

1.06 μm 连续激光损伤 CCD 的进程及损伤对成像能力的影响

韩敏^{1**}, 聂劲松^{1*}, 叶庆¹, 豆贤安¹, 张磊²

¹脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

²31604 部队, 江苏 无锡 214000

摘要 研究了 1.06 μm 连续激光辐照损伤 CCD 探测器的进程及不同损伤阶段 CCD 探测器成像能力的削弱程度。通过电子显微镜(SEM)扫描分析损伤机理,结合损伤状态下的 CCD 图像,解释了各损伤阶段成像质量变化的原因。结果表明:在点损伤阶段,微透镜熔融汽化,失去聚焦光束的能力,使得进光量减少,图像灰度降低,同时汽化的微透镜冷却后附着在封装玻璃表面,这是成像质量下降的主要原因;在线损伤阶段,激光对探测器多层结构有更深层的损伤,使得部分像元失去成像能力,加上激光对封装玻璃的损伤,使得 CCD 探测器的成像能力逐渐降低。以已有的评估方法为基础,通过清晰度评定和形态学检测相结合的方式,建立了损伤评估模型,对不同损伤阶段的成像能力和成像质量进行评估,获得了损伤时间、损伤形貌、损伤阶段和探测器成像能力的对应关系。

关键词 光学器件; 激光损伤; 连续激光; 电荷耦合器件探测器; 损伤评估

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0901004

Damage Proceeding and Effects of Damage on Imaging Capability of Charge Coupled Device by 1.06 μm Continuous Laser

Han Min^{1**}, Nie Jinsong^{1*}, Ye Qing¹, Dou Xian'an¹, Zhang Lei²

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

²Unit 31604 of PLA, Wuxi, Jiangsu 214000, China

Abstract The damage proceeding of charge coupled device(CCD)detector irradiated by 1.06 μm continuous laser and the weakening of the imaging capability at different damage stages are studied. Combined with damage mechanism analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and the CCD output images at the damage stages, the reasons of the imaging quality change at different damage stages are explained. Results show that during the point damage, the microlens melts, vaporizes and loses the ability of focusing beam, which cause the incoming laser to reduce and the image gray to decrease. Besides, the vaporized microlens is adhered to the surface of encapsulated glass after cooling. These are the main reasons for the image quality reduction. During the linear damage, the deeper damage of multilayer structure by laser causes part of pixels to lose imaging capability, while the encapsulation glass is damaged due to the irradiation. So the CCD imaging ability becomes weak gradually. Combining the image clarity with morphologic detection, we built the damage assessment model to evaluate the CCD imaging capability and imaging quality at different damage stages based on existing evaluation method. By this way, the corresponding relations between damage time, damage morphology, the damage stages and the CCD imaging capability are obtained.

Key words optical devices; laser damage; continuous laser; charge coupled device detector; damage evaluation

OCIS codes 040.15820; 140.3330

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-05-05; 录用日期: 2018-05-10

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(2015J1003)

* E-mail: njs7001@sina.com; ** E-mail: hm462803063@sina.com

1 引言

电荷耦合器件(CCD)是一种半导体成像器件,作为光学成像系统和探测系统的核心部件,其极易受到激光的干扰和破坏。因此,研究 CCD 探测器被激光损伤后的成像质量和成像能力具有十分重要的意义。

实验表明,连续激光辐照会对 CCD 探测器产生干扰现象,而强激光辐照会对 CCD 探测器造成不可恢复的损伤,影响探测器的成像能力和成像质量。目前,对于激光干扰 CCD 探测器的效果评估已有大量研究^[1-11];2007年,Durécu 等^[1-2]以基于边缘检测模式的识别算法作为测量激光干扰的标准,研究了激光重复频率、脉冲能量和相机参数对激光干扰效果的影响,通过相关度评估和傅里叶定量分析,量化分析了激光干扰的程度;孙运强^[3]通过饱和面积法、灰度突变元统计法和相关度法,对激光干扰效果进行定量评估;2010年,Xu 等^[4]结合激光干扰的特点和 CCD 成像性能的不同参数,应用模糊综合评价方法,在不同干扰条件下,对激光干扰 CCD 的成像效果进行了评估;2014年,吴云龙等^[5-6]提出了基于小波能量和光斑尺寸的综合图像尺度和一种基于边缘强度相似度的干扰图像尺度,量化分析了 CCD 探测器受干扰的程度,准确定量地评估了激光干扰的效果。2014年,钱方等^[9-11]从目标特征识别和探测器成像清晰度评价两方面出发,提出了两种图像评估的方法:一是基于特征点相似度评估算法,通过提取原始图像和干扰图像的特征点,对激光干扰图像进行评估;二是基于 Sobel 算子提取图像的骨架边缘,将得到的相应的像素数目作为评定参数。实验结果表明,其评价结果符合主观视觉感受,具有一定的指导性。2016年,Li 等^[12]通过实验研究了脉冲激光照射 CCD 探测器的损伤机理,对 CCD 探测器的损伤进程进行了分析,并根据实验情况,将硅基底结构细化为光敏层、电荷通道层和 N-Si 层^[13],进行仿真模拟,结果发现二者的结果较为一致。

