

## 单脉冲激光对 CCD 探测器的硬损伤及损伤概率

朱志武<sup>1,2</sup>, 张震<sup>3,4</sup>, 程湘爱<sup>1</sup>, 黄良金<sup>1</sup>, 刘泽金<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003; 3. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 4. 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:** 在纳秒激光脉冲辐照下, 随着 CCD 探测器损伤程度的加深, 成像系统输出画面中先后出现点损伤、白线损伤以及完全失效等现象, 且损伤阈值呈现出概率分布特性。实验激光波长为 1064 nm, 首先采用 n-on-1 辐照模式, 研究 CCD 探测器在不同损伤程度下的损伤现象, 从器件工作原理的角度分析各种现象出现的机理。利用光学显微镜观察样品的损伤形貌, 发现探测器的损伤部位从内部材料开始, 逐渐发展到位于表面的微透镜结构。接下来, 采用 1-on-1 辐照模式测量了点损伤和完全失效阶段的激光能量密度阈值, 并以损伤概率的形式进行描述, 得到实验样品的完全失效阈值在 100 mJ/cm<sup>2</sup> 左右。

**关键词:** 激光损伤 CCD 探测器; 损伤机理; 损伤概率; 单脉冲激光

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0113-06

## Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation

Zhu Zhiwu<sup>1,2</sup>, Zhang Zhen<sup>3,4</sup>, Cheng Xiang'ai<sup>1</sup>, Huang Liangjin<sup>1</sup>, Liu Zejin<sup>1</sup>

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. No. 63880 Unit of PLA, Luoyang 471003, China; 3. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 4. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** When CCD detectors damaged by nanosecond pulsed laser, with the deepening of damage degree, the phenomena of point damage, white line damage and complete failure appear successively in the output pictures of the imaging system, and the damage thresholds exhibit a nature of probability distribution. The laser wavelength was 1 064 nm in our experiment. At first, the CCD detectors were illuminated with n-on-1 mode, three different degrees of damage behaviors were observed, and the damage mechanism was analyzed on basis of the working principle of the CCD imaging system. The damage morphology of the samples were studied with an optical microscope, and it is found that the damage initiates from the inner part of the detectors and then spreads to the micro-lens structure on the surface. Next, the irradiation mode of 1-on-1 was employed to measure the damage thresholds for the

收稿日期: 2012-05-17; 修订日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (11004247)

作者简介: 朱志武(1980-), 男, 工程师, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: zhuzhi\_hust@hotmail.com

degree of point damage and system failure. The former is expressed in the way of probability distribution, and the thresholds of system failure are around  $100 \text{ mJ/cm}^2$ .

**Key words:** laser damage CCD detectors; damage mechanism; damage probability; single-laser-pulse

## 0 引言

CCD 探测器是进行图像探测、获取、识别的关键器件,已广泛进入生产、生活等各种领域,然而,在激光辐照下也极容易被干扰甚至损伤<sup>[1-3]</sup>,因此研究其在激光辐照下的各种行为对探测器的抗激光防护和激光损伤效果等方面均具有重要意义。

20 世纪 70 年代 CCD 被发明后不久,国外就开始对其激光辐照效应进行研究,并发现了饱和串扰效应<sup>[4-5]</sup>,正是这些研究促进了 CCD 的发展,出现了防饱和和结构设计,改善了器件的性能。2004 年 Flora M.Li 等人进行了  $157 \text{ nm}$  深紫外受激准分子激光对不同氧化层厚度和不同界面质量的 512 单元线阵可见光 CCD 的辐照实验,发现器件的量子效率、暗电流水平与辐照激光强度的关系,并将 CCD 的暂时和永久失效归因于  $\text{SiO}_2$  层以及  $\text{Si-SiO}_2$  界面的光学和电学特性的暂时和永久性改变<sup>[6]</sup>。该研究较深入地分析了氧化层损伤对 CCD 输出特性的影响,按照 CCD 的工作原理,如果该绝缘层一旦出现击穿导致驱动电极和半导体之间出现短路,则 CCD 无法正常工作。在此之前,国内的刘泽金等人针对这一损伤机理已经提出了相近的观点,但更加详尽的研究结果未见报道<sup>[2]</sup>。目前,国内相关研究人员在 CCD 饱和、致盲、损伤机理以及损伤阈值等方面已经发表大量的研究文献<sup>[2-3,7-8]</sup>。其中在激光对可见光 CCD 的硬损伤方面,2009 年,沈鸿斌等人在实验中观察到 CCD 出现不可恢复的白色亮点、亮线、完全失效 3 个破坏阶段<sup>[7]</sup>,从成像系统工作的电学角度,对不断加深的损伤行为做了较为全面的论述。2010 年,邱冬冬等人也在实验中发现类似的损伤现象,他们通过化学腐蚀的方法研究了损伤点不同深度下的损伤形貌,并认为 CCD 的不同损伤程度源于各分层不同程度的烧蚀使暗电流和漏电流增加所致<sup>[8]</sup>,该研究为更加深入的分析损伤形貌进而分析损伤机理提供了一种新方法。

