

## 光学设计

# 强光作用下 CCD 串扰特征研究

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:**开展了不同 CCD 参数、不同激光参数条件下强光辐照 CCD 实验, 观察到了 CCD 串扰现象。从实验结果中获得以下结论: CCD 串扰与入射光波长相关, 任一列的串扰线灰度值分布与对应列上光强成正比, 任一行上的串扰线灰度值总和  $N$  与光强成正比, 任一行上的串扰线灰度值与行间转移时间成正比, 串扰线灰度值总和  $N$  与焦面处光斑形状、CCD 积分时间无关, 并给出了描述 CCD 串扰特性的数学表达式。

**关键词:** 行间转移 CCD; 串扰特征; 积分时间; 行周期

中图分类号: TN244 文献标识码: A 文章编号: 1673-1255(2017)-03-0006-05

## Research on CCD Crosstalk Feature Induced by Intense Light

GUAN Shang-hong, SI Han-ying

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

**Abstract:** The different phenomenon of interline transfer (IT) CCD crosstalk effect induced by intense light is observed with different CCD and laser parameters. Experimental results show that CCD crosstalk is related with incident light wavelength, the crosstalk line gray-scale value distribution in any column is in proportion to light intensity in corresponding column, the sum of the crosstalk line gray-scale value  $N$  in any line is in proportion to light intensity directly. The crosstalk line gray-scale value is in proportion to IT time in any line, and the sum of the crosstalk line gray-scale value  $N$  has no relation to the light spot in focal-plane and CCD integrated time. And the mathematic expression describing CCD crosstalk features is given.

**Key words:** interline transfer (IT) CCD; crosstalk feature; integrated time; period of interline

CCD 作为一种固体光电成像器件, 其具有体积小、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]</sup>。CCD 在强光作用下容易出现垂直方向的非成像亮线, 通常称为串扰现象<sup>[2-7]</sup>。文献[2]-文献[7]中分别描述了 CCD 的各种串扰现象, 文献[3]对脉冲作用下的对串扰线分布特征进行了报道和分析, 文献[4][5]对连续光作用下串扰线缺口及串扰线对时间的关系进行了介绍, 并给出相关的机理解释。

文中描述了 CCD 在高重频激光辐照下串扰效

应实验, 对入射光波长、帧转移时间、焦面光斑分布等因素对 CCD 串扰线的影响进行了分析, 综合 CCD 串扰特征基础上给出了描述 CCD 串扰规律的数学表达式。

## 1 实验概况

实验装置如图 1 所示。为实现激光波长可选择性, 选用波长范围 700~980 nm 可调谐的 80 MHz 飞秒激光器作为辐照光源。为实现实验条件精确控制和数据准确记录, 实验选择 IMPREX 公司 ICL-210

型黑白数字CCD,其积分时间可调、增益可控,像元数 $640 \times 480$ 、像元尺寸 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 、最大帧频260 fps。激光束经分数片1:1分光后分别进入功率计和CCD,二者实时记录激光功率和CCD图像。激光功率由中性衰减光学滤光片组成的衰减器控制。CCD输出8 bit 数字图像信号由计算机采集记录。

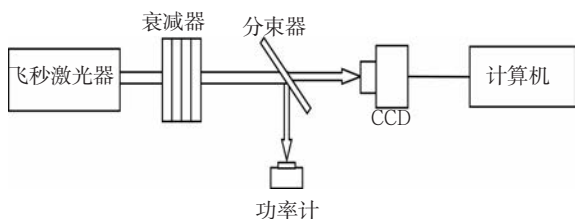


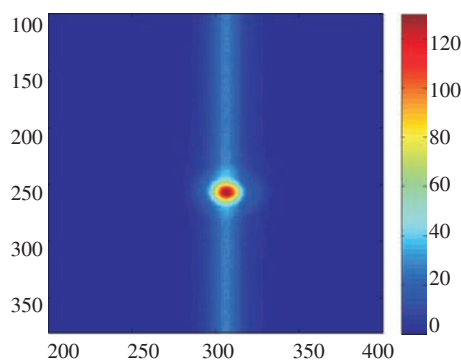
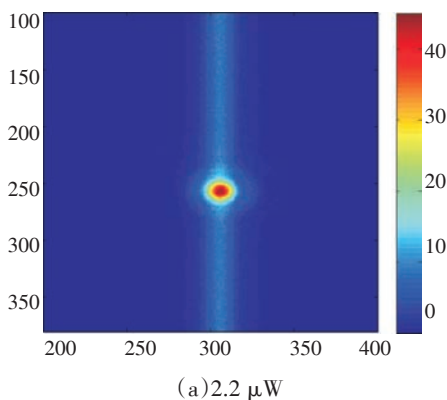
图1 实验装置示意图