连续激光的干扰使得 CCD 探测器暂时丧失成像能力,当激光撤离后,探测器依然可以正常工作。而强激光辐照 CCD 探测器就会造成不可恢复的损伤,其损伤情况主要表现在两个方面:一是物理层面,CCD 探测器多层结构的损伤程度不断加深,损伤形貌不断变化;二是功能层面,成像能力不断下降,成像质量不断恶化。

在激光干扰的基础上,近些年学者们对激光辐

照损伤 CCD 探测器进行了大量探究。虽然详细解释了激光损伤 CCD 探测器的现象及各个阶段的损伤机理^[12-17],但目前仍缺乏非完全损伤情况下,CCD 探测器在各损伤阶段成像质量和成像能力变化方面的研究。据此,本文以已有的评估方法为基础,结合损伤实验的实际情况,建立了一种评估体系,以探究在成像探测器非完全损伤的情况下,CCD 探测器成像质量随损伤程度的变化;进而通过损伤程度来预估不同辐照时间下,CCD 探测器成像能力的削弱程度,建立损伤时间、损伤形貌、损伤阶段和成像能力的对应关系。

2 实验准备

2.1 CCD 探测器的基本结构

典型的 CCD 探测器由一系列排列紧密的金属氧化物半导体(MOS)结构的电容器组成。对于常见的行间转移 CCD 结构,其 MOS 结构的移位寄存器上覆盖有一层遮光铝膜。为了提高开口率,增强感光度,商品化 CCD 像元表面一般都覆有微透镜阵列,器件整体封装,硅基底生长在层压塑料上。图 1 为典型 CCD 像元的基本结构示意图。微透镜一般用聚酯亚胺(PI)制成,这种材料对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的透过率几乎达到 100% ^[15],当激光照射到材料表面时,微透镜阵列将光束会聚,使绝大部分激光直接辐照于硅光电二极管上。

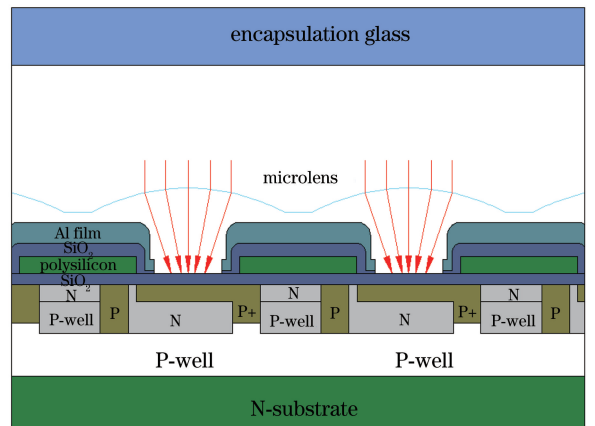


图 1 典型 CCD 像元的基本结构示意图
Fig. 1 Fundamental structure diagram of typical CCD pixel

2.2 实验系统

将半导体抽运源的 Nd:YAG 激光器输出的 $1.06\ \mu\text{m}$ 连续激光作为损伤激光,对 CCD 探测器进行损伤。实验总体布局如图 2 所示,激光器距离 CCD 探测器光学镜头 $5\ \text{m}$ 。

激光经过分束镜被分为两束,一束用于测量激光的出射功率,另一束用于辐照 CCD 探测器进行损伤,激光辐照 CCD 探测器的时间由快门控制。实验用行间转移 CCD 探测器的型号是 SONY-ICX405AL(对角线 6 mm,类型 1/3),有效像元为 512(H)×582(V),像元尺寸为 9.8 μm(H)×6.8 μm(V)。CCD 成像探测系统包括光学镜头、CCD 芯片和后续处理电路。

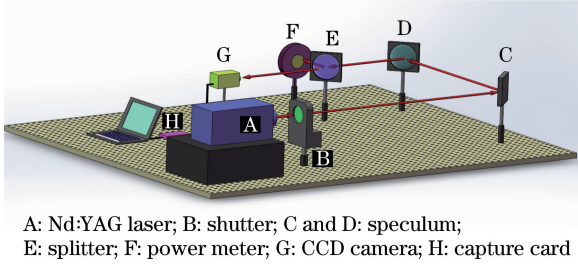


图 2 实验光路示意图

Fig. 2 Experimental beam path diagram

I 为 1.06 μm 连续激光入射到 CCD 探测器表面的功率密度, P_0 为激光的入射功率,功率计测定的功率 $P = 1.67$ W, ω_0 为聚焦在 CCD 探测器表面的光斑半径。经测定,在室温为 22 °C,湿度为 40% 的环境下,成像镜头对 1.06 μm 激光的透过率为 90.8%,分束镜对 1.06 μm 激光的透过率为 92%,反射率为 8%。根据夫琅禾费衍射理论,到达靶面的光斑半径 ω_0 为焦距 F 与激光发散角 θ 之积的一半^[18],即:

$$\omega_0 = F \times \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

$$P_0 = P \times \frac{92\%}{8\%} \times 90.8\%, \quad (2)$$

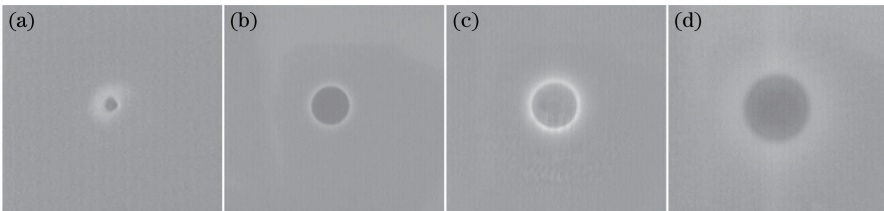


图 3 不同辐照时间下 CCD 探测器的输出图像。(a) 1.0 s;(b) 2.0 s;(c) 3.0 s;(d) 4.0 s

Fig. 3 Output images of CCD detector at different irradiation time. (a) 1.0 s; (b) 2.0 s; (c) 3.0 s; (d) 4.0 s