已有研究文献较为注重对损伤现象和机理的分析,而对损伤阈值的测量和数据处理方法关注较少,比如给出的损伤阈值没有明确说明所用镜头的光学增益,也很少说明对应的损伤程度。此外,纳秒等长脉冲激光作用下,CCD 器件的损伤行为具有不确定性。对这一特性的研究可以借鉴脉冲激光对光学薄膜等光学材料的损伤行为的研究方法,采用损伤概率的形式给出更加具体的损伤阈值。文中首先对 CCD 的不同损伤阶段进行实验研究和机理分析,接下来采用 1-on-1 模式,即 CCD 光敏面上每个辐照点无论损伤与否均只辐照一个激光脉冲的方式,对不同损伤阶段的阈值进行测量,并以损伤概率的形式给出结果。虽然不同样品的激光损伤阈值有差异,但文中所提出的研究方法仍然具有参考价值。

## 1 实验

实验采用波长  $1064 \text{ nm}$ 、可单次触发的脉冲 YAG 激光器。脉宽约  $12 \text{ ns}$ ,最大脉冲能量达到  $500 \text{ mJ}$ ,单脉冲触发时能量波动范围约为  $10\%$ 。CCD 探测器集成在成像系统中,采用 Sony ICX405AL 四相驱动黑白 CCD 芯片,是典型的行间转移型面阵 CCD,光敏面大小为  $5.59 \text{ mm} \times 4.68 \text{ mm}$ <sup>[9]</sup>。

实验光路如图 1 所示,半波片(half-plate)和偏振分光棱镜(PBS)结合调节脉冲能量。小孔直径为  $1 \text{ mm}$ ,用来选取多横模光束中均匀的部分辐照 CCD 探测器,小孔离 CCD 光敏面距离约为  $5 \text{ cm}$ ,此时认为探测器表面的光斑直径也为  $1 \text{ mm}$ 。分光片结合能

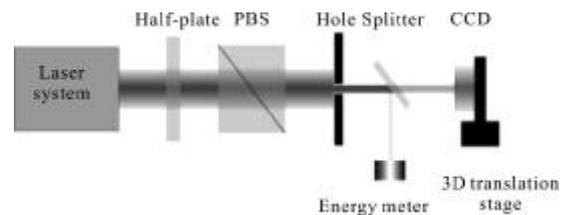


图 1 实验光路

Fig.1 Experimental setup

量计对脉冲能量进行实时测量,实验前首先标定分光片的分光比。成像系统去掉镜头固定在三维平移台上,阈值测试中,每次触发单脉冲激光辐照后,无论损伤与否均调节平移台切换新的辐照位置,水平和垂直方向位移间隔均设为 1.1 mm。实验在暗背景下进行,通过图像采集观察损伤效应。

实验中选择同一型号和批次的 4 个 CCD 作为靶材,分别编号为 1#、2#、3#、4#。其中 1# 样品用来观察不同的损伤程度,以小于失效损伤阈值(该阈值在预备实验阶段已测量)的激光脉冲以 1 Hz 频率辐照光敏面上同一位置,即 n-on-1 模式,通过输出图像记录损伤的发生和发展过程。2# 样品用来测量 1-on-1 模式下的单脉冲第一阶段损伤阈值。3#、4# 用来作 1-on-1 模式下的单脉冲失效阈值测量。

