

激光脉冲串对电荷耦合器件积累损伤效应研究

邵俊峰, 郭 劲, 王挺峰, 郑长彬

(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)

摘要: 为了研究激光脉冲串对光电系统的损伤和致盲机理, 开展了重频纳秒激光对黑白行间转移相机电荷耦合器件的损伤实验研究。实验结果表明: 存在两种积累损伤效应机理, 多个脉冲到达 CCD 靶面同一位置的损伤或致盲具有积累效应, 多个脉冲积累损伤能够显著降低线损伤和全靶面损伤阈值, 降低程度与脉冲个数、激光到靶能量密度有关。致盲机理与单脉冲致盲机理相同, 均表现为器件垂直转移电路间及地间的短路; 而激光脉冲串到达 CCD 靶面的不同位置也能够实现器件的功能性失效, 其机制与单脉冲损伤显著不同, 仅表现为线损伤的叠加, 并未造成器件电路紊乱, 功能性损伤阈值即对应线损伤阈值 660 mJ/cm^2 , 而小于单次致盲阈值 $1\ 500 \sim 2\ 200 \text{ mJ/cm}^2$ 。

关键词: 脉冲激光; 损伤机理; 电荷耦合器件; 功能性失效

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1003002

Damage accumulation effects of multiple laser pulses irradiated on charged coupled device

Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng, Zheng Changbin

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Experimental research on pulsed nanosecond laser irradiation on Charged Coupled Device was carried out to understand the damage and blindness mechanism of multiple pulses interaction with EO systems. The results showed two distinctive damage effects and mechanisms. It exhibited damage and blindness accumulation effects and damage threshold reducing outcomes with multiple pulses arriving at the same spot on CCD, including point-to-line damage and line-to-full frame blindness. The threshold reducing outcomes is closely related with pulse number and laser fluence with the same mechanism as single short blindness. However, the damage mechanism for multiple-pulse damage to different pixels is obviously different, which attributes to a multiple vertical line damage superposed effect without electrical disorder. The functional blindness threshold is identified with line damage threshold 660 mJ/cm^2 , and evidently less than that of single-pulse blindness threshold $1\ 500 \sim 2\ 200 \text{ mJ/cm}^2$.

Key words: pulsed laser; damage mechanism; charged coupled device; function failure

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-09-23

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室自主基金课题(SKLLIM-1503); 光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(GKCP2016004)

作者简介: 邵俊峰(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光辐照效应方面的研究。Email: 13159754836@163.com

0 引言

电荷耦合器件(CCD)广泛应用于工业、国防领域光电监视和侦察,但是 CCD 极易受到激光的干扰与破坏而无法正常工作,因此开展激光对 CCD 探测器件的干扰及破坏机理研究具有重要实际意义。国外系统地开展了激光辐照探测器件相关的研究^[1-2],并对硅材料的激光损伤开展了相关研究^[3-5]。国内近年来也在不同激光对各种类型探测器件的干扰阈值、损伤阈值及致盲阈值等方面开展了大量实验和理论分析工作^[6-11]。郭少峰等人^[6]指出 CCD 在飞秒激光作用下与纳秒激光相比,没有更多新现象。沈红斌等人^[8]指出 CCD 在单脉冲激光作用下器件功能性失效机理由垂直转移电路之间的短路引起。叶锡生等人^[9]报道了皮秒脉冲激光的损伤效应和机理。目前,对激光多脉冲累积造成器件损伤的论文报道仍然较少,特别是对多种损伤机理还没有清晰认识。文中旨在分析激光脉冲串对 CCD 的损伤效应和机理。开展了多脉冲纳秒激光对 CCD 器件的损伤效应研究。对单脉冲、多脉冲激光导致器件脉冲串累积损伤、功能性失效的机理进行了初步分析,讨论了重频、激光到靶能量密度以及相对运动等因素的影响。

