

面阵 CCD 相机的飞秒激光损伤分析

王 明^{1,2}, 王挺峰^{1*}, 邵俊峰^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研究了飞秒激光对 CCD 相机的干扰和损伤效应。采用波长为 800 nm, 脉宽为 100 fs, 单脉冲能量为 500 μJ 的脉冲激光辐照行间转移型面阵 CCD 相机, 测量了飞秒激光对 CCD 相机的损伤阈值。在逐步提高到达 CCD 靶面能量的过程中观察点损伤、线损伤和全靶面损伤等实验现象, 得到了点损伤阈值为 151.2 mJ/cm^2 , 线损伤阈值为 508.2 mJ/cm^2 , 全靶面损伤阈值为 5.91 J/cm^2 。测量了 CCD 在不同损伤情况下时钟信号线间及其与地间的电阻值, 通过对比 CCD 损伤前后的电阻值, 发现线损伤和全靶面损伤时 CCD 垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值明显变小。最后分析讨论了损伤部位和损伤机理。

关键词:飞秒脉冲激光; 激光损伤; 损伤阈值; CCD 相机; 破坏机理

中图分类号: TN249; V447.3 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20130601.0096

Analysis of femtosecond laser induced damage to array CCD camera

WANG Ming^{1,2}, WANG Ting-feng^{1*}, SHAO Jun-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wtfeng@sina.com

Abstract: The disturbing and damage effects of a femtosecond laser on the CCD camera were researched. A laser pulse with a wavelength of 800 nm, pulse width of 100 fs and a single pulse energy of 500 μJ was used to radiate an interline CCD solid-state image sensor and the damage threshold was measured in the experiment. The phenomenon of the point damage, line damage and the whole target surface damage were observed while increasing the energy of reaching CCD target surface, and the corresponding damage thresholds were 151.2 mJ/cm^2 , 508.2 mJ/cm^2 and 5.91 J/cm^2 , respectively. In the different damage situations of the CCD,

收稿日期: 2012-09-15; 修订日期: 2012-11-13

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLIM1004-02)

the resistance values between the clock signal lines, and between the clock signal line and the ground were measured. By contrasting the resistance values of the CCD before and after the damage, it was found that the resistance values between the vertical transfer clock signal lines decreased significantly, and the same results were achieved between the vertical transfer clock signal line and the ground. At last, the damage position and the damage mechanism were discussed.

Key words: femtosecond pulse laser; laser damage; damage threshold; CCD camera; damaging mechanism

1 引 言

电荷耦合器件 (CCD) 已广泛应用于军事领域,以 CCD 探测器为核心的光电装备极易受到激光的干扰和损伤,所以激光与 CCD 探测器件的相互作用一直是激光应用的重点研究内容。关于连续激光辐照和纳秒脉冲激光辐照 CCD 的研究,已有大量的文献报道^[1-4]。近年来,人们开始关注飞秒激光对 CCD 的干扰和损伤效应:江继军等人通过实验得到飞秒激光作用下 CCD 的损伤阈值比纳秒激光作用下的损伤阈值低 2~3 个量级^[5];李文煜等人对飞秒激光损伤 CCD 开展了实验研究,测得了部分损伤阈值,并且得到了随着重复频率的增加,损伤阈值降低的重要结论^[6];黄绍艳等人开展了 500 fs 超短脉冲激光对线阵 CCD 器件的辐照效应研究,得出了能量密度不同时,损伤原因分别为等离子体和电荷分离形成的电场的库仑力^[7]。不过现阶段飞秒激光对 CCD 损伤阈值的测试数据仍不足,有必要对其损伤机理做进一步分析讨论。本文主要利用 100 fs 脉冲激光辐照面阵 CCD,得到了其损伤阈值,并分析了其损伤部位和损伤原理。