结合 CCD 探测器的多层结构特征和工作原理^[16],通过电子显微镜(SEM)观察发现,光斑区域的微透镜由于熔点较低(710 K)而发生熔融,失去了对入射光束聚焦的能力。而下层遮光铝膜的开口率较低,仅为 30%^[19]。也就是说,微透镜熔融后,CCD 探测器虽然还具有成像能力,但微透镜熔融区

$$I = \frac{P_0}{\pi\omega_0^2}. \quad (3)$$

光学成像镜头直径 $D = 40$ mm,焦距 $F = 150$ mm,发散角 $\theta = 1.4$ mrad,则光斑半径为 105 μm。经计算,激光器的抽运电流恒为 24 A 时,激光到 CCD 探测器表面的入射功率密度为 $I = 5 \times 10^4$ W·cm⁻²。

3 损伤进程与损伤评估

强激光辐照 CCD 探测器时,随着辐照时间的推移,CCD 的损伤情况不断恶化,成像能力不断下降。由于在强激光辐照下无法对 CCD 的成像情况进行实时检测和观察。因此,为方便研究,利用预实验确定完全损伤的时间约为 8.0 s,再梯度化损伤时间,获得多组实验数据,研究不同损伤状态下 CCD 成像质量的变化。实验设定激光器的抽运电流恒定为 24 A,即激光入射到 CCD 探测器表面的功率密度 $I = 5 \times 10^4$ W·cm⁻²。根据实际情况,设置激光器的辐照时间分别为 1.0,2.0,3.0,4.0,5.5,6.0,6.4,6.8,7.0 s。结果发现,随着辐照时间的推移,CCD 探测器会依次出现点损伤、纵向亮线损伤、横向暗线损伤和完全损伤(全黑屏),与文献[14]中 5 kHz 重复频率激光的损伤现象和变化趋势较为一致。

3.1 点损伤阶段

在连续激光辐照下,随着辐照时间的推移,最先出现点损伤。激光辐照 CCD 探测器表面 1.0~4.0 s 时,CCD 探测器的输出图像如图 3 所示。可以发现,激光辐照 1.0 s 时,输出图像出现一个斑点,随着辐照时间的推移,输出图像的斑点变大,但中心亮度较低。

域却只有约 30% 的光束可以到达感光层。因此,CCD 探测器输出图像损伤区域的亮度较低。由图 4 所示的不同辐照时间下 CCD 探测器的损伤形貌可以看出,激光辐照时间为 1.0~4.0 s 时,CCD 探测器只是微透镜出现损伤,表现为损伤区域不断扩大,而下层遮光铝膜未见明显变化。

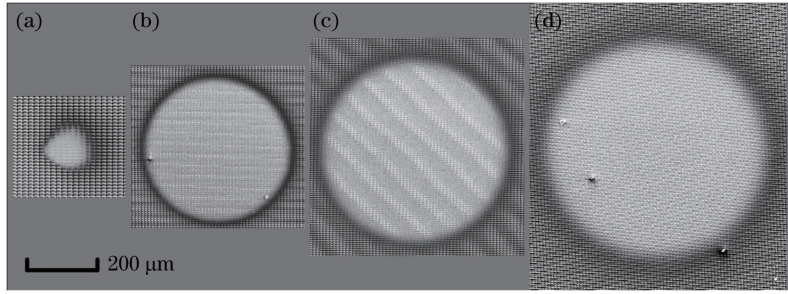


图 4 不同辐照时间下 CCD 探测器的损伤形貌。(a) 1.0 s;(b) 2.0 s;(c) 3.0 s;(d) 4.0 s

Fig. 4 Surface damage morphology of CCD detector at different irradiation time. (a) 1.0 s; (b) 2.0 s; (c) 3.0 s; (d) 4.0 s

在点损伤阶段,实验采集了 CCD 对探测目标的成像,如图 5 所示,损伤区域的增大使得成像目标逐渐模糊,通过对比 A 区域的成像可以明显看出,白色缝隙的亮度随着损伤时间的推移而逐渐变暗。根据 CCD 探测器的实际结构^[16],综合考虑成像的因

素后发现,激光辐照 CCD 探测器时,封装玻璃对成像也有一定影响,图 6 是不同损伤时间下封装玻璃的光学显微图,放大倍数为 60。可以发现,封装玻璃上附着了大量的液滴状物质,其尺寸随着时间的推移而逐渐增大。

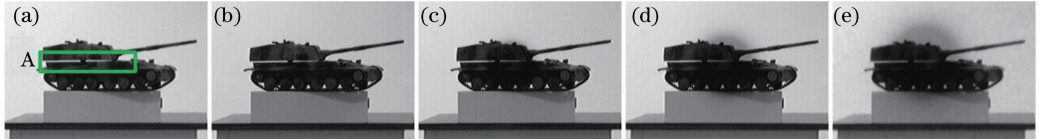


图 5 辐照不同时间后 CCD 对探测目标的成像。(a) 0 s;(b) 1.0 s;(c) 2.0 s;(d) 3.0 s;(e) 4.0 s

Fig. 5 Imaging of detection target by CCD after irradiation different time.

