机会产生永久性破坏^[3-6]和暂时性失真^[7-15]两类基本问题,它们将影响 CCD 与激光在测量、探测方面的结合运用。充分认识激光造成 CCD 永久破坏和暂时失真的规律及产生机理,有助于改进 CCD 图像传感器或 CCD 相机系统的设计,在测量系统中正确匹配 CCD 和激光的有关参数并及时发现并矫正 CCD 与激光因匹配失误而产生的相关失真数据;从而减少 CCD 与激光结合测量、探测工作中的失误,为 CCD 与激光的结合测量、探测工作开拓更加广阔的空间。

目前,人们已经开展了大量关于 CCD 图像传感器或 CCD 相机的激光辐照问题的研究。研究表明:连续激光的热熔融^[3]、长脉冲激光的热应力^[4]、短脉冲的等离子体冲击^[5]与热熔融^[6]等会造成 CCD 的永久破坏;而面阵 CCD 相机在连续激光辐照下的饱和亮斑^[7]、串扰亮线^[8]、串扰线缺口^[9]、过饱和全黑屏^[10]和在重复脉冲激光辐照下的漂移亮点^[11]、主光斑丢失^[12],线阵^[13]和 TDI^[14](Time Delay Integration) CCD 在单束激光辐照下的多光斑现象以及 TDI CCD 重复窄脉冲激光辐照下的条纹现象^[15]等会造成 CCD 的暂时失真。综上可知,目前激光辐照问题的研究主要以面阵 CCD 为对象。对于永久性破坏,其机理主要由激光对 CCD 构成材料的破坏机理决定,而面阵、线阵或 TDI CCD 在破坏机理上没有区别,仅在破坏阈值上略有差别;对于暂时性失真,线阵或 TDI 扫描工作的特殊性会产生不同于面阵 CCD 的一些特殊的失真现象。

根据扫描工作的共同特点,本文将线阵和 TDI CCD 统称为扫描型 CCD,将线阵 CCD 视为时间延迟积分级数为 1 的 TDI CCD,利用 TDI CCD 积分级数、单级积分时间作为扫描型 CCD 的参数,利用脉宽和脉冲重复周期作为激光脉冲的参数,建立了一般脉宽的重复脉冲激光辐照

下形成的一般扫描型 CCD 视频条纹的模型,弥补了文献[14]中脉宽低于 TDI 单级积分时间的重复窄脉冲激光造成 TDI CCD 视频背景条纹模型的不足。

2 机理模型

激光的散射光弥漫于相机视场,它具有和激光相同的脉宽和重复频率。相机视场的亮度在重复脉冲散射光的影响下产生周期性闪烁。扫描型 CCD 相机输出视频中的行数据按时间顺序先后积分形成。在不同时间段积分形成的行数据,其背景亮度会因环境亮度闪烁而不同,由此形成视频背景中的条纹现象。本文通过建模描述这种条纹的尺寸及可见度等参数的规律。

设相机时间延迟积分(TDI)级数为 N ,单级积分时间为 τ ,则每行数据的总积分时间 T 为:

$$T = N\tau. \quad (1)$$

设激光的光脉宽和脉冲间隔分别为 τ' 、 τ'' ,则光脉冲周期 T' 为:

$$T' = \tau' + \tau''. \quad (2)$$

总存在正数 $\alpha = z + \beta$ 使下式成立:

$$T = (z + \beta)T'. \quad (3)$$

其中: z 为非负整数,而 β 需满足 $0 \leq \beta < 1$ 。

相机每行数据在总积分时间内都要接收 z 个完整的散射光脉冲信号。因此可定义视频中任意位置 (x, y) 处的亮度基准 $\overline{\omega(x, y)}$ 为:

$$\overline{\omega(x, y)} = \omega_0(x, y) + z\tau'I'(x, y), \quad (4)$$

式中: $\omega_0(x, y)$ 是在没有散射光脉冲存在时,背景通过总积分时间 T 在视频位置 (x, y) 处所贡献的亮度; $I'(x, y)$ 为散射光通过单位时间的积分在视频位置 (x, y) 处所贡献的亮度。

在除去 z 个光脉冲周期后,每行数据的总积分时间剩余 $\beta T'$;在此不足一个光脉冲周期的时间内,一行数据接收脉冲散射光信号的时间相对大小决定着它在视频中的相对亮暗。一行数据在 $\beta T'$ 内接收脉冲散射光信号时间的相对大小由该行数据总积分起始或结束时刻在光脉冲周期内所处的阶段决定,接收散射光信号的具体时间与光脉宽 τ' 、脉冲间隔 τ'' 和 $\beta T'$ 有关。在图 1 中,按 τ' 、 τ'' 和 $\beta T'$ 的关系分为 6 类。如图所示,在每类情形中以相同线型的成对竖线代表总积分的起止时刻;短线虚线对和实线对分别代表总积分开始时