2 实验原理

2.1 可见光 CCD 简介

所使用的可见光面阵 CCD 芯片型号为 Sony ICX055AL,其原理结构如图 1 所示。构成 CCD 的基本单元是金属-氧化物-半导体 (MOS) 结构,CCD 由光敏元阵列、垂直 CCD 移位寄存器阵列及水平 CCD 移位寄存器阵列 3 部分构成。

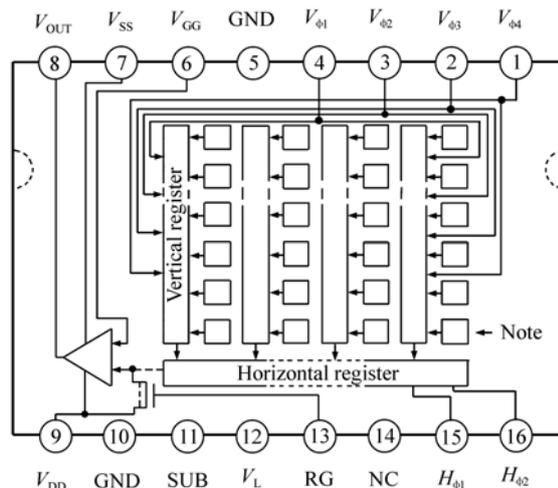


图 1 ICX055AL CCD 电路原理结构

Fig. 1 Block diagram and pin configuration of ICX055AL CCD

Sony ICX055AL 采用行间信号电荷转移方式。首先,光敏元受光后,在一定期间内进行光电转换与存储的信号电荷在垂直消隐的最后阶段针对所有的像素转移到相邻的垂直移位寄存器阵列;接着,读出移位到垂直移位寄存器阵列的信号电荷,在水平消隐期间,这些电荷逐行转移到水平移位寄存器中,在水平图像期间向 FD 放大器进行水平转移,将像素逐一转换成电压后输出,此时,完成光电转换的信号电荷在垂直 CCD 移位寄存器阵列进行逐行转移,光敏元进行下一个图像的光电转换。经后续视频处理电路处理后,输出信号成为视频信号。

2.2 激光与 CCD 器件的相互作用

激光对 CCD 的影响主要分为干扰和损伤两种类型。一般认为,干扰主要表现在光电材料或器件的功能退化或暂时失效,减弱或撤去光照后,

CCD 器件可恢复正常工作。损伤是指永久性破坏,撤去光照后,CCD 器件无法恢复正常工作。

超短脉冲激光的饱和干扰与连续激光和纳秒脉冲激光饱和干扰在机理上是相同的:像元饱和、串扰和全屏饱和是由 CCD 器件的结构所决定的。当辐照在 CCD 光敏元上的激光能量增大到一定程度时,将产生足够多的电子-空穴对并填满势阱,此时的输出电压信号将达到饱和,即像元饱和。当激光能量继续增加时,电子将穿越势垒向邻近的势阱中扩散,使得未被辐照的像元也会有电信号输出,即出现串扰。继续增加激光能量,将会出现全屏饱和现象。对于前照明式 CCD,激光对 MOS 结构 CCD 器件的破坏过程首先是对金属铝栅极膜和 SiO_2 的破坏,最后才是与 P 型 Si 物质相互作用。与纳秒脉冲激光相比,飞秒激光具有更短的脉冲,此时转换成的热量不能及时向外传

递,并且飞秒激光还具有超高的峰值功率,即功率密度非常大,所以更容易造成 CCD 器件的永久性损伤^[2,7]。

3 实验装置

实验使用的激光波长是 800 nm,脉宽为 100 fs,单脉冲能量为 500 μJ ,重频为 1 kHz(可外触发实现单脉冲输出),能量稳定度为 5%。CCD 图像传感器采用 Sony 公司生产的行间转移 ICX055AL 型面阵 CCD。能量计为 OPHIR 公司的 PE9F 和 PE50,量程分别为 0.3 ~ 1 mJ 和 25 μJ ~ 10 J。光学镜头型号是 Nikon 18 ~ 105 mm(实验中测得其对 800 nm 飞秒激光透过率为 0.688)。示波器型号为 TDS1012B-SC。实验装置如图 2 所示。

