

大功率激光对 CCD 探测器损伤研究

程相正^{1,2}, 邵 铭^{1,2}, 曲卫东^{1,2}, 邵俊峰³, 李武周^{1,2}, 范 瑜^{1,2}

(1. 中国人民解放军 63891 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要:针对大功率激光辐照可见光成像探测器损伤机理,开展了 1080 nm 波段大功率连续激光对 CCD 探测器损伤模型仿真与实验研究。首先,基于 CCD 典型结构及各层材料特性,建立了连续激光对 CCD 探测器热效应损伤模型,仿真模拟了 CCD 各层瞬态温度场和应力场,分析了连续激光损伤 CCD 多层结构的时间演化规律;其次,开展了连续激光对 CCD 探测器损伤实验,获取了 CCD 损伤阈值,并利用金相显微镜、扫描电镜对 CCD 探测器各层熔融情况进行了分析;最后,对模型仿真与损伤实验结果进行了对比,并分析了损伤阈值存在差异的原因。结果表明,1080 nm 连续激光辐照可见光 CCD 探测器 400 ms 时的仿真损伤阈值为 $1.45 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,实验损伤阈值 $2.13 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,误差约为 31.9%。仿真与实验结果对探究大功率激光辐照 CCD 探测器损伤机理、评估干扰效果具有一定的参考意义。

关键词:大功率连续激光;CCD;损伤;模型仿真;实验

中图分类号:TN249;TN977 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.018

Research on high-power laser damage to CCD detectors

CHENG Xiang-zheng^{1,2}, SHAO Ming^{1,2}, QU Wei-dong^{1,2}, SHAO Jun-feng³, LI Wu-zhou^{1,2}, FAN Yu^{1,2}

(1. Unit 63891 of the PLA, Luoyang 471003, China;
2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Text & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China;
3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the damage mechanism of visible light imaging detector irradiated by high-power tactical laser, the damage simulation and experimental study on CCD detector by high-power continuous laser at 1080 nm band are carried out. Firstly, based on the typical structure of CCD and the material characteristics of each layer, the thermal damage model of CCD detector caused by continuous laser is established. The transient temperature field and stress field of each layer of CCD are simulated, and the time evolution law of continuous laser damage to CCD multilayer structure is analyzed. Secondly, the damage experiment of CCD detector by continuous laser is carried out to obtain the CCD damage threshold, and the melting of each layer of the CCD detector is analyzed by metallographic microscope and scanning electron microscope. Finally, the results of model simulation and damage experiment are compared, and the reasons for the difference in damage thresholds are analyzed. The results show that the simulated damage threshold of visible CCD detector irradiated by 1080 nm continuous laser for 400 ms is $1.45 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, and the experimental damage threshold is $2.13 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, with an error of about 31.9%. The simulation and experimental results have certain reference significance for exploring the damage mechanism of CCD detectors irradiated by high-power laser and evaluating the interference effect.

Keywords: high power continuous laser; CCD; damage; model simulation; damage experiment

基金项目: 试验技术研究重点项目 (No. 2200110033); 重点实验室开放课题基金项目 (No. GKCP2020004) 资助。

作者简介: 程相正 (1989 -), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为光电及光电对抗试验评估技术。E-mail: 846248088@qq.com

收稿日期: 2023-05-03; **修订日期:** 2023-06-03

1 引言

自 1960 年第一台激光器问世,激光在军事领域的应用研究即随之展开,各种军用激光技术应运而生^[1]。近年来,随着激光技术的发展,大功率激光武器成为各国研究的热点^[2-3]。大功率激光武器通过对光电制导观瞄装备的探测器实施致盲损伤,从而达到降低敌作战能力的目的^[4]。CCD 探测器具有成像分辨率高、功耗和成本低、灵敏度高、动态范围大等特点,广泛应用于光电观瞄、光电制导等军事领域^[5-6]。利用激光破坏 CCD 探测器的成像性能,是军事竞争双方削弱对方战斗力的重要手段之一。

激光对 CCD 的干扰损伤效应研究是近期研究热点。谭群^[7]、袁航^[8]、聂劲松^[9]、易琰^[10]等学者开展了激光辐照 CCD、TDI-CCD 相机干扰损伤效应机理进行了仿真分析,建立了激光辐照 CCD 探测器的数学模型,利用有限元法分析了 1.06 μm 激光辐照 CCD 探测器中的温度和应力分布。但已有研究尚未分析连续激光损伤 CCD 多层结构的时间演化规律,尚未开展连续激光对 CCD 探测器损伤实验对仿真模型进行验证。本文选用波长为 1080 nm 的典型大功率连续激光,针对大功率激光辐照可见光成像探测器损伤机理,建立了连续激光对 CCD 探测器热效应损伤模型,仿真分析了连续激光损伤 CCD 多层结构的时间演化规律,开展了连续激光对 CCD 探测器损伤实验,分析了 CCD 探测器各层熔融情况,对模型仿真与损伤实验结果进行了对比,并分析了存在差异的原因。