刻处于脉冲起、止时刻的情况,圆点虚线对和圆点短线虚线对分别代表总积分结束时刻处于脉冲起、止时刻的情况。

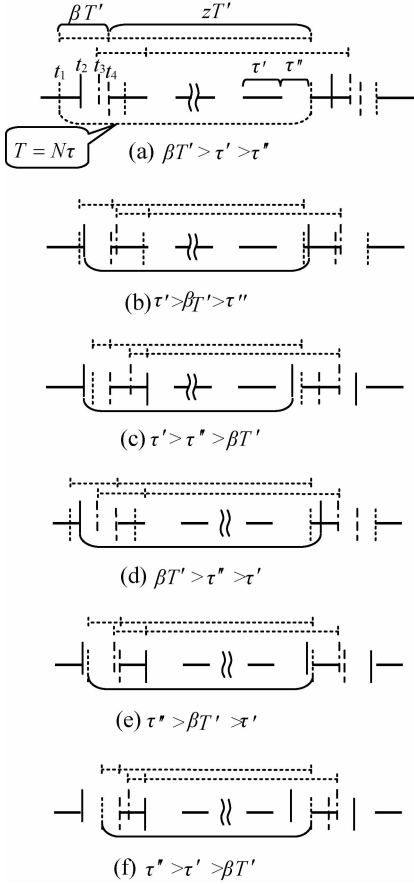


图 1 重复矩形脉冲光造成扫描型 CCD 视频背景条纹原理图

Fig. 1 Schematic diagram of background fringes in video of scanning CCD induced by repetitive square pulse laser

以图 1(a)为例对 $\beta T'$ 内接收散射光信号的时间进行说明,将其中圆点虚线对、实线虚线对、圆点短线虚线对和短线虚线对所代表的总积分时间的开始时刻分别记为 $t_1 > t_2 > t_3$ 和 t_4 。在 t_1 到 t_2 时刻之间开始积分的行在 $\beta T'$ 内散射光信号接收时间保持为 $\beta T' - \tau''$;从 t_2 起,后续开始积分的行,其散射光信号接收时间逐渐增加,至 t_3 开始积分的行,达到最大值 τ' ;从 t_3 到 t_4 开始积分的行,散射光信号接收时间保持为 τ' ;从 t_4 起开始积分的行,其散射光信号接收时间逐渐减小,直至下一脉冲周期的 t'_1 时刻,降至最小值 $\beta T' - \tau''$ 。综上可知,一个脉冲周期内开始积分的行,其散射光信号接收时间的起伏变化决定了行图像数据亮

度存在峰、坡和谷的起伏变化。信号接收时间决定的峰、谷亮度为:

$$\omega_p(x, y) = \overline{\omega(x, y)} + \tau' I(x, y),$$

$$\omega_v(x, y) = \overline{\omega(x, y)} + (\beta T' - \tau'') I'(x, y),$$

进而据此求出由峰谷所构成条纹的可见度如下:

$$V_f(x, y) = \frac{(1 - \beta)^{\tau'}}{\frac{2\omega_0(x, y)}{I'(x, y)} + (2z + 1)\tau' + \beta T' - \tau''}.$$

根据相机行输出频率 $F = 1/\tau$ 和行散射信号接收时间变化的转折时刻,求得以像素横向(垂直扫描方向)尺寸为单位的亮度分布峰、谷和坡宽度如下:

$$n_p = \frac{\tau_p}{\tau} = \frac{t_4 - t_3}{\tau} = \frac{\beta T' - \tau'}{\tau},$$

$$n_v = \frac{\tau_v}{\tau} = \frac{t_2 - t_1}{\tau} = \frac{\beta T' - \tau''}{\tau},$$

$$n_s = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{t_3 - t_2}{\tau} = \frac{t'_1 - t_4}{\tau} = \frac{(1 - \beta) T'}{\tau}.$$

按照上述过程逐一分析图 1(a)~(f) 的情况并概括分析结果可知,一行数据在 $\beta T'$ 内接收散射光脉冲信号的最长和最短时间 $\Delta t_{\max}, \Delta t_{\min}$ 如下:

$$\Delta t_{\max} = \min(\tau', \beta T'), \tag{5}$$

$$\Delta t_{\min} = \begin{cases} \beta T' - \tau'', & \beta T' > \tau'' \\ 0, & \beta T' < \tau'' \end{cases} \tag{6}$$