## 2 实验结果及分析

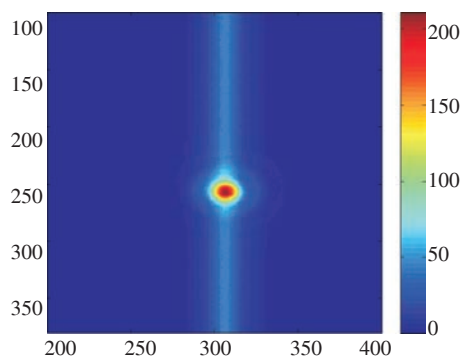
为了降低环境光对实验结果准确性的影响,实验在暗室环境中进行。为方便描述探测器像元位置上的串扰线分布,用 $S(i,j)$ 表示坐标为 $(i,j)$ 像元的串扰线灰度值。

### 2.1 激光功率对串扰线灰度值的影响

在CCD正常工作情况下,串扰现象出现在被辐照像元(主光斑)达到饱和状态之后<sup>[4]</sup>,串扰线在垂直方向穿过主光斑位置并与主光斑叠加<sup>[8-10]</sup>。为了降低主光斑对串扰结果的分析,可采用缩短CCD积分时间来减小主光斑。因此,实验中选取CCD的最短积分时间 $1 \mu\text{s}$ 、增益0 dB,测量了720 nm 相同辐照光斑不同激光功率条件下CCD的串扰线情况,结果如图2所示。



(b)6.1 μW



(c)10.1 μW

图2 不同激光功率下CCD串扰线

可以看出,在光斑相同不同激光功率辐照下的CCD串扰线形状相同,非主光斑位置的串扰线灰度值相邻行相同但相邻列不同,即 $S(i,j) = S(i+1,j), S(i,j) \neq S(i,j+1)$ ;随着辐照激光功率增大灰度值同时 $S(i,j)$ 增大。将非主光斑位置处任一行串扰灰度值 $S(i,j)$ 求和并记为 $N(i)$ ,实验结果表明,CCD串扰线也存在饱和现象,在串扰线未达到饱和前(串扰现象线性段), $N(i)$ 与入射激光功率 $P$ 成正比,如图3所示。

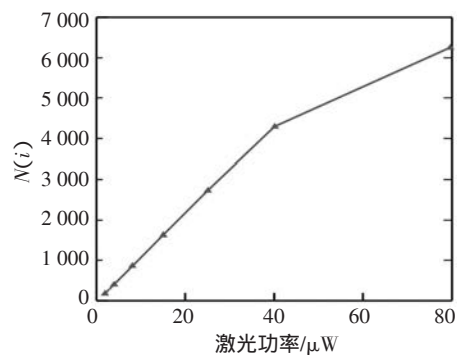


图3 CCD串扰线灰度值总和 $N(i)$ 与入射激光功率的关系

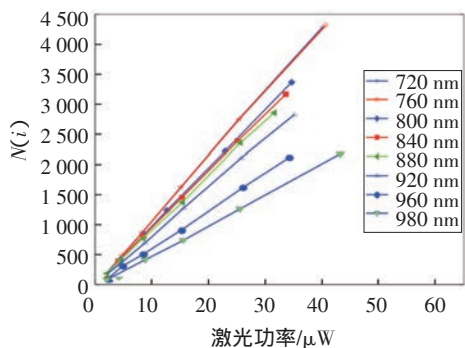
在线性段,可定义  $N(i)$  与激光功率  $P$  之比为 CCD 的串扰线响应系数  $\alpha$ , 则  $N(i)$  与入射光强之间的关系表示为

$$N(i) = \sum_j S(i,j) = \alpha(P - b) \quad (1)$$

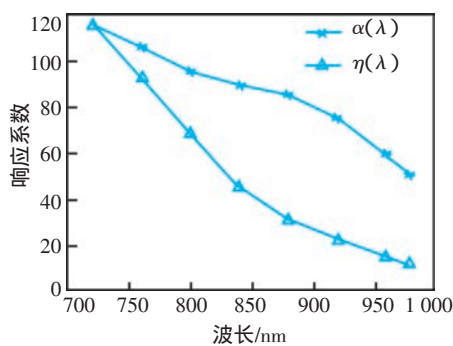
式中,串扰线响应系数  $\alpha$  单位为 DN/W;  $b$  为出现 CCD 串扰线的功率阈值。