(a) 0 s; (b) 1.0 s; (c) 2.0 s; (d) 3.0 s; (e) 4.0 s

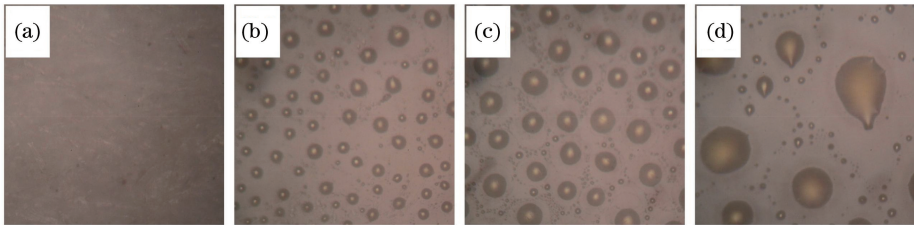


图 6 损伤时间为 1.0~4.0 s 时封装玻璃的光学显微图。(a) 1.0 s;(b) 2.0 s;(c) 3.0 s;(d) 4.0 s

Fig. 6 Optical micrographs of encapsulated glass when the damage time is from 1.0 s to 4.0 s.

(a) 1.0 s; (b) 2.0 s; (c) 3.0 s; (d) 4.0 s

微透镜阵列采用的 PI 是一种高分子材料,可以长期工作在温度约为 470 K 的环境中。当温度升高到 710 K 左右时^[20],微透镜就会出现玻璃化熔融;随着温度继续升高,熔融态微透镜汽化成小液滴,游离悬浮在 CCD 多层结构和封装玻璃之间。当激光撤离后,CCD 探测器冷却,小液滴附着在封装玻璃表面,如图 6(b)~(c)所示。当辐照时间较长时,微透镜大面积熔融,冷却时小液滴汇聚,表现为附着在封装玻璃的液滴较大,如图 6(d)所示。

3.2 纵向亮线损伤阶段

随着损伤时间的推移,CCD 探测器输出图像损伤区域中心出现小黑点,而且小黑点逐渐变大,如图 7(a)~(d)所示。当激光辐照 5.5 s 时,通过电镜可

以看到光斑中心处的铝膜层开始出现熔融;继续增加激光辐照时间,铝膜熔融面积逐渐增加,CCD 探测器损伤形貌逐渐变大,如图 7(e)~(h)所示。微透镜熔融后向四周扩展,使得单元开口面积为 30% 的铝膜层^[19]暴露在激光的辐照下,铝膜开始发生熔融和应力损伤,并随着损伤时间的推移而加剧。当辐照时间为 6.4 s 时,输出图像中心处的黑点变大,且出现了一条轻微的白色亮线,在 SEM 图中,热传导造成了应力损伤,表现为铝膜中心熔融后受应力作用而凸起,熔融的边缘产生了隆起,而未达到熔融状态的铝膜受应力的拉伸作用而撕裂,出现了清晰的裂纹,并由中心向四周延伸,这与仿真结果相似^[13,15,17]。

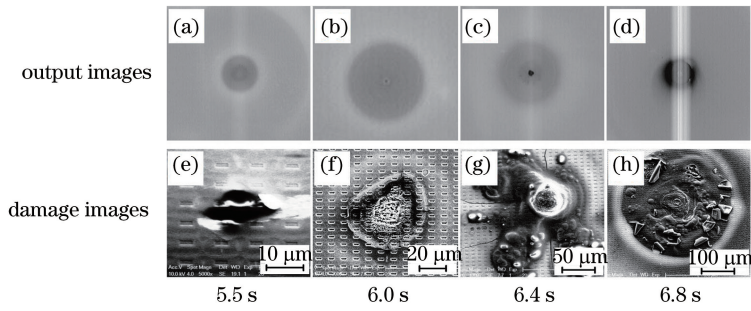


图 7 不同损伤时间下 CCD 的输出图像(302 pixel×297 pixel)和 CCD 的损伤形貌

Fig. 7 Output images of CCD (302 pixel×297 pixel) and damage images of CCD at different damage time

铝膜的熔融损伤与热应力损伤同时作用,当激光作用时间为 6.8 s 时,中心处的铝膜大面积剥落,使得漏光现象更加严重;同时由于没有了遮光铝膜的保护,内层原本分立的多晶硅电极^[13,16]因激光辐照而熔融、短路,在不同的驱动电压下产生电极间的漏电流,大量的漏电流直接进入电荷转移沟道,从而使多列像素均出现饱和,在 CCD 输出图像的竖直方向拉出白色亮线。此时,电极的驱动电压时序没有被破坏,CCD 探测器仍然能正常工作。