1 实验方法

为研究激光脉冲串对电荷耦合器件多脉冲损伤效应和机理,建立了基于电动转台的实验测试平台。实验的难点是需要获得较为精确的损伤阈值数据以分析损伤效应和机理。一方面,通过监视光路方式保证能量测试精度,其精度可控制到 $\pm 3\%$;另一方面,根据激光传输变换理论可知激光通过光学系统的光斑尺寸与光学系统焦距 F 、光学系统离焦特性、激光束腰位置、激光发散角 θ 等因素密切相关,其光斑直径范围可从衍射极限 $2.44 \lambda F/D$ (微米量级)一直变化到 $F\theta$ (几十至百微米),光斑面积变化可达 100 倍以上。因此,到靶(到达 CCD 靶面)光斑尺寸准确测量至关重要。

本节首先介绍了实验测试平台组成和实验中使用的设备具体参数,然后给出了一种直接利用受试 CCD 提取光斑、计算光斑尺寸的实验方法,以解决到靶光斑尺寸的测量问题。

1.1 仪器设备与实验方案

实验系统由激光器系统、面阵相机光电成像系统和电动转台组成,如图 1 所示。激光器与光学系统之间的距离固定为 0.5 m。实验中使用北京国科世纪激光技术有限公司生产的固体激光器,波长 $\lambda=532 \text{ nm}$ 、发散角 $\theta=5.5 \text{ mrad}$ 、光束质量 $M^2=3$,单脉冲能量最大 1 mJ,可单脉冲外触发输出。实验中使用的相机为 HS-6601 型黑白行间转移相机,其光电成像器件为高灵敏度的 Sony ICX419AL 行间转移型标准 1/2in(1 in=2.54 cm)芯片,尺寸 6.5 mm \times 5.9 mm,像元尺寸 8.6 μm (H) \times 8.3 μm (V)。芯片共 20 管脚,垂直转移电路采用四路高低电平实现,水平转移电路采用两路高低电平实现。实验中光学镜头焦距 $F=20 \text{ mm}$ 、相对孔径 $F/D=1.2$,实验测得光学镜头 532 nm 的光学透过率为 0.60。所用电动转台转速最高可达 30($^\circ$)/s。能量计使用以色列产 Ophir PE-9,灵敏度可达纳焦量级,功率计 Ophir 3 W 灵敏度能达到十微瓦量级。

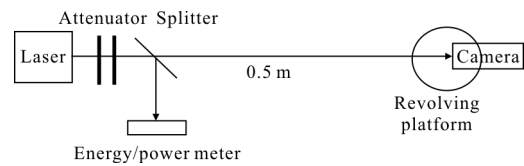


图 1 多脉冲皮秒激光 CCD 损伤阈值测试方法

Fig.1 Test method of damage threshold of multiple-pulse picosecond laser interaction with CCD

前期实验已经发现了不同类型的损伤效应^[12],这里开展了两种不同方式的损伤实验分别对两种典型情况进行对比分析:(1)激光与受试光电系统的相对位置不变,使得多个脉冲入射到电荷耦合器件的同一位置,进而研究多脉冲累积效应;(2)使用电动转台控制光学系统匀速运动,以控制脉冲激光与光学系统的交汇时间和相对角速度,保证脉冲到达电荷耦合器件的特定间距。

实验内容如下:

(1) 首先,保持电动转台静止,调整成像系统使激光器位于成像系统视场内,并使激光完全进入光学系统入瞳,从而保证激光脉冲能够到达 CCD 靶面。记录弱激光条件下到达 CCD 靶面的光斑分布。进行多脉冲激光实验时,激光器采用单脉冲外触发控制。不断提高到达成像系统脉冲激光的脉冲能量,记录 CCD 器件从点损伤、线损伤直至功能失效的全