## 2.2 激光波长对串扰线的影响

为了分析串扰线与入射波长之间的关系,分别进行了 720 nm、760 nm、800 nm、840 nm、880 nm、920 nm、960 nm 和 980 nm 等波长激光辐照 CCD 实验, CCD 参数与第 2.1 节完全相同。实验获得了多条串扰线响应曲线图 4a 所示。实验结果表明,串扰线响应系数  $\alpha$  是激光波长  $\lambda$  的函数,数据处理后获得了该 CCD 的串扰线响应系数  $\alpha(\lambda)$  如图 4b 所示。同时给出了以 720 nm 处的串扰响应率为基准的 CCD 正常光谱响应系数  $\eta(\lambda)$ , 可以看出, CCD 对入射光的串扰响应系数与正常响应系数均随波长增加逐渐下降,随着波长的增加串扰响应系数降低比正常光谱响应系数降低要小,说明二者之间的响应机理可能不同。



(a) 不同波长串扰与光功率的关系



(b) 串扰、正常响应系数比较

图4 CCD正常响应系数、串扰线响应系数与波长的关系

## 2.3 焦面光斑形状对串扰线的影响

为了分析 CCD 串扰线特征,研究 CCD 串扰线产生机理,进行了相同功率、不同光斑大小条件下的激光辐照 CCD 串扰实验,实验中通过精确调节光学系统成像距离来改变焦平面的光斑大小。实验中激光波长 780 nm,激光功率 9.8 μW, CCD 积分时间 1 μs,串扰线的实验结果如图 5 所示。

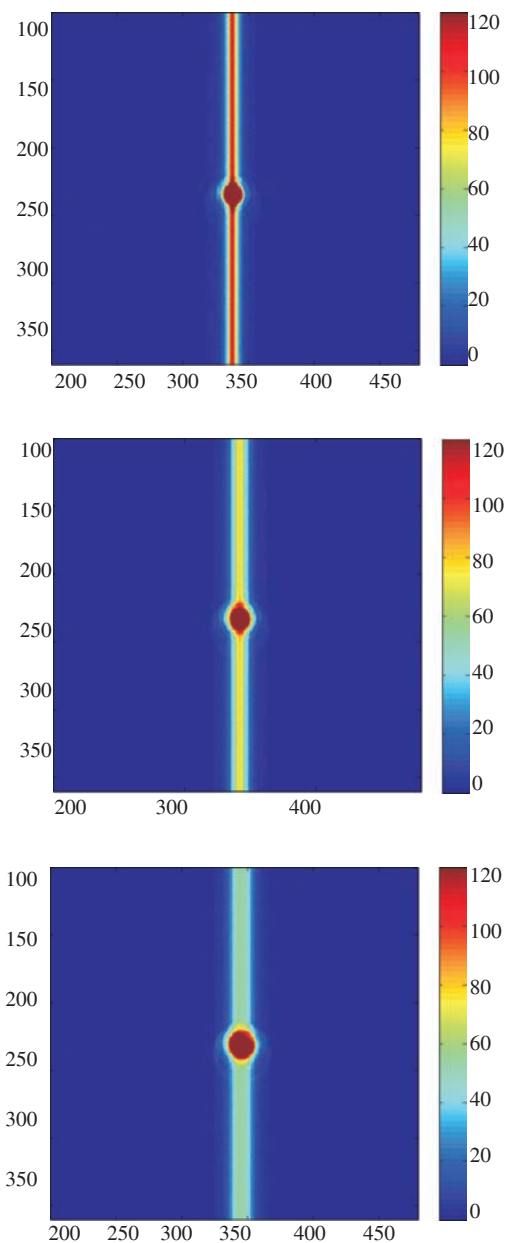


图5 不同光斑条件下 CCD 的串扰现象

### (1) 串扰线行分布

图5中,光斑直径占的像素个数分别为:17,20,

23,除光斑位置外,三种光斑条件下  $N(i)$  分别为: 943、949、955,说明  $N(i)$  受光斑大小影响很小到可以忽略,可以近似认为,不同光斑分布对 CCD 的串扰线的  $N(i)$  不产生影响。

## (2)串扰线列分布

本节上(1)中分析了串扰线中行方向灰度值与光斑分布的关系,为了分析串扰线在列方向与光斑的关系,将正常响应光斑在不同列的灰度值分别求和并记为  $M(j)$ ,根据正常响应可知  $M(j)$  与该列接收到的激光功率成正比。两种不同光斑大小条件下串扰线灰度值  $S(i,j)$  与相应列的  $M(j)$  之比的相对值结果如图6所示。