封装玻璃具有良好的耐热性,经常使用温度为 1100~1200 °C。微透镜喷溅物使得封装玻璃对 1.06 μm 激光的吸收增强,当辐照时间较长时,封装

玻璃出现了一定的损伤,其在光学显微镜下的损伤形貌如图 8 所示。图 8(a)~(c)的光学显微放大倍数为 25 倍,图 8(d)的放大倍数为 10 倍。封装玻璃开始出现熔融后,随着损伤的加剧,辐照区域颜色加深,边缘区域出现彩色带;当辐照时间为 6.8 s 时,辐照中心区域出现深色损伤斑。CCD 探测器多层结构的严重损伤和封装玻璃的损伤,对探测目标的成像影响如图 9 所示。对比发现:A 区域的损伤变化较大,白色缝隙变得模糊,甚至消失变黑;成像目标背景的亮度也逐渐变暗,这是由于微透镜大面积熔融,加之遮光铝膜开孔,到达感光层的光束较少,图像表现为背景灰度较低。

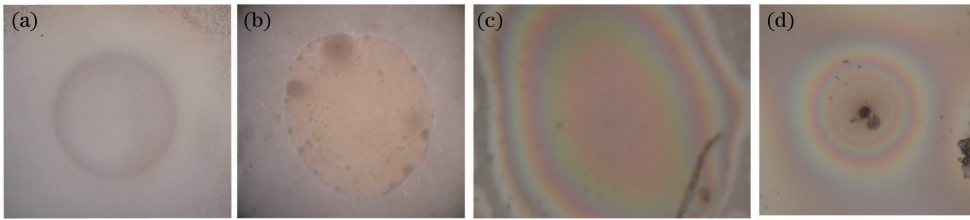


图 8 不同损伤时间下封装玻璃的损伤形貌图。(a) 5.5 s;(b) 6.0 s;(c) 6.4 s;(d) 6.8 s

Fig. 8 Damage morphology of encapsulated glass at different damage time. (a) 5.5 s; (b) 6.0 s; (c) 6.4 s; (d) 6.8 s

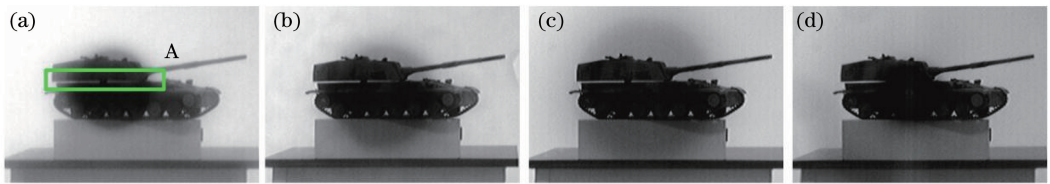


图 9 不同损伤时间下 CCD 对探测目标的成像。(a) 5.5 s;(b) 6.0 s;(c) 6.4 s;(d) 6.8 s

Fig. 9 Imaging of detection target by CCD at different irradiation time. (a) 5.5 s; (b) 6.0 s; (c) 6.4 s; (d) 6.8 s

3.3 横向暗线损伤阶段

激光辐照时间为 7.0 s 时,CCD 探测器输出图像中出现了一条横向的黑色暗线,如图 10(a)所示。结合 CCD 探测器的工作原理和多层结构(图 1),通过电镜图能够明显看到光斑半径内的铝膜已经严重熔融脱落,中心处的硅电极大面积地熔融流出,当激光撤离后,熔融物回流,冷却后重结晶。遮光铝膜在高温

下受应力作用而发生熔融卷曲,SiO₂周期结构层在高温下撕裂,使得激光失去阻挡而直接入射到硅电极感光单元上。由于硅材料对 1.06 μm 激光的吸收率为 67%^[19],且硅的导热性很好,因此硅电极的温度迅速升高,并发生熔融,使原本为周期结构的硅电极熔融在一起,互相连接导通,造成布线电路发生损伤,导致部分像元中的电荷无法转移而形成横向暗线。

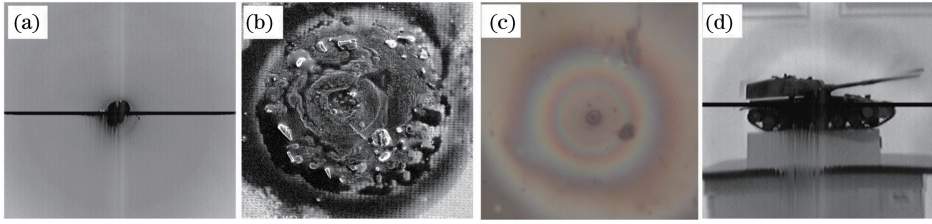


图 10 损伤时间 7.0 s 时, (a) CCD 的输出图像; (b) CCD 多层结构的 SEM 形貌; (c) 受损的封装玻璃; (d) 探测目标成像
Fig. 10 (a) Output image of CCD; (b) SEM morphology of CCD multilayer structure; (c) damaged encapsulates glass; (d) detection target image when damage time is 7.0 s