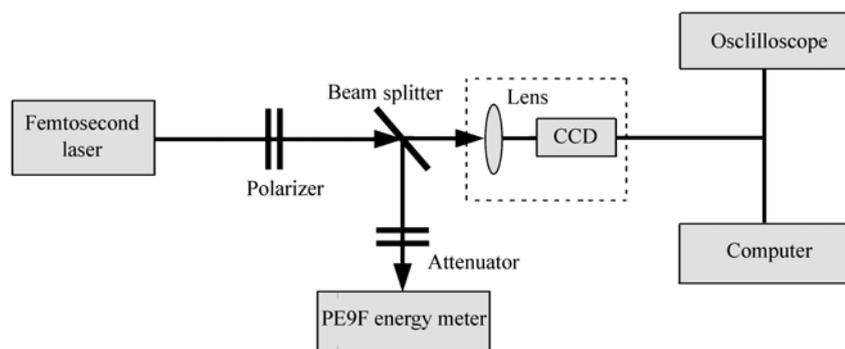


图 2 飞秒激光对 CCD 损伤的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of femtosecond laser damage to the CCD

实验中控制激光器实现单脉冲输出,使用偏振片控制飞秒激光到达分光镜的能量,经过分光镜后光束分为两束,一束经过衰减片到达能量计 PE9F,另一束进入光学系统。实验时先将能量计 PE50 放在光学系统前,进行能量比例标定。CCD 的输出信号被分成两路,一路送入计算机,实时观察并记录图像的变化,作为 CCD 损伤的判断依据;另一路连接到示波器,观察 CCD 的输出波形变化,可以判断损伤的效果。

4 实验结果与分析

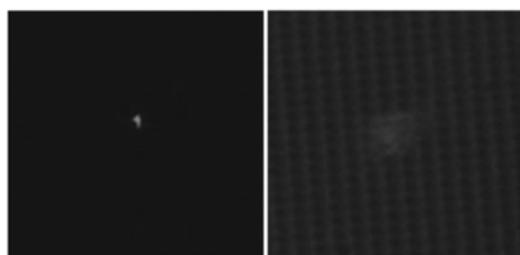
在开展损伤效应实验前,先进行分光镜分光

比例的标定:将能量计 PE50 放在光学系统处,其测得的值与能量计 PE9F 测得的值的比值(分光比)为 1.604。在实验过程中为了观察到 CCD 的工作状态随飞秒激光辐照能量密度变化的整个过程,首先要调节偏振片,使入射到 CCD 靶面的激光能量衰减到最小,然后调节偏振片,使入射到 CCD 靶面上的能量逐渐增加。在能量增加的过程中,CCD 工作状态从饱和到无法成像,根据 CCD 被破坏的情况不同,可以把 CCD 的硬破坏分为 3 个阶段:第一阶段是点损伤,在低能量密度的飞秒脉冲激光辐照下,首先会出现黑点,增大能量则会出现无法恢复的白斑;第二阶段是线损伤,飞秒脉冲激光辐照后,在损伤的光斑处,沿时钟线方

向出现白色亮线,此时其他部位仍可正常成像;第三阶段是全靶面损伤,在高能量密度的飞秒脉冲激光辐照后,CCD 彻底被破坏,无法正常成像。

4.1 点损伤

在逐步提高到达 CCD 靶面能量的过程中,首先会观察到 CCD 的像元饱和、串扰和全屏饱和,继续提高到靶能量,当能量密度增大到 109.1 mJ/cm^2 时,仍然会出现全屏饱和现象,当能量密度提高到 151.2 mJ/cm^2 时,观察视频输出图像会发现表面出现了白色的亮斑,关闭镜头的光圈,白斑依然存在,如图 3 所示;图 3(a) 为 CCD 视频输出图像;图 3(b) 为 CCD 表面损伤情况。