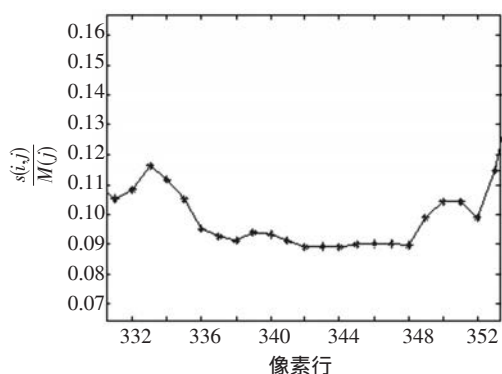


图6 不同光斑条件下CCD的串扰现象

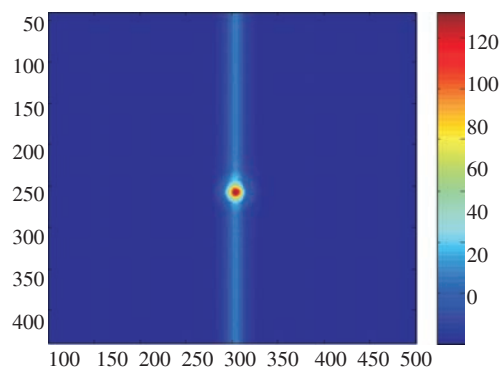
可以看出,CCD串扰线的灰度值  $S(i,j)$  与对应列上光斑的灰度值总和  $M(j)$  之比近似为常数,光斑外侧出现一定的起伏,经过分析认为是由于实验测量误差引起。上述实验结果说明,列方向上的激光光斑对串扰线灰度值均产生了贡献,且串扰线灰度值  $S(i,j)$  与对应列上光强  $M(j)$  之和满足正比关系。

## 2.4 积分时间对串扰线的影响

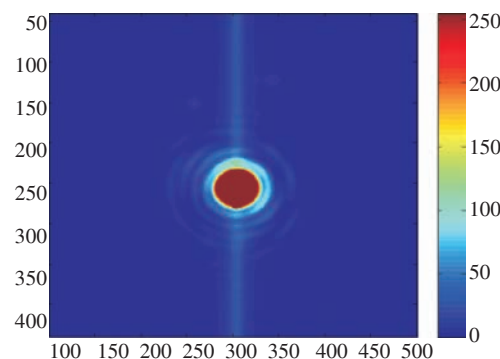
为了分析CCD串扰线与积分时间的关系,进行相同激光功率辐照不同积分时间内对CCD串扰特性实验。实验中CCD帧频保持207 fps不变,积分时间  $t_{int}$  分别选取  $1 \mu s$ 、 $3 \mu s$ 、 $10 \mu s$ 、 $30 \mu s$ 、 $100 \mu s$ 、 $300 \mu s$  等,实验结果如图7所示。

图7中,第3幅图为积分时间  $1 \mu s$  与  $300 \mu s$  实验采集到的光斑之差,从图中看出,在串扰线位置,不同积分时间的结果相减后串扰线灰度值基本为0(其他积分时间条件下进行相减可以获得相同的结果)。证明在不同积分时间下产生的串扰线完全相

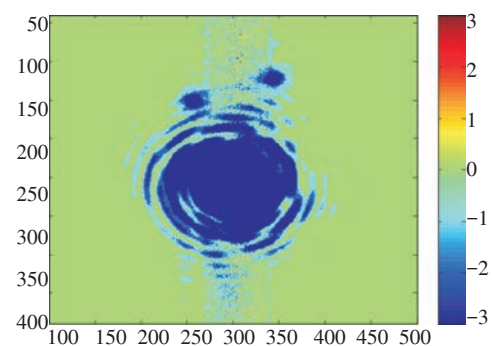
同,上述结果表明,CCD串扰效应与CCD积分时间无关。上述结果与文献[5]的结果一致。



(a)  $t=1 \mu s$



(b)  $t=300 \mu s$



(c) 不同的辐照值

图7 不同积分时间下CCD串扰线比较

## 2.5 行间转移时间对串扰线的影响

为了分析串扰线与CCD转移时间的关系,进行相同激光功率、不同帧频下CCD串扰特性实验,实验选取20~260 Hz范围的9个输出帧频,积分时间为  $1 \mu s$ ,实验结果如图8所示。