由此产生的亮度分布峰谷值及条纹可见度如下:

$$\omega_p(x, y) = \omega_0(x, y) + (z\tau' + \Delta t_{\max}) I'(x, y), \tag{7}$$

$$\omega_v(x, y) = \omega_0(x, y) + (z\tau' + \Delta t_{\min}) I'(x, y), \tag{8}$$

$$V_f(x, y) = \frac{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min})}{\frac{2\omega_0(x, y)}{I'(x, y)} + 2z\tau' + \Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}. \tag{9}$$

以像素横向尺寸为单位的亮度分布峰、谷和坡宽度为:

$$n_p = \frac{\tau_p}{\tau} = \frac{|\beta T' - \tau'|}{\tau}, \tag{10}$$

$$n_v = \frac{\tau_v}{\tau} = \frac{|\beta T' - \tau''|}{\tau}, \tag{11}$$

$$n_s = \frac{T' - \tau_p - \tau_v}{2\tau} =$$

$$\begin{cases} \frac{(1 - \beta) T'}{\tau}, & \max(\tau', \tau'', \beta T') = \beta T' \\ \frac{\min(\tau', \tau'', \beta T')}{\tau}, & \max(\tau', \tau'', \beta T') \neq \beta T' \end{cases} \tag{12}$$

公式(1)~(12)组即为描述重复矩形脉冲激光造成扫描型 CCD 相机视频背景条纹的数学模型。

根据模型,若 $\beta=0$,即相机一行数据的总积分时间能被激光脉冲周期整除,则激光脉冲散射光引起的环境亮度抖动不会在视频中造成条纹。若 $\beta \neq 0$,则需要根据可见度公式(9)来判断是否会出现明显条纹。由式(9)可知,若背景亮度远高于脉冲散射光亮度,或激光脉冲重复频率很高使积分时间与脉冲周期的倍数 z 很大,则条纹可见度很低,视频中也不会出现明显的条纹现象。

模型以像素个数表征条纹尺寸,故式(10)、(11)和(12)的计算结果需取整,结果中小数点后的数字由不足一个单级积分的散射光接收时间造成。在此时间内,散射光能否造成该行数据亮度的显著变化需根据散射光强度、相机灵敏度和积分时间与脉冲周期的倍数等许多实际情况而定,故以模型计算的结果将存在 1 pixel 的不确定度。

3 实验验证

图 2 和图 3 分别为 1 610 Hz 行输出频率 64 级积分 TDI CCD 相机,在 20 Hz 重复频率 10 ps 脉宽激光和 500 Hz 重复频率 15 ps 脉宽激光辐照下的输出图像。

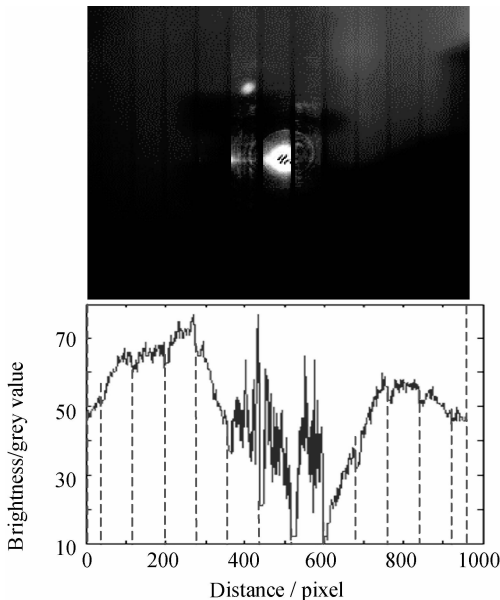


图 2 重复脉冲激光引起 TDICCD 视频的背景条纹
Fig.2 Background fringes in video of TDI CCD induced by repetitive pulse laser



图 3 TDI CCD 在重复脉冲激光辐照下无明显背景条纹的图像
Fig.3 Picture without obvious background fringes from TDI CCD under irradiation of repetitive pulse laser