(a) CCD 视频输出图像 (b) CCD 表面损伤情况
(a) Video image of CCD (b) Surface damage of CCD

图 3 飞秒激光对 CCD 点损伤后的 CCD 视频输出图像及显微照片

Fig.3 Video image and microtopography of CCD after point damage

继续提高到达 CCD 靶面的能量,发现随着到达 CCD 靶面能量密度的增加,损伤的白色光斑也

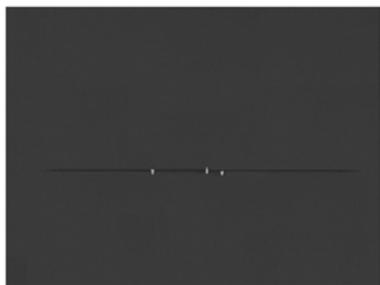


图 4 并排损伤达到 3 个白斑时的 CCD 视频输出图像

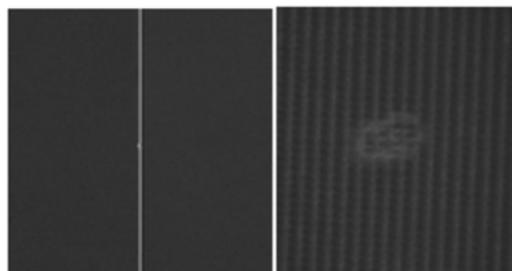
Fig.4 Video image of CCD after point damage with three points in a row

逐渐变大。当在水平方向(与垂直转移时钟线方向垂直)并排连续损伤达到 3 个白斑时,出现一条黑线,黑线穿过 3 个白斑,如图 4 所示。

用万用表测量 CCD 发生点损伤后垂直转移时钟线间及其与地间的电阻以及水平转移时钟线间及其与地间的电阻,在一定允许误差下与损伤前完好 CCD 的对应电阻值比较,未发现时钟信号线间及其与地间的电阻值有明显的变化(测量电阻时 CCD 仍在电路板上)。

4.2 线损伤

提高到达 CCD 靶面的能量,当能量密度增大到 508.2 mJ/cm^2 时,观察飞秒脉冲激光辐照后 CCD 的视频输出图像,可见在原飞秒激光光斑辐照的位置处,沿着垂直转移时钟线方向出现一条竖直的白色亮线,关闭镜头的光圈亮线依然存在,如图 5 所示;图 5(a) 为 CCD 视频输出图像;图 5(b) 为 CCD 表面损伤情况。继续提高到达 CCD 靶面的能量,发现损伤造成的白色亮线变宽。



(a) CCD 视频输出图像 (b) CCD 表面损伤情况
(a) Video image of CCD (b) Surface damage of CCD

图 5 飞秒激光对 CCD 线损伤后的 CCD 视频输出图像及显微照片

Fig.5 Video image and microtopography of CCD after line damage

用万用表测量水平转移时钟线间及其与地间的电阻,在一定允许误差下与损伤前完好 CCD 的对应电阻值比较,未发现电阻有明显变化(测量电阻时 CCD 仍在电路板上);但发现垂直转移时钟线间及其与地间的电阻发生了明显的变化,CCD 线损伤前后的电阻值如表 1 所示;V1、V2、V3、V4 为 CCD 芯片的垂直转移时钟信号输入引脚;GND 为 CCD 芯片上的地引脚。

表1 垂直时钟线间及与地间的电阻值

Table 1 Resistance values between vertical clock lines and the ground

	V1		V2		V3		V4	
	完好	线损伤后	完好	线损伤后	完好	线损伤后	完好	线损伤后
V1	-	-						
V2	>40 MΩ	4.10 MΩ	-	-				
V3	>40 MΩ	65.32 kΩ	>40 MΩ	4.11 MΩ	-	-		
V4	>40 MΩ	1.7 MΩ	>40 MΩ	4.71 MΩ	>40 MΩ	1.86 MΩ	-	-
GND	>40 MΩ	33.15 kΩ	>40 MΩ	4.16 MΩ	>40 MΩ	32.42 kΩ	>40 MΩ	1.62 MΩ