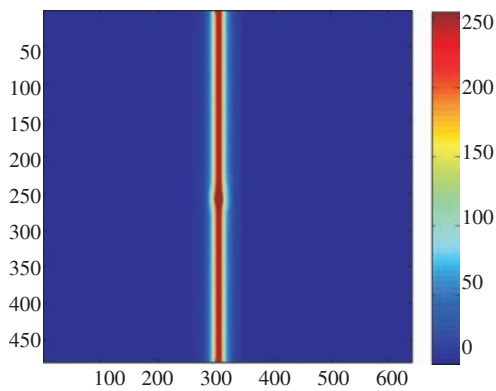
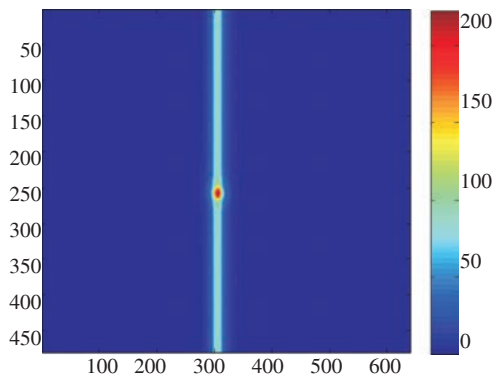
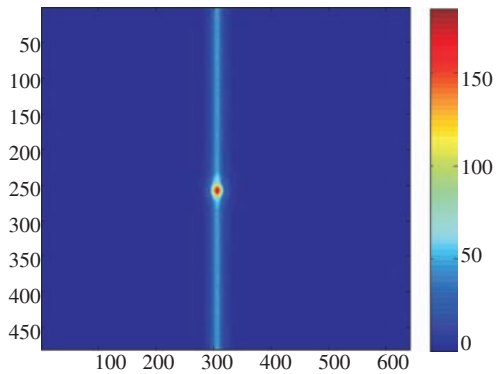
(a)  $f=20$  Hz(b)  $f=60$  Hz(c)  $f=120$  Hz

图8 不同帧频下CCD串扰线

图9为CCD任一行串扰线灰度值总和  $N(i)$  与CCD帧时  $t_{\text{frame}}$  关系。

可以看出,CCD串扰灰度值  $N(i)$  与CCD帧频相关,串扰线灰度值  $N(i)$  与CCD帧时  $t_{\text{frame}}$  成正比。因此,式(1)中串扰响应系数  $\alpha(\lambda)$  是时间的函数, $\alpha(\lambda)$  单位应该修正为  $\text{DL}/(\mu\text{W}\cdot\text{s})$ 。

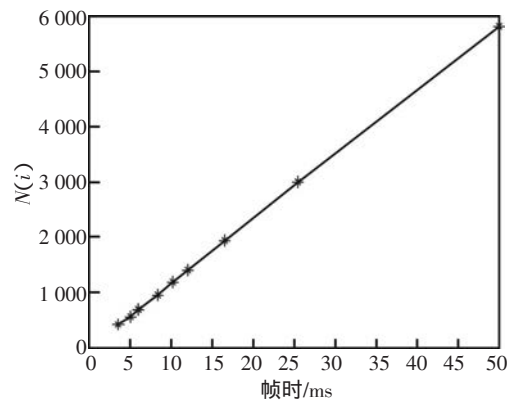


图9 CCD串扰线灰度值与CCD帧时的关系

### 3 串扰线特征的数学描述

通过实验方式获得了CCD串扰线各像元灰度值  $S(i,j)$  的特征,可将CCD串扰线  $S(i,j)$  的特征归结为以下5条:(1)各行相同,各列不同;(2)与对应列光强之和成正比;(3)是光波长  $\lambda$  的函数;(4)与CCD帧时  $t_{\text{frame}}$  成正比;(5)与CCD积分时间无关。因此,可以用式(2)来描述强光辐照下CCD中任意位置  $(i,j)$  像元因串扰产生的灰度值分布。

$$S(i,j) = \begin{cases} k\alpha(\lambda) \left( \sum_{i=1}^n (\bar{P}(i,j) - b) \right) \cdot t_{\text{frame}} & \bar{P}(i,j) - b > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\alpha(\lambda)$  为CCD在不同波长处的串扰响应系数,单位为  $\text{DL}/\text{J}$ ;  $\bar{P}(i,j)$  为  $(i,j)$  像元接收到的光功率;  $b$  为  $(i,j)$  像元产生串扰线的光功率阈值;  $t_{\text{frame}}$  为CCD帧时间;  $k$  为系数。