考虑到加镜头后焦面上光斑大小难以测量,因此实验中采用去掉镜头并利用小孔选模的方式来控制实际作用在光敏面上的光斑大小,该测量结果更有可比性<sup>[7-8]</sup>。CCD 探测单元的尺寸在 10  $\mu\text{m}$  左右,是根据镜头对可见光波段的聚焦效果而设计的,当入射激光处于红外波段时,根据衍射理论,作用在探测器上的光斑直径应该大于这一数值。实验中,实际作用光斑大于像元面积,这能降低小光斑作用下损伤阈值的不确定性,因为光敏面遮光层的存在造成单个探测单元不同位置处损伤特性不同<sup>[9]</sup>。

## 2 实验结果与机理分析

### 2.1 CCD 的不同损伤阶段

1# 样品在脉冲激光辐照下,通过输出图像观察不同的损伤阶段,给出损伤过程的定性分析。为了方便观察,文中采用的激光重频为 1 Hz,重频越高,损伤程度的发展越快。1 Hz 脉冲激光持续辐照光敏面上同一点,当靶面脉冲能量密度约为 80  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  时,观察到的损伤发展过程如图 2 所示。其中图(a)为有照明时,CCD 输出的正常图像;图(b)~(e)为损伤点的发展,图像在暗背景下并在激光出光间隔采集;图(f)为完全失效后有照明条件下的输出图像。同样的损伤规律在其他 CCD 样品中也能观察到,重复性较好。因此,损伤过程可以分为 3 个阶段:图(b)、(c)所示的轻微损伤(点损伤);图(d)、(e)所示的严重损伤(白线损伤);图(f)所示的完全失效(黑屏)。

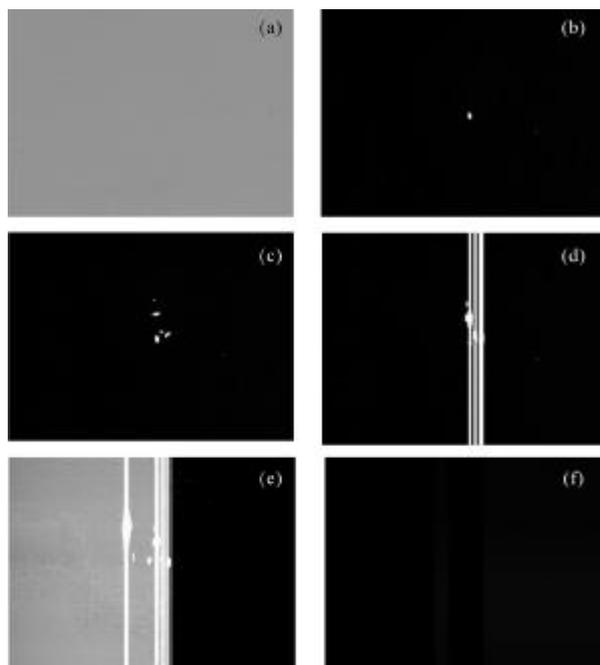


图 2 CCD 的不同程度激光损伤

Fig.2 Laser induced damage of CCD detectors

轻微损伤阶段,损伤面积较小,损伤点之外区域可以正常成像。严重损伤阶段,出现白色亮线,该白线在亮暗背景下均存在。实验发现,严重损伤阶段还可以继续划分为两个子阶段,即正常成像阶段和非正常成像阶段。图 3 所示为严重损伤阶段 CCD 对激光器泵浦光的响应。按照损伤程度,图 3(a)与图 2(d)对应,图 3(b)与图 2(e)对应。图 3(a)中,损伤点两侧的光响应具有较好的一致性,损伤点以外尚可以正常成像,但图 3(b)中,这种一致性已经被破坏,装上镜头观察成像效果发现,白线左侧的图像亮度明显高于右侧,这种差别将影响图像信息的提取。

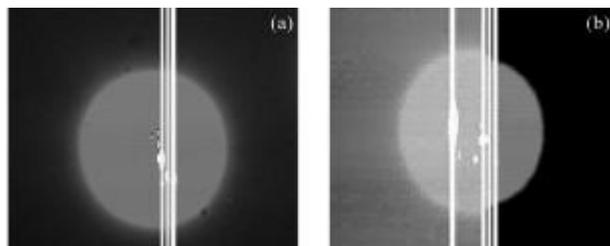


图 3 严重损伤阶段的输出图像

Fig.3 Output pictures of the heavily damaged CCD detectors

### 2.2 损伤机理

针对 CCD 探测器的激光损伤机理,已发展的主

要研究手段包括分析图像、检测输出波形、测量电极与衬底之间电阻以及在显微镜下观察损伤形貌等<sup>[7-12]</sup>。在电学层面上,已有研究结果对损伤过程包括点损伤、白线损伤以及完全失效的论述已较为丰富, 归因于不同烧蚀情况下电极与衬底之间电阻的降低, 从而使暗电流和漏电流的水平上升, 当烧蚀造成电极与衬底短路时 CCD 完全失效。一般认为完全失效前, CCD 在损伤点之外的区域仍然可以正常成像, 然而经过细致的实验发现, 当损伤到一定程度时(图 3(b)), 即使没有完全失效, CCD 的成像性能也大大降低。