过程。此时电动转台未开启。

(2) 其次,使电动转台静止,调整激光器的摆放使激光指向光学系统入瞳,然后调整成像系统使激光器位于成像系统视场内,从而保证激光脉冲能够到达 CCD 靶面。记录弱激光条件下到达 CCD 靶面光斑分布。进行动态脉冲串损伤实验时,激光器重频设置为 5 Hz,电动转台与探测器的相对角速度固定为 1.75(°)/s,此时,脉冲到靶间隔为激光光斑直径 122 μm。然后不断提高到达成像系统脉冲激光的脉冲能量,记录 CCD 器件从点损伤、线损伤直至功能失效的全过程。

1.2 光斑尺寸计算理论

这里利用二阶矩方法直接测量受试光学系统的到靶光斑。二阶矩范围内光斑能量占比 86.5%,其定义为四倍的能量分布标准差(X、Y 方向独立计算)。

$$d_{ox} = 4\sigma_x \quad (1)$$

$$d_{oy} = 4\sigma_y \quad (2)$$

式中: d_{ox} 、 d_{oy} 分别为 X、Y 方向光斑尺寸的直径; σ 为光斑能量分布的标准差。

标准差由激光能量分布方差计算得到:

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_x \sum_y (x-\bar{x})^2 \cdot Z(x,y)}{\sum_x \sum_y Z(x,y)} \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_x \sum_y (y-\bar{y})^2 \cdot Z(x,y)}{\sum_x \sum_y Z(x,y)} \quad (4)$$

式中: $Z(x,y)$ 为(x,y)位置对应的像元灰度; \bar{x} 、 \bar{y} 为光斑中心坐标,分别为:

$$\bar{x} = \frac{\sum (x \times Z)}{\sum Z} \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum (y \times Z)}{\sum Z} \quad (6)$$

多组实验结果统计得到光斑半径计算误差为水平方向 9%、垂直方向 8%。实验中利用该理论测量得到光斑直径为 121 μm,与弗朗和费衍射理论直径 $F\theta=110 \mu\text{m}$ 之间的误差约 9%,进而得到损伤阈值

数据精度约为±21%,方法详见参考文献[12]。同时考虑到器件激光损伤本身就具有一定的随机性,该测试方法的精度已能够较好满足实验对比的要求。

2 实验结果

首先对光斑分布进行了实际测试,并采用二阶矩方法进行了计算。全部实验中所有到靶光斑直径均控制在 14.4~14.8 pixel,取均值 14.6 pixel,对应光斑直径 121 μm。然后开展了(1)、(2)两部分的实验研究。

(1) 单脉冲激光点损伤、线损伤以及致盲效应

5 ns、532 nm 激光单脉冲辐照 HS-6601 型行间转移相机时,到靶(到达 CCD 表面)能量密度增大到 40 mJ/cm² 时,出现不可恢复白点,一般定义为点损伤;到靶能量密度进一步增大到 500~550 mJ/cm² 时,出现不可恢复白点及一条白色线,一般定义为线损伤。点损伤和线损伤情况下,宏观电子学检测表明垂直转移电路、水平转移电路及地之间的电阻均未发生显著的变化,仍保持在 23 MΩ 以上,如图 2 所示。

到靶能量密度进一步提高到 1 500~2 200 mJ/cm² 时,整个 CCD 视频输出图像变白,数分钟过后 CCD 仍无法成像,说明 CCD 已被彻底破坏,一般称之为“致盲”。用万用表测量水平转移时钟线间及其与地间的电阻,与损伤前完好 CCD 的对应电阻值作比较,在一定的误差允许下,未发现电阻有明显变化。而测量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,如表 1 所示。表中 V1~V4 为 CCD 芯片的垂直转移时钟信号输入引脚。