### 4 结论

通过激光辐照CCD实验研究,获得了行间转移CCD串扰线的5个特征,并对光波长、CCD积分时间、光斑面积、帧频等因素对串扰线的影响规律进行了分析。综合串扰线的特征给出了描述CCD任意位置  $(i,j)$  像元上因串扰效应产生灰度值  $S(i,j)$  的数学表达式。

### 参考文献

- [1] 米本和也. CCD/CMOS图像传感器基础与应用[M]. 北

(下转第27页)

强,一旦技术成熟,将广泛应用于各个领域,具有重要的意义。然而,激光等离子体通道引导高压放电的物理机制仍旧属于尚未解决的科学问题,对这一现象中的许多微观物理过程的研究还需要进一步深入,同时,由于受限于飞秒激光技术的发展,等离子体通道的放电距离还远未达到适用的阶段,这也是激光诱导放电需要迫切解决的问题。

### 参考文献

- [1] Sprangle P, Penano J R, Hafiz B. Propagation of intense short laser pulses in the atmosphere[J]. Phys Rev E, 2002, 66(4): 045418.
- [2] Gamal Y EE-D, Abdel-Moneim N M. Theoretical study of electrical breakdown in nitrogen induced by laser radiation at 1.06 $\mu\text{m}$  [J]. J Phys D: Appl Phys, 1987, 20(6): 757-761.
- [3] 杨小丽,王俊波,刘炎焱,等.脉冲激光作用下气溶胶导

致大气击穿研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(1): 157-160.

- [4] Sircar A, Dwivedi R K, Thareja R K. Laser induced breakdown of Ar, N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> gases using 1.064, 0.532, 0.355 and 0.266  $\mu\text{m}$  radiation[J]. Appl Phys B, 1996, 63(6): 623-627.
- [5] 韩晓玉,杨小丽.激光大气击穿阈值的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1655-1659.
- [6] 郝作强,张杰,俞进,等.空气中激光等离子体通道诊断方法比较研究[J]. 中国科学, 2006, 36(1): 38-45.
- [7] 张喆,张杰,李玉同,等.空气中激光等离子体通道导电性能的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 357-361.
- [8] 张杰,郝作强,远晓辉,等.超强飞秒激光脉冲在空气中传输研究[J]. 量子电子学报, 2005, 23(3): 282-284.
- [9] 张志刚.飞秒激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [10] 柴路,胡明列,方晓惠,等.光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013(1): 1-14.

### (上接第10页)

京: 科学出版社, 2006: 15-37.

- [2] Qi Feng-jie. Study on cross-talk of laser jamming on interline transfer CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014.
- [3] 陈前荣,亓凤杰,王彦斌,等.激光干扰CCD规则亮点分布原理研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 113-117.
- [4] 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.
- [5] 张震,程德艳,师宇斌,等. IT-CCD串扰强度与时间的无关性研究[J]. 现代应用物理, 2015, 6(2): 81-84.
- [6] 孙静,刘国栋,杜立峰,等. 激光探测过程中CCD的串音

饱和现象分析[J]. 光学技术, 2013, 39(6): 535-539.

- [7] 李晓英,牛春晖,郎晓萍,等. 面阵Si-基CCD串音干扰实验研究[J]. 激光杂志, 2016, 37(11): 24-27.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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.

### (上接第14页)

### 参考文献

- [1] 刘亚侠,阮锦,郝志航.线阵TDI CCD遥感相机非均匀性校正的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 749-751.
- [2] 岳俊华,李岩,武学颖,等.多TDICCD拼接相机成像非均匀性的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3084-3088.
- [3] 朱宏殷,郭永飞,司国良.多TDICCD拼接相机成像非均匀性实时校正的硬件实现[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 3034-3042.
- [4] 王文华,何斌,韩双丽,等.星上CCD成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.
- [5] 李新娥,班皓,沙巍,等.一种大视场TDICCD相机的多

传感器图像配准方法[J]. 液晶与显示, 2014, 29(4): 644-648.

- [6] 王运,颜昌翔.光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 661-667.
- [7] 许秀贞,李自田,薛利军.CCD噪声分析及处理技术[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 343-347.
- [8] 彭妮娜,陈大羽.采用线阵TDICCD相机的实时自动增益控制算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1370-1375.
- [9] 王亮,刘蓉,张丽,等.基于Fourier-Mellin变换的气象卫星光谱图像配准[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 855-858.