实验采用的行间转移 CCD 的像元布局示意图如图 4 所示, 箭头表示该单元信号的读出方向。一行像素包含的各单元信号首先被读出转移到垂直 CCD 单元, 然后在垂直时钟驱动下, 每行信号并行向下传输, 直至达到底端的水平 CCD 单元, 最后在水平时钟驱动下, 将信号串行传输至左端的浮置扩散放大器再转换成视频信号输出。

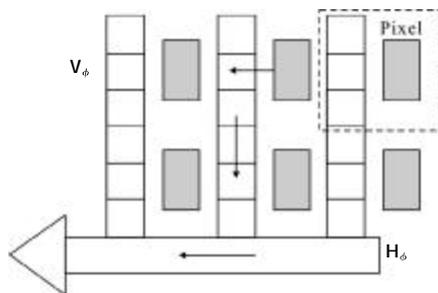


图 4 像素结构及信号读出顺序

Fig.4 Structure of the pixels and the procedure of signal transfer

分析认为,在强光辐照下,探测器单元晶格的完美性首先遭到破坏,导致暗电流和漏电流升高,从而使损伤区少数像元收集的电荷增加,形成局部饱和点。当破坏加深,漏下的大量电荷开始影响处于同一列的 CCD 单元,于是白色亮线出现,这也是白色亮线总是出现在垂直 CCD 方向的原因。严重损伤后,溢出的电荷已不再只是影响垂直 CCD,同时在向下读出时开始影响底端水平 CCD 的串行信号传输过程。此时,沿着串行信号的传输方向,处于白线之前的电荷包能够正常传输,而白线之后的电荷包则被加强,在图像自动增益的控制下,严重时甚至出现全屏一边黑一边白的情形。此时无论激光停照与否,CCD 都不能正常成像。至于完全失效,则是由

于电极与衬底间短路,探测器不能正常工作。

采用放大 100 倍的显微镜观察出现轻微点损伤的 CCD 靶面,逐步调节显微镜聚焦位置从微透镜向下移动,拍摄到的损伤形貌如图 5 所示。从图 5(a)可见,处于最上层的微透镜几乎没有损伤,而微透镜下的半导体则出现了明显的损伤坑,如图 5(b)所示。出现这一现象的原因是半导体对光的吸收明显强于透明的微透镜和氧化层,并且此时半导体材料的热损伤效应尚不足以波及上层的结构。当损伤程度进一步加深,出现线损伤时,微透镜出现了明显的损伤,在显微镜下可看出微透镜的损伤面积与下层半导体材料的损伤面积相当。失效时,显微图像如图 6 所示,利用显微镜粗略测量损伤坑深度约为  $10\ \mu\text{m}$ (除去微透镜弧顶的高度)。由 CCD 的结构可知,此时损伤区域已经深入到硅衬底。