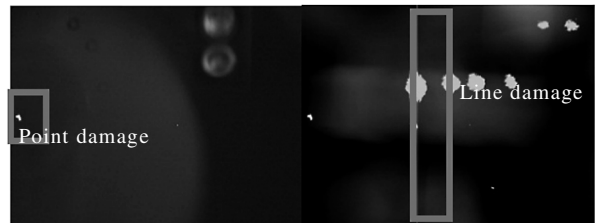


图 2 激光单脉冲点损伤效应、线损伤效应

Fig.2 Single pulse point and line damage effect

从电子学特性测试可知,点、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,并且没有对其他部位的成像产生影响;全靶面损伤后,通过表 1 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。说明在皮秒激光脉冲的辐照下,垂直转移电荷电路 V2、V4 出现了短路或断路。这一结论与公开报道^[8]纳秒激光损伤过程相同:即硅电极损伤造成电极间出现短路现象。

表 1 垂直时钟线间的电阻值(单位: MΩ)

Tab.1 Resistance between vertical clock lines(Unit: MΩ)

	V1		V2		V3	
	NC	FD	NC	FD	NC	FD
V1	-	-				
V2	>23	0.05	-	-		
V3	>23	20.0	>23	0.06	-	-
V4	>23	0.06	>23	0.06	>23	0.06

(2) 激光入射 CCD 同一位置的多点损伤积累线损伤

实验表明,若多个脉冲打到 CCD 靶面同一位置,则能够导致多次点损伤积累形成一条线损伤。随着入瞳能量的提高,所需的脉冲积累次数逐步降低,单次脉冲点损伤到靶能量密度 40 mJ/cm², 单次脉冲线损伤到靶能量密度 500~550 mJ/cm²。需要入瞳能量提高到到靶能量密度 150 mJ/cm² 附近时,重频积累才有效,此时约需 70 次积累。实验表明低于此值,超过 200 次的脉冲激光入射未造成明显的积累效应。随着入瞳能量的提高,到靶能量密度 300~400 mJ/cm² 时,仅需 2~4 次积累就能够实现线损伤。此时,已经接近单脉冲线损伤的阈值数据。从定性趋势上看,脉冲串作用于 CCD 靶面同一位置,能够显著降低致损阈值。这种多脉冲作用于同一位置的方式能在 100 个脉冲积累时将线损伤阈值降低到 1/3,实验结果如图 3 所示。

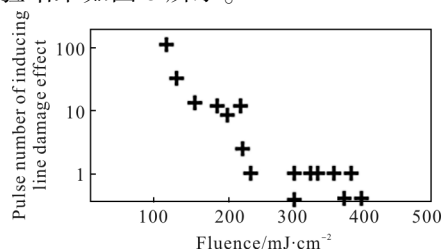


图 3 点损伤积累成线损伤现象脉冲个数与激光入瞳能量的关系

Fig.3 Pulse number vs laser fluence inducing point to line damage accumulation effect

当到靶激光能量密度远高于点损伤阈值后,多个脉冲打到同一位置处不断造成器件材料的同一位置损伤,直到材料损伤达到临界点导致线损伤,此时受损像素点与垂直转移电路之间形成短路。

(3) 激光入射 CCD 同一位置的多个线损伤积累造成致盲

实验结果表明,线损伤也具有积累效应,并可积累为致盲效应。实验测得单次脉冲线损伤阈值 500~550 mJ/cm², 单次脉冲致盲阈值 1500~2200 mJ/cm²。线损伤到靶能量密度 510~547 mJ/cm² 时,4 个脉冲打到同一位置就从线损伤变为器件致盲损伤。靶能量密度为 660~730 mJ/cm² 时,2 个脉冲打到同一位置就从线损伤积累变为器件致盲损伤。此时,器件应为电子学意义上的损伤,即器件的垂直转移电路间或与地间出现了短路现象^[8]。