激光辐照时间为 7.0 s 时, 封装玻璃的损伤更加严重, 部分区域在激光的烧灼下变成黄褐色, 如图 10(c) 所示。由 CCD 的输出图像可以看出部分像元已经受损, 无法成像; 通过 CCD 探测器对探测目标的成像可以看出, 探测目标的成像效果差, 在竖直方向拉出丝状, 水平的桌面已经显示弯曲, 如图 10(d) 所示。

3.4 建立损伤评估方程

采用 4 种尺度来评估目标的成像质量随激光辐照时间的变化, 前两种表征的是目标成像清晰度, 后两种表征的是形态学的检测。

1) Tenengrad 函数

Tenengrad 函数^[21]是一种常用的图像清晰度评价函数, 是一种基于梯度的函数。在图像处理中, 一般认为对焦好的图像具有更尖锐的边缘, 故具有更大的梯度函数值。Tenengrad 函数使用 Sobel 算子提取水平和垂直方向的梯度值。具体过程如下:

设 Sobel 卷积核为 G_x 、 G_y , 则图像 J 在点 (x, y) 处的梯度为

$$S(x, y) = \sqrt{G_x * J(x, y) + G_y * J(x, y)}. \quad (4)$$

该图像的 Tenengrad 值为

$$E_{\text{Ten}} = \frac{1}{n} * \sum_x \sum_y S(x, y)^2, \quad (5)$$

式中: n 为图像中像素的总数; $*$ 表示卷积运算。

2) Brenner 梯度函数

$f(x, y)$ 表示图像 f 对应像素点 (x, y) 的灰度值, $D(f)$ 为图像清晰度的计算结果。函数定义为^[21]:

$$D(f) = \sum_y \sum_x |f(x+2, y) - f(x, y)|^2. \quad (6)$$

3) 分割精度(SA)

激光损伤光电成像检测系统的作用效果主要体现在对系统内置的目标检测算法的影响上, 选用常

用的目标检测算法, 即最大类间方差法 (OTSU) 作为目标识别分割算法, 来定量分析激光损伤对成像检测系统的影响。具体方法为: 对不同辐照时间时 CCD 探测器的目标成像图进行边缘提取和形态学运算, 得到二值图像。利用 OTSU 算法进行阈值分割, 计算不同图像的分割精度。

分割精度的定义为^[22]

$$E_{\text{SA}} = E_{\text{SAS}}(1 - E_{\text{SAE}})(1 - E_{\text{SAL}}), \quad (7)$$

式中: E_{SAS} 为算法分割率; E_{SAE} 为过分割率; E_{SAL} 为欠分割率; $E_{\text{SAS}} + E_{\text{SAE}} + E_{\text{SAL}} = 1$ 。

4) Q 参数

$x = \{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示无损伤的探测目标原始成像, $y = \{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 表示不同损伤时间下的目标成像情况。根据文献^[23]中的表述, 定义图像质量指标 Q 参数为

$$Q = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)[(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x + \sigma_y} \times \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \times \frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (8)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$; $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$; $\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$; $\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$; $\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 。

根据上述评估方法, 对不同损伤时间下 CCD 探测器的成像进行评估, 归一化处理后, 统计结果如表 1 所示, 做出对应的曲线图如图 11 所示。

由图 11 可以看出, Tenengrad 函数尺度和 Brenner 函数尺度在点损伤阶段 (1.0~4.0 s) 很好地符合了损伤加剧、成像质量下降的情况, 虽然后期的损伤更加严重, 甚至出现了黑色暗线, 可是由函数的表达式可知, 暗线和黑斑的清晰度却是很高的, 但这不是目标的清晰度。从主观观察角度来说, 点损伤表现为目标成像变暗、变模糊, 在线损伤阶段, 目标

被逐渐变粗的暗线遮挡,形态发生改变。也就是说,在线损伤阶段,清晰度函数可以同时评定未被遮挡的目标区域和暗线黑斑区域的清晰度,因此该评定结果不能真实地反映探测目标的成像清晰度,所以该函数对线损伤阶段不适用。分割精度和 Q 参数

是对形态学的检测,发生深层次的损伤时,黑斑和横向暗线对目标的阻挡和干扰使得成像目标的部分信息缺失,探测目标的形态检测受到极大影响,因此线损伤阶段(5.5~7.0 s)的成像质量逐渐降低,而点损伤阶段图像的质量波动却比较大。

表 1 不同损伤时间下图像的尺度计算结果

Table 1 Calculation results of image scale at different damage time

Time /s	1.0	2.0	3.0	4.0	5.5	6.0	6.4	6.8	7.0
E_{Ten}	0.98	0.92	0.79	0.47	0.26	0.55	0.62	0.70	0.76
$D(f)$	0.93	0.92	0.73	0.41	0.22	0.56	0.55	0.58	0.54
E_{SA}	0.61	0.57	0.89	0.69	0.46	0.46	0.44	0.42	0.39
Q	0.46	0.42	0.43	0.32	0.38	0.36	0.34	0.25	0.19