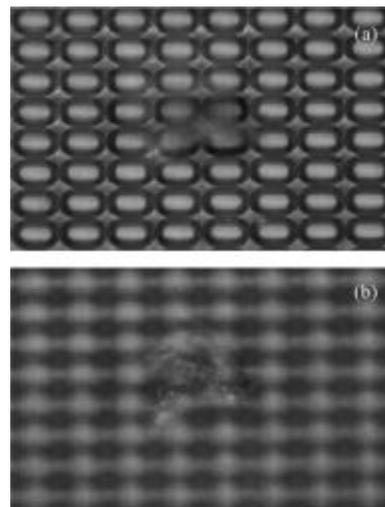


图 5 轻微点损伤时 CCD 的损伤形貌

Fig.5 Damage morphology of the CCD under light point damage

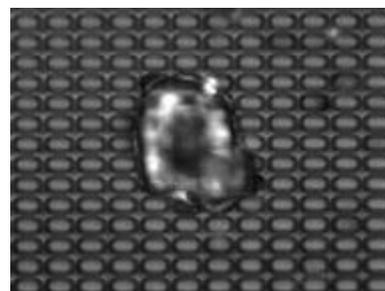


图 6 CCD 失效时的损伤形貌

Fig.6 Damage morphology of the CCD under system failure

### 2.3 单脉冲损伤阈值测量

根据实验结果,CCD 损伤可分为 3 个阶段。并且

由多个样品的损伤效果表明,这 3 个阶段的出现是一个连续的过程,它们所对应的激光能量密度并无明显分界,这是因为 CCD 各个损伤阶段的阈值波动范围都较大从而相互形成交集,因此文中实验主要测量第一和第三阶段的损伤阈值。造成损伤阈值出现较大波动的原因主要有一下两点:第一,探测器靶面结构复杂且不均匀,不同位置处材料不同,因而形成不同的损伤特性;第二,纳秒脉冲作用下材料损伤由热过程所主导,该过程与局部材料对光的吸收以及热扩散特性密切相关,这些因素也会造成损伤阈值出现较大的不确定性。

成像系统去掉了镜头,因此很容易通过平移台切换辐照点位置。单脉冲输出时,脉冲能量波动范围达到 10%,测量中难以将靶面的能量密度固定在某一数值,从而得到损伤概率与靶面能量密度的关系曲线<sup>[13]</sup>。因此,文中采用损伤概率的另一种表达方式,即 0 损伤概率和 100% 损伤概率。0 概率阈值是指所有测试中均不能造成样品损伤的最大能量密度,该指标反映样品的抗激光损伤能力。100% 损伤概率阈值是指所有测试中均造成样品损伤的最小能量密度<sup>[14]</sup>,从作用激光的角度反映对样品的损伤效果。实际应用中,只有保证当入射激光能量密度大于 100% 损伤概率阈值时,才能有效损伤光电探测器。正式实验前,利用其他样品初步掌握了不同阶段的损伤阈值水平,在此基础上,利用激光器本身输出能量的波动,在 1-on-1 模式下对 2# 样品进行损伤实验。

样品的第一阶段损伤(点损伤)概率如图 7 所示,其中 0 概率和 100% 损伤概率阈值分别对应为  $75 \text{ mJ/cm}^2$  和  $85 \text{ mJ/cm}^2$ 。在能量密度为  $81.1 \text{ mJ/cm}^2$

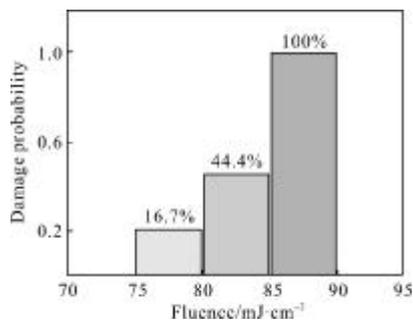


图 7 2# 样品第一阶段损伤概率

Fig.7 Damage probability of the 2# sample at point damage

时已经出现 1 次第二阶段损伤现象,可见各损伤阶段没有明显的区分。需要说明的是,由于样品面积较小,同一样品上有效进行实验的次数为 20 次,因此未能对能量密度范围进行更加精细的划分。CCD 损伤后输出的图像如图 8 所示,各白色点簇均为单脉冲作用的结果。

当出现第一和第二阶段损伤时,CCD 仍然能够工作,此时电极与衬底间阻值在  $\text{M}\Omega$  量级,当完全失效时,该阻值降低 3 个量级到  $\text{k}\Omega$  量级<sup>[8]</sup>甚至更小。文中推断不同损伤点形成的电阻为并联关系,因此同一靶面上进行多点损伤实验时,前面的损伤点对后续损伤效果的影响可以忽略。从另一方面看,各个像素相互之间存在沟阻,点损伤只造成局部像素的损伤而对周围其他点损伤的影响是有限的,实验结果也支持这一点。这证明了在同一块 CCD 上进行多点损伤实验的合理性。