4.3 全靶面损伤

当能量密度增大到 5.91 J/cm^2 时,飞秒脉冲激光辐照后整个 CCD 视频输出图像变白,数秒钟过后,CCD 仍无法成像,说明 CCD 已被永久损伤。用显微镜观察 CCD 表面,损伤情况如图 6 所示。用万用表测量水平转移时钟线间及其与地间的电阻,在一定的误差允许下与损伤前完好 CCD 的对应电阻值比较,未发现电阻有明显变化(测量电阻时 CCD 仍在电路板上),但发现垂直转移时钟线间及其与地间的电阻发生了明显的变化,CCD 全靶面损伤前后的电阻值如表 2 所示。

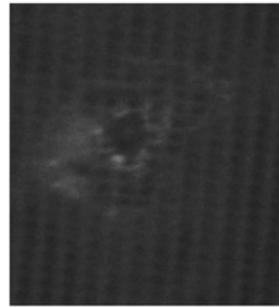


图6 飞秒激光对 CCD 全靶面损伤后的 CCD 视频输出图像

Fig.6 Video image of CCD after whole target surface damage

表2 垂直时钟线间及与地间的电阻值

Table 2 Resistance values between vertical clock lines and the ground

	V1		V2		V3		V4	
	完好	损伤后	损伤前	损伤后	损伤前	损伤后	损伤前	损伤后
V1	-	-						
V2	>40 MΩ	4.50 MΩ	-	-				
V3	>40 MΩ	0.82 MΩ	>40 MΩ	4.05 MΩ	-	-		
V4	>40 MΩ	91.30 kΩ	>40 MΩ	4.80 MΩ	>40 MΩ	1.10 MΩ	-	-
GND	>40 MΩ	2.49 MΩ	>40 MΩ	3.60 MΩ	>40 MΩ	30.62 kΩ	>40 MΩ	2.41 MΩ

4.4 实验结果分析

在能量的增加过程中,观察到了同连续激光辐照和纳秒脉冲激光辐照相同的实验现象,首先出现像元饱和、串扰和全屏饱和现象,然后是点损伤和线损伤,最后 CCD 被完全破坏,无法成像。实验测得飞秒脉冲激光损伤 CCD 的点损伤阈值为 151.2 mJ/cm^2 (出现白斑时认为是点损伤),对比参考文献[1]和[8],小于纳秒脉冲激光损伤数据($\sim 1 \text{ J/cm}^2$)。

在点损伤后,利用万用表测量转移时钟线间

及其与地间的电阻,通过与损伤前完好 CCD 的电阻值比较发现:点损伤没有使 CCD 芯片的时钟线间及时钟线与地间的电阻值发生变化。通过图 2 右侧 CCD 表面的损伤情况可以看出,点损伤时破坏了 CCD 表面的第一层;点损伤后,其它部位依然可以正常成像,可以推断点损伤只是破坏了损伤部位的像元。通过表 1 可以看出,线损伤时水平转移时钟线间及其与地间的电阻值基本没有发生变化,而垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值明显变小。通过图 4 可以看出,线损伤时 CCD

表面的第一层已经完全脱落,内部的网格已经暴露出来。可以推断线损伤时 CCD 的表面已经因为飞秒激光脉冲的辐照造成了电荷转移电路的短路或断路,致使垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值明显变小。线损伤时,除了白色亮线无法成像外,其余部分仍然可以成像,由此可知线损伤只是破坏了损伤部位的像元及其所在的电荷转移电路,并没有对其它部位的成像产生影响。全靶面损伤后,通过表 2 可以看出水平转移时钟线间及其与地间的电阻值基本没有发生变化,而垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值明显变小。说明在飞秒激光脉冲的辐照下,垂直转移电荷电路出现了短路或断路,致使垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值明显变小。从图 5 可以看出,全靶面损伤时 CCD 表面至少损坏到了第三层,第一层下面的网格也已经被破坏,破坏的程度比线损伤更加严重,已经使整个 CCD 像元的电荷储存和