通过条纹分析计算模型所需要的相机参数,得到:

$$\tau=1/F=1/1\ 610\ \text{s}=0.62\ \text{ms},$$

$$T=N\tau=64\times 0.62\ \text{ms}=40\ \text{ms}.$$

关于图 2 的激光参数:

$$T'=1/F'=1/20\ \text{s}=50\ \text{ms},$$

$$\tau'=10\ \text{ps},\tau''=50\ \text{ms}.$$

由公式(3)得到:

$$z=0,\beta=0.8.$$

将上述参数代入式(5)、(6)和(9),得:

$$V_i(x,y)=\frac{\tau'I'(x,y)}{2\omega_0(x,y)+\tau'I'(x,y)}.$$

一般来说,距离激光光斑距离越近的位置脉冲散射光强度越大,条纹可见度也就越大,此变化趋势与图 2 相符。再将参数代入式(10)、(11)和(12),计算得亮度分布的峰、谷和坡宽分别为 64, 16, 0 pixel,此结果与图 2 相符。

图 3 的激光参数为:

$$T'=1/F'=1/500\ \text{s}=2\ \text{ms},$$

$$\tau'=15\ \text{ps},\tau''=2\ \text{ms}.$$

由公式(3)得到:

$$z=20,\beta=0.$$

即相机总积分时间被激光脉冲周期整除,故无背景条纹现象产生,此结果与图 3 结果一致。

图 4、图 5 和图 6 分别为日光灯辐照环境下 1 610 Hz 行输出频率 64 级、24 级积分 TDI CCD 相机和 725 Hz 行输出频率单线阵 CCD 相机的输出图像。日光灯由 50 Hz 市电驱动,其闪光强度



图 4 日光灯照明环境中 TDI CCD 无背景条纹的视频
Fig. 4 Picture without background fringes from TDI CCD in illumination of fluorescence lamp

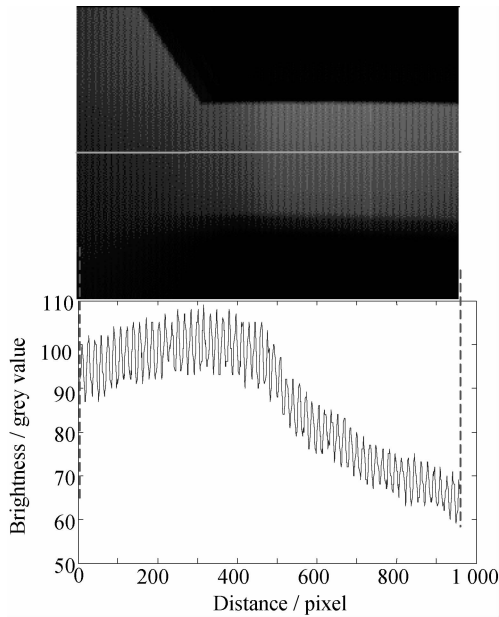


图 5 日光灯照明环境中 TDI CCD 存在背景条纹的图像
Fig. 5 Background fringes from TDI CCD in illumination of fluorescence lamp

由市电振荡正弦函数的平方决定,故日光灯的实际闪光频率为 100 Hz,强度半宽为半个周期。将日光灯近似为脉宽 5 ms 的矩形方波脉冲光,分析在其辐照下扫描型 CCD 视频背景条纹的形成情况。日光灯参数为:

$$T' = 1/F' = 1/100 \text{ s} = 10 \text{ ms},$$

$$\tau' = \tau'' = 5 \text{ ms}.$$

图 4 的相机参数与图 2 和图 3 一致。由公式(3)得到:

$$z = 4, \beta = 0.$$

根据模型分析可知,图中无背景条纹现象分

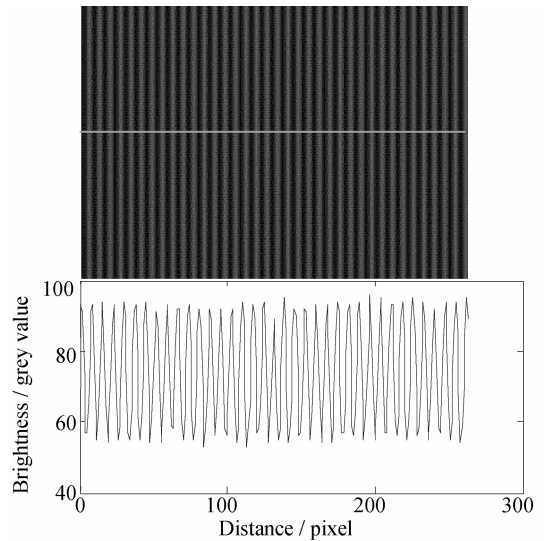


图 6 日光灯照明环境中线阵 CCD 输出的条纹图像
Fig. 6 Background fringes from linear CCD in illumination of fluorescence lamp