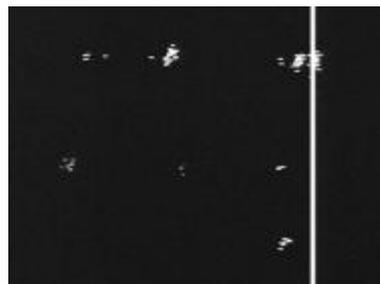


图 8 1-on-1 辐照模式下第一阶段损伤输出图像

Fig.8 CCD output picture at point damage under the irradiation mode of 1-on-1

测量失效阈值时,同样采用 1-on-1 模式,实时记录每个脉冲的能量密度。每个样品只能得到一个完全失效阈值,测试 3# 样品的失效阈值为  $100 \text{ mJ/cm}^2$ ,4# 为  $112 \text{ mJ/cm}^2$ 。前文提到 1# 样品在 n-on-1 模式下以  $80 \text{ mJ/cm}^2$  能量密度的激光持续辐照也造成了完全失效,实际上在预备实验阶段,最低观察到约  $55 \text{ mJ/cm}^2$  能量密度的激光辐照一定时间后也能造成 CCD 的完全失效,可见重频激光对同一点时的损伤累积效应非常明显也难以进行量化。另外,在实际情况下,采用脉冲激光损伤光学成像系统时,也难以保证多个激光脉冲作用在光敏面上的同一点。这说明了采取 1-on-1 模式进行阈值测试的合理性,关于重频脉冲对 CCD 探测器的损伤效应不是文中研究的重点。

### 3 结 论

利用 1064 nm 波长的纳秒脉冲激光先后对 4 个可见光 CCD 样品进行了损伤实验研究,观察了 CCD 损伤的 3 个阶段:轻微损伤(白色损伤点)、严重损伤(出现白线)以及完全失效(黑屏),并将严重损伤阶段进一步细分为正常及非正常成像阶段。在已有研究结果的基础上分析了损伤机理,重点分析了严重损伤阶段白线两侧 CCD 探测器的响应均匀性发生变化的原因。进一步,采用 1-on-1 模式测量了激光直接作用 2# 探测器的点损伤阈值,并以损伤概率的形式给出结果,利用 3# 和 4# 样品测量了单脉冲失效损伤阈值。实验结果表明 3 个损伤阶段的损伤阈值难以严格区分,这是文中只给出第一和第三阶段损伤阈值的原因。实验方法排除了光学增益、累积效应对测量结果的影响。最后,由于样品大小的限制,损伤概率的测试结果还不够精细,另外限于样品个数,失效损伤概率的结果无法给出,该问题将在接下来的实验中继续关注。

#### 参考文献:

- [1] Schleijsen R M A, Heuvel J C, Mieremet A L, et al. Laser dazzling of focal plane array cameras[C]//SPIE, 2007, 6543: 65431B-1.
- [2] Liu Zejin, Lu Qisheng, Jiang Zhiping, et al. Study of damage effect in CCD detectors irradiated locally by laser [J]. Laser Technology, 1994, 18 (6): 344-347. (in Chinese)
- [3] Xu Yin, Shao Li, Sun Xiaoquan. Image metric analysis of laser jamming effect on CCD tracking performance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1180-1185. (in Chinese)
- [4] Kosonocky W, Carnes J, Kovac M, et al. Control of blooming in charge-coupled imagers [J]. RCA Rev, 1974, 35: 3-24.
- [5] Xu Yin, Sun Xiaoquan, Shao Li. Impact of laser jamming on target detection performance in CCD imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 889-893. (in Chinese)
- [6] Li F M, Nirson O, Nathan A. Degradation behavior and damage mechanisms of CCD image sensor with deep-UV laser radiation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, 51(12): 2229-2236.
- [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)
- [8] Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui, et al. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214006-1. (in Chinese)
- [9] Zhang C Z, Blarrie L D, Walser R M, et al. Mechanisms for laser induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. Appl Opt, 1993, 32(27): 5201-5210.
- [10] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. Study of hard-destructive mechanism of the charge-coupled devices by a laser [J]. Acta Physica Sinica, 1994, 43(11): 1795-1802.
- [11] Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua, et al. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors [J]. J Infrared Millim Waves, 2008, 27(6): 475-478. (in Chinese)
- [12] 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 (17): 1783-1786. (in Chinese)
- [13] Xia Zhilin, Shao Jianda, Fan Zhengxiu. Effect of bulk inclusion in films on damage probability [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56 (1): 400-406. (in Chinese)
- [14] Qiu Fumin, Zhu Ziqiang, Li Dan, et al. Comparison of two methods of determining laser-induced damage threshold to thin-film [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 1997, 34 (6): 775-778. (in Chinese)