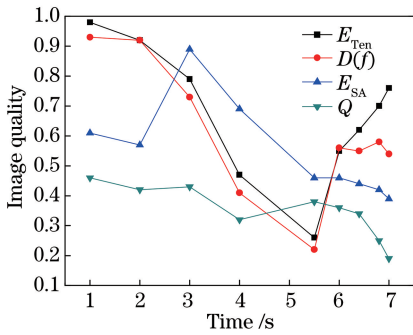


图 11 不同损伤时间下的图像质量

Fig. 11 Images quality at different damage time

结合损伤的发展和影响成像质量的因素可知:在点损伤阶段(1.0~4.0 s),表现为微透镜层的熔融与扩展,下层结构未见损伤,此时由于微透镜失去了聚焦光束的能力,到达光敏层的入射激光减少;微透镜熔融汽化后附着在封装玻璃表面,因此探测器的成像情况表现为图片的清晰度降低,采用清晰度的评估方法较为准确;在线损伤阶段(5.5~7.0 s),不仅多层结构有更深层次的损伤,入射激光对封装玻璃也有一定的损伤,表现为探测器成像能力的削弱,因此采用分割精度和 Q 参数相结合的评估方法较为准确。需要说明的是,在 5.5 s 时,铝膜层刚刚开始出现熔融,但感光单元仍然可以成像,可以认为 5.5 s 是点损伤阶段与线损伤阶段的一个临界过渡点,因此 5.5 s 时的损伤形貌符合点损伤阶段的损伤评估趋势。

图 12 为 CCD 探测器损伤后的成像能力随损伤时间的变化,可以看出:曲线的整体趋势是下降的,也就是说 CCD 探测器成像质量不断下降,这符合损伤进程的规律;在点损伤阶段(1.0~4.0 s),图像成像质量下降速率较快,这是由于微透镜的熔点较低,激光辐照时微透镜熔融汽化,失去聚焦光束的能力,进光量减少,图像的灰度下降得较快;在线损伤阶段(5.5~7.0 s),微透镜已经大面积熔融,整个图像的灰度值相对较低,此时探测器的下层结构开始损伤,随着辐照时间的推移,部分感光单元失去成像能力,在目标成像中形成暗斑和暗线,使成像目标的部分信息缺失,损伤加剧,CCD 探测器的成像质量和成像能力逐渐降低。

定义 CCD 探测器损伤后的成像能力指数 (E_{ICI}),根据上述分析,对不同损伤阶段采取不同的评价指标进行分段评定,拟合后的损伤评估方程为

$$E_{ICI} =$$

$$\begin{cases} 50\%E_{Ten} + 50\%D(f), & \text{point damage}(1.0-4.0 \text{ s}) \\ 50\%Q + 50\%E_{SA}, & \text{line damage}(5.5-7.0 \text{ s}) \end{cases}$$

(9)

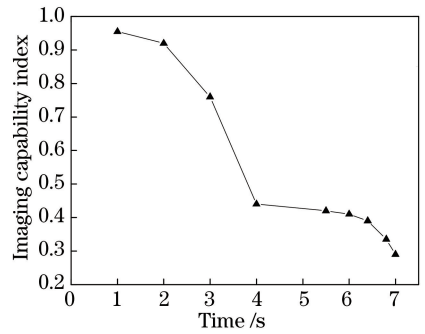


图 12 损伤评估方程曲线

Fig. 12 Curve of damage assessment equation

CCD 探测器损伤后的成像能力指数包含两个方面,即点损伤阶段的清晰度评定和线损伤阶段的形态学检测。若更换成像目标时,表 1 的结果将会受到一定影响,但总体趋势不变。原因是:在点损伤阶段,CCD 探测器的像元并没有丧失成像能力,成像能力指数评估的是整个成像区域图像的清晰度,成像的清晰度取决于 CCD 探测器本身而非成像目标,因而更换成像目标时该阶段基本不受影响;在线损伤阶段,由于分割精度和 Q 参数更加偏向于形态

学的检测评定,不仅要与原始图像进行对比,还需要提取探测目标的形态边缘;在线损伤阶段,CCD探测器部分像元因损伤而失去成像能力,出现纵向亮线、横向暗线和黑斑,因而更换成像目标后,成像目标的大小将对形态学检测有较大影响,表1中的数值也将会有所变化,但对于在损伤区域成像的同一目标而言,其成像质量的趋势不会变化。

理论上讲,成像能力指数对于符合CCD探测器这种经历点损伤、纵向亮线损伤和横向暗线损伤的情况具有普适性。

4 结 论

通过实验研究了 $1.06\ \mu\text{m}$ 连续激光辐照损伤CCD探测器的进程及不同损伤阶段CCD探测器成像能力的削弱程度。采用预实验的方式确定了完全损伤的大致时间,之后梯度化时间,变动态过程为静态监测,研究了不同辐照时间下CCD探测器的损伤情况。通过实验记录损伤进程,结合激光辐照对封装玻璃的影响和探测器的损伤机理,解释了各个损伤阶段成像质量变化的原因。结果表明:在点损伤阶段(1.0~4.0 s),微透镜熔融汽化,失去聚焦光束的能力,使得进光量减少,图像的灰度降低;激光撤离后,汽化的微透镜冷却,附着在封装玻璃表面,这是成像质量下降的主要原因;在线损伤阶段(5.5~7.0 s),微透镜已经大面积熔融,整个图像的灰度值相对较低;激光的持续作用使得CCD探测器的下层结构开始损伤,部分感光单元失去成像能力,在目标成像中形成暗斑和暗线,使得成像目标的部分信息缺失,损伤加剧,加上激光对封装玻璃的损伤,使得CCD探测器的成像质量和成像能力逐渐降低。