(4) 激光入射 CCD 不同位置的多个线损伤积累器件功能性失效

精确控制多个脉冲打到器件的不同位置,并保持到靶能量密度 550 mJ/cm²,也能够造成器件无法成像的结果,但是线损伤之间的缝隙背景中仍然能够成像。这种损伤效应并未造成器件的致盲(即垂直转移电路间或与地未短路),而仅仅表现为器件的功能性失效效果,如图 4 所示。对于单脉冲致盲后的器件,部分垂直转移间的电极间电阻由 30 MΩ 量级变为 50 kΩ 量级或出现垂直转移电路与地之间的电阻由 30 MΩ 量级变为 50 kΩ 量级。而对其电路管脚进行测试,未发现垂直电路、水平电路及地相互间的电阻显著变化,与单脉冲致盲器件的电子学表现垂直电路、水平电路及地相互间的电阻显著减小小完全不同。

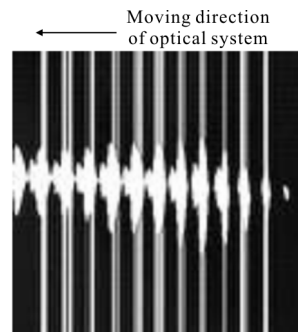


图 4 激光入射到 CCD 不同位置造成的多条线损伤积累效应(部分截图)

Fig.4 Multiple line damage accumulation effect with laser irradiation on CCD(segment)

3 损伤机理分析

多脉冲导致器件功能性失效存在显著的损伤积累效应,但是损伤或致盲积累效应有不同的机理,下面初步分析其损伤过程机理。

3.1 激光入射 CCD 同一位置脉冲串积累损伤机理

如图 3 所示,激光入射 CCD 同一位置能够导致点损伤积累为线损伤。然而电子学方面目前还没有办法仅从管脚检出单脉冲线损伤和这种情况下的多脉冲积累损伤之间的关系。此时对其电路管脚进行测试,未发现垂直电路、水平电路及地相互间的电阻显著变化。

激光入射 CCD 同一位置能够导致线损伤积累为致盲效应。此时整个 CCD 视频输出图像变白,数分钟过后,CCD 仍无法成像,说明 CCD 已被完全损坏。测量水平转移时钟线间及其与地间的电阻,与损伤前完好 CCD 的对应电阻值作比较,未发现电阻有明显变化。而测量发现垂直转移时钟线间及其与地间的电阻则发生了明显的变化。CCD 全靶面功能失效后,水平转移时钟线间及其与地间的电阻值未发生显著变化,而垂直转移时钟线间及其与地间的电阻值显著变小,由 31 M Ω 变为 50~60 k Ω 。这一结论与公开报道的纳秒激光损伤过程相同^[8]:从 CCD 器件结构材料学分析即硅电极短路是 CCD 器件功能性失效的原因。由于此时脉冲间隔为 200 ms,间隔较长不存在热积累过程,而仅仅表现为 CCD 构成材料在每个脉冲都有一定的损伤从而造成积累,因此每一次均要求激光能量密度大于点损伤阈值才能出现积累现象,与实验结果是相吻合的。

3.2 激光入射 CCD 不同位置脉冲串积累损伤机理

5 ns、5 Hz 重频激光入射时能够保证到靶面之间的距离为其光斑直径。在转台转速 1.75($^{\circ}$)/s 时,CCD 前光学系统焦距为 20 mm,从而导致到靶光斑水平间距为 121 μm ,前述实验中保证激光到达 CCD 靶面的光斑尺寸为 122 μm 。理论计算和实验点损伤测试均表明光斑之间确实存在间隙,如图 4 所示。此时,激光入射 CCD 不同位置,CCD 的有效信息大部分被线损伤掩盖,剩余的部分有效信息质

量也受到严重影响。但是后端采集图像和电子学测试表明,此时垂直转移电路电极并未发生损伤。其对应的能量密度 550 mJ/cm 2 与实验获得的线损伤阈值 500~550 mJ/cm 2 相当。因此,功能性损伤归结为多条线损伤的叠加效应。不过实验结果也表明,若转台转速控制不均匀造成了多个脉冲,对应到靶能量密度 660 mJ/cm 2 ,打到同一位置同样会造成器件的积累致盲损伤,其表现为电子学上的电阻降低。