转移无法正常完成,导致 CCD 无法正常成像。

5 结 论

本文利用脉宽为 100 fs 的飞秒激光对 Sony 公司 ICX055AL 型号的行间转移型 CCD 探测器进行单脉冲损伤实验,实验中发现了与纳秒脉冲激光损伤过程相同的损伤现象。实验测得点损伤(刚出现白斑时)阈值为 151.2 mJ/cm^2 ,线损伤阈值为 508.2 mJ/cm^2 ,全靶面损伤阈值为 5.91 J/cm^2 。实验中测得线损伤和全靶面损伤 CCD 的垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值变小,说明损伤部位的像元已经被破坏,像元所在的电荷转移电路间及其与地间的电路发生了短路或断路。当能量密度超过 5.91 J/cm^2 时,CCD 被严重损坏,电荷无法正常储存和转移,致使 CCD 无法成像。

参考文献:

- [1] ZHANG C Z, BLARRE L D, WALSER R M, *et al.*. Mechanism for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(27): 5201-5210.
- [2] 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*, 1988, 10(4): 537-542.
ZHONG H R, LU Q SH, WEN T F, *et al.*. Review on the laser-induced damage mechanism of CCD detector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1988, 10(4): 537-542. (in Chinese)
- [3] 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 ZH. Measurement of laser damaging thresholds of CCD devices[J]. *Laser Technology*, 1994, 18(3): 153-156. (in Chinese)
- [4] 钟海荣, 刘天华, 陆启生. 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 SH. Review on the laser - include damage mechanism study of photoelectric detector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 423-428. (in Chinese)
- [5] 江继军, 罗福, 陈建国. CCD 在 fs 激光辐照下的损伤研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(4): 515-517.
JIANG J J, LUO F, CHEN J G. Research on femtosecond laser induced damage to CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 515-517. (in Chinese)
- [6] 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.
GUO SH F, CHENG X A, FU X Q, *et al.*. Failure of array CCD irradiated by high - repetitive femto-second laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1783-1786. (in Chinese)
- [7] 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): 1145-1148.
HUANG SH Y, ZHANG Y SH, TANG B Q, *et al.*. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1145-1148. (in Chinese)
- [8] 姜楠, 张维, 牛燕雄, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(10): 1004-1007.
JIANG N, ZHANG CH, NIU Y X, *et al.*. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser*

- Infrared,2008,38(10):1004-1007. (in Chinese)
- [9] TIEN A C. Ultrafast electron dynamics in femtosecond laser dielectric breakdown[D]. Ann Arbor:University of Michigan, 1999.
- [10] 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 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)
- [11] 李文煜,王金宝,程湘爱,等. 激光对面阵 CCD 器件破坏的一种新机理[J]. 强激光与粒子束,2005,17(10):1457-1460.
LI W Y, WANG J B, CHENG X A, *et al.*. New analysis on laser-induced damage mechanism of array CCD device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005,17(10):1457-1460. (in Chinese)
- [12] 沈红斌,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.
SHEN H B, SHEN X J, ZHOU B, *et al.*. Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009,21(10):1449-1454. (in Chinese)

作者简介:



王 明(1986—),男,吉林伊通人,硕士研究生,2010 年于吉林大学获得学士学位,主要从事激光应用相关的研究工作。E-mail:wm8607@yahoo.cn



邵俊峰(1984—),男,安徽宿州人,博士研究生,助理研究员,2006 年于复旦大学获得学士学位,2009 年于复旦大学获得硕士学位,主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail:shaojunfeng1984@163.com



王挺峰(1977—),男,山东文登人,博士,副研究员,硕士生导师,1999 年于原吉林工业大学获得学士学位,2002 年于吉林大学获得硕士学位,2005 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光应用技术方面的研究。E-mail:wtfeng@sina.com