以已有的评估方法为基础,结合损伤实验的实际情况,通过清晰度评定和形态学检测相结合的方式,建立了定量评价函数,对不同损伤阶段的成像能力和成像质量进行了评估,达到了损伤时间、损伤形貌、损伤阶段和成像能力相对应的目的。

参 考 文 献

- [1] Durécu A, Bourdon P. Laser-dazzling effects on TV cameras: analysis of dazzling effects and experimental parameters weight assessment [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6738: 67380L.
- [2] Durécu A, Vasseur O, Bourdon P, *et al.* Assessment of laser-dazzling effects on TV-cameras by means of pattern recognition algorithms [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6738: 67380J.
- [3] Sun Y Q. Methods investigation of the quality assessment aimed at laser-disturbed image [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
孙运强. 激光干扰图像质量评价方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [4] Xu Y, Sun X Q, Shao L. Fuzzy synthetic evaluation method for laser jamming to CCD imaging performance[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7850: 78501V.
- [5] Wu Y L, Sun X Q, Yan F, *et al.* Image metrics analysis of laser interference effect based on edge[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1010005.
吴云龙, 孙晓泉, 闫飞, 等. 基于边缘强度相似性的干扰图像尺度分析[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1010005.
- [6] Wu Y L, Shao L, Zhang K, *et al.* Image metric analysis of laser jamming effect based on wavelet energy and spot size [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(7): 832-838.
吴云龙, 邵立, 张恺, 等. 基于小波能量和光斑尺寸的干扰图像尺度分析[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 832-838.
- [7] Zhang Z, Cheng X A, Wang R, *et al.* Dazzling effect of repetitive short pulse laser on TDI CCD camera [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(2): 292-296.
- [8] Ni J, Yuan J H, Wu Q Z. Identification for optical image definition based on edge feature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 172-176.
倪军, 袁家虎, 吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判定[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 172-176.
- [9] Qian F, Sun T, Guo J, *et al.* Dynamic assessment of laser-dazzling effects based on the character of laser-spot and image feature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0609004.
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 基于光斑与图像特征的动态激光干扰效果评估[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609004.
- [10] Qian F, Guo J, Sun T, *et al.* Quantitative assessment of laser-dazzling effects through wavelet-weighted multi-scale SSIM measurements[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 67: 183-191.
- [11] Qian F, Sun T, Guo J, *et al.* Assessment algorithm of laser-dazzling effects based on the feature-point distributing characteristic [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0509001.
钱方, 孙涛, 郭劲, 等. 基于特征点分布特性的激光干扰效果评估算法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0509001.
- [12] Li M X, Jin G Y, Tan Y, *et al.* Study on the

- mechanism of a charge-coupled device detector irradiated by millisecond pulse laser under functional loss[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1257-1261.
- [13] Li M X, Jin G Y, Tan Y. Simulation of the Si-CCD irradiated by millisecond pulse laser [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 131: 67-71.
- [14] Hao X N, Li H, Nie J S, *et al.* Experiment of visible CCD damaged by laser operating in different state[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(9): 113-118.
郝向南, 李化, 聂劲松, 等. 不同工作状态激光对可见光 CCD 的损伤实验[J]. *光电工程*, 2012, 39(9): 113-118.
- [15] Nie J S, Wang X, Li H, *et al.* Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by 1.06 μm laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 380-386.
聂劲松, 王玺, 李化, 等. 1.06 μm 激光辐照 CCD 探测器的热力效应分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 380-386.
- [16] Li Z W, Wang X, Shen Z H, *et al.* Mechanisms for the millisecond laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 378-388.
- [17] Han M, Wang X, Nie J S, *et al.* Temporal evolution characteristics and damage threshold of CCD detector irradiated by 1.06- μm continuous laser [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 157: 1282-1291.
- [18] Shao J F, Liu Y, Wang T F, *et al.* Damage effect of charged coupled device with multiple-pulse picosecond laser[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(9): 1408-1413.
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.
- [19] Zhang F, Niu Y X, Liu N, *et al.* Research of temperature field and thermal stress field of CCD under laser irradiation[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(3): 433-437.
张帆, 牛燕雄, 刘宁, 等. 激光辐照 CCD 温度场与热应力场的研究 [J]. *激光技术*, 2017, 41(3): 433-437.
- [20] Jiang N, Zhang C, Niu Y X, *et al.* Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1004-1007.
姜楠, 张雏, 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.
- [21] Shen Q. Research and improvement of digital image clarity evaluation function[J]. *Microcomputer & its Applications*, 2011, 30(1): 34-36.
申勤. 数字图像清晰度评价函数的研究与改进 [J]. *微型机与应用*, 2011, 30(1): 34-36.
- [22] Li M, Zhou Z H, Zhang G L. Image measures in the evaluation of ATR algorithm performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 412-416.
李敏, 周振华, 张桂林. 自动目标识别算法性能评估中的图像度量 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 412-416.
- [23] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 9(3): 81-84.