4 结论

文中开展了短纳秒激光对行间转移 HS-6601 型电荷耦合器件的损伤实验研究,并对损伤机理进行了分析。实验结果表明以上两种实验对应着两种不同的损伤效应机理。多个脉冲到达 CCD 靶面同一位置的损伤或致盲具有积累效应,多个脉冲积累损伤能够显著降低线损伤和全靶面损伤阈值,降低程度与脉冲个数、激光到靶能量密度有关,在积累脉冲个数达到 100 个时,多脉冲点损伤积累成线损伤的阈值 200 mJ/cm 2 可降低至单脉冲线损伤阈值 660 mJ/cm 2 的 1/3。致盲机理与单脉冲致盲机理相同,均表现为器件垂直转移电路间及地间的短路;而激光脉冲串到达 CCD 靶面的不同位置时,在保证电荷耦合器件上的脉冲间距小于线损宽度也能够实现器件的功能性失效,而这种器件功能性失效机理与单脉冲损伤显著不同,仅表现为线损伤的叠加,并未造成器件的严重电路紊乱,功能性损伤阈值即对应线损伤阈值 660 mJ/cm 2 ,而小于单次致盲阈值 1 500~2 200 mJ/cm 2 。

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 sensor[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(27): 5201-5210.
- [2] Gao Liuzheng, Zhao Minwei, Zhang Wei, et al. Light field on silicon substrate of charge coupled device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1214004-1-5. (in Chinese)
高刘正, 赵民伟, 张威, 等. 电荷耦合器件硅基底辐照光场研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1214004-1-5.
- [3] Deng Min, Sun Li, Zhou Xiaoyan, et al. Research on lifetime testing and failure analysis of silicon avalanche photoelectric detectors [J]. *Journal of Ordnance Equipment*

- Engineering*, 2016, 37(8): 160–163. (in Chinese)
邓敏, 孙莉, 周小燕, 等. 硅雪崩光电探测器工作寿命试验及失效分析研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(8): 160–163.
- [4] Bonse J, Baudach S, Krüger J, et al. Femtosecond laser ablation of silicon—modification thresholds and morphology [J]. *Appl Phys A*, 2002, 74(1): 19–25.
- [5] Guo Shaofeng, Cheng Xiang'ai, Fu Xiquan, 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)
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.
- [6] Li Xingliang, Niu Chunhui, Ma Muyan, et al. Finite element simulation of damage characteristics of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 730–733. (in Chinese)
栗兴良, 牛春晖, 马牧燕, 等. 单脉冲激光损伤 CCD 探测器的有限元仿真[J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 730–733.
- [7] Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing, 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)
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.
- [8] Cai Yue, Ye Xisheng, Ma Zhiliang, et al. Experiment of 170 ps laser pulse irradiation effect on visible plane array Si-CCD [J]. *Opt and Precision Eng*, 2011, 19(2): 457–462. (in Chinese)
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.
- [9] Li Zhiming, Nie Jinsong, Hu Yuze, et al. Heat accumulation effects on the ablation of silicon with high frequency femtosecond laser [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(4): 410–415. (in Chinese)
李志明, 聂劲松, 胡瑜泽, 等. 高频飞秒激光对硅材料烧蚀的热积累效应[J]. *激光与红外*, 2017, 47(4): 410–415.
- [10] Zhong Hairong, Liu Tianhua, Lu Qisheng. 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)
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.
- [11] Shao Junfeng, Liu Yang, Wang Tingfeng, et al. Damage effect of charged coupled device with multiple-pulse picosecond laser [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(9): 1408–1413. (in Chinese)
邵俊峰, 刘阳, 王挺峰, 等. 皮秒激光对电荷耦合器件多脉冲损伤效应研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(9): 1408–1413.