析结果与图 4 一致。

图 5 相机的积分级数为 24 级,其行输出频率仍与前者一致。故有:

$$T = N\tau = 24 \times 0.62 \text{ ms} = 15 \text{ ms}.$$

由公式(3)得:

$$z = 1, \beta = 0.5.$$

将上述参数代入公式(5)、(6)和(9)得:

$$V_f(x, y) = \frac{5I'(x, y)}{2\omega_0(x, y) + 15I'(x, y)} < \frac{1}{3}.$$

图中对日光灯反射强的区域对应的 $I'(x, y)$ 大,相应的条纹可见度就高,此结果与图 5 相符。再将参数代入公式(10)、(11)和(12),计算得亮度分布的峰、谷和坡宽分别为 0, 0.8 pixel, 在 1 pixel 的误差范围内,此结果与图 5 相符。

图 6 的相机参数为:

$$\tau/1/F = 1/725 \text{ s} = 1.38 \text{ ms} = T,$$

由公式(3)得:

$$z = 0, \beta = 0.14.$$

将上述参数代入公式(5)、(6)和(9)得:

$$V_f(x, y) = \frac{1.4I'(x, y)}{2\omega_0(x, y) + 1.4I'(x, y)}.$$

由此可知,若 $\omega_0(x, y)/I'(x, y)$ 相近,则图 6 条纹可见度远高于图 5,此分析结果与图 5、图 6 的实际比较结果一致。再将参数代入公式(10)、(11)和(12),计算得亮度分布的峰、谷和坡宽分别为 2.6, 2.6, 1 pixel,此计算结果反映出了图 6 的

画面显示结果。

4 结 论

扫描型 CCD 相机输出视频中的行数据是按时间顺序先后形成的。因此,其视场亮度随时间的抖动将可能在视频中造成亮度随空间分布的起伏变化,即形成视频中的背景条纹。激光具有高亮度,重复脉冲激光的散射光将引起环境亮度随时间的抖动,故在其辐照下的扫描型 CCD 视频背

景中可能出现条纹。条纹的出现条件及尺寸参数由扫描型 CCD 相机的单级积分时间、积分级数和激光脉冲的宽度、重复频率共同决定;而其可见度除与上述参数有关之外,还与激光散射光与背景光的亮度之比有关。本文建立了描述上述关系的数学模型,由该数学模型计算的条纹尺寸的精度为 1 pixel;通过一系列模型分析与实验数据的对比结果证实了本文所建模型的有效性。实验结果表明,利用所建模型对背景条纹现象的分析结果与实验数据一致,模型有效。

参考文献:

- [1] 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 SH, *et al.*. Dual-channel active laser detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(2):241-246. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 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 ZH, 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)
- [4] 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)
- [5] 蔡跃,叶锡生,马志亮,等. 170ps 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 SH, MA ZH 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)
- [6] 王明,王挺峰,邵俊峰. 面阵 CCD 相机的飞秒激光损伤分析[J]. 中国光学,2013,6(1):96-102.
WANG M, WANG T F, SHAO J F. Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(1):96-102. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] JIANG T, ZHANG Z, CHENG X A, *et al.*. Study on vertical bright line image of CCD camera irradiated by laser [J]. *SPIE*, 2010,7656:76561A-1-76561A-5.
- [9] 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 ZH, 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)
- [10] 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 ZH, 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)
- [11] 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 ZH, 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)

- [12] 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(Supp.):429-432.

ZHANG ZH, 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)

- [13] 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.

- [14] 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.

- [15] 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.

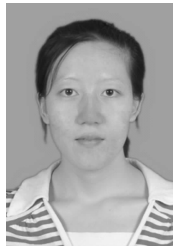
作者简介:



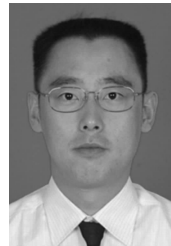
张震(1981—),男,山东日照人,博士,助理研究员,2003年于山东师范大学获得学士学位,2005年,2010年于国防科学技术大学分别获得硕士、博士学位,现主要从事光电探测器激光辐照效应的研究。E-mail: zhye8@126.com



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得学士学位,2006年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理及强光参数测量技术的研究。E-mail: jmzhang82@gmail.com



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



韦成华(1974—),男,辽宁喀左人,硕士,副研究员,1996年,1999年于国防科学技术大学分别获得学士、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



蔡跃(1975—),男,辽宁锦州人,硕士,助理研究员,2000年于中国科学技术大学获得学士学位,2009年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光辐照效应与机理的研究。E-mail: caiyc21@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)