2 连续激光对 CCD 探测器损伤模型仿真

2.1 连续激光对 CCD 探测器热效应损伤模型

典型 CCD 探测器结构如图 1 所示,按入射光线方向组成材料依次为微透镜层、金属遮光 Al 膜层、SiO₂ 增厚层、Si 电极层、SiO₂ 绝缘层、基底 Si 层^[10],其中构成微透镜的主要材料为聚酰亚胺 PI。PI 及 SiO₂ 对 1080 nm 的激光吸收率几乎为 0,激光能量被微透镜通过金属层开口聚焦到基底 Si 表面,金属 Al 层不受激光辐照,基底 Si 对 1080 nm 激光有较强

的吸收率^[11]。因此,可以将激光辐照 CCD 看成是 CCD 基底 Si 上加了一个热源。基于这种思想,对 CCD 探测器热效应损伤模型进行简化。

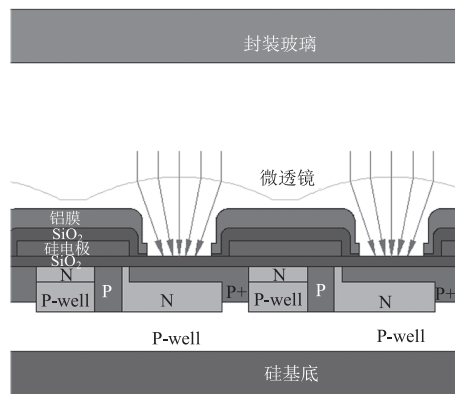


图 1 典型 CCD 探测器结构

Fig. 1 Typical CCD detector structure

连续激光损伤机理主要为热效应,可根据热传导理论模拟连续激光与 CCD 相互作用的过程。对于 CCD 探测器层状材料,热传导方程为:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i(x, y, z, t)}{\partial t} = k_i \nabla^2 T_i(x, y, z, t) +$$

$$Q(i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

式中, $T_i(x, y, z, t)$ 、 ρ_i 、 c_i 、 k_i 分别表示 CCD 第 i 层温度场分布、材料密度、比热容、热传导率; Q 为沉积在基底硅层的激光体热源。

边界条件为:

$$-k \frac{\partial T_i(x, y, z, t)}{\partial n_i} = 0 \quad (2)$$

初始条件为:

$$\partial T(x, y, z, t) |_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

其中, T_0 为初始温度;假设为 298 K。

各层材料之间满足温度连续及热流平衡条件材料均匀且各向同性,材料的各热学和力学参数不随温度的升高而变化,取为常数,则材料的热力学参数见表 1。

由于 PI、SiO₂ 层对 1080 nm 激光的吸收系数很小,认为不吸收光能,故沉积在基底 Si 层的激光能量为:

表 1 材料的热力学参数

Tab. 1 Thermodynamic parameters of materials

材料	密度/(kg · m ⁻³)	热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	膨胀系数/K ⁻¹	泊松比	熔点/K
PI	1530	0.12	1090	2.0 × 10 ⁻⁵	0.3	607
Al	2700	238	1050	2.29 × 10 ⁻⁵	0.3	932
SiO ₂	2640	1.3	786	5.0 × 10 ⁻⁵	0.17	1880
Si	2520	27	1009	2.0 × 10 ⁻⁵	0.2	1685

$$Q = I_0 \alpha (1 - R) f_{\text{Si}}(x, y) g(t) \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

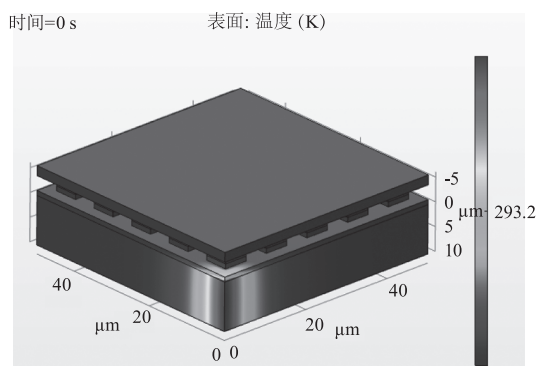
式中, I_0 为入射激光功率密度; 硅层的吸收系数 α 为 800 cm^{-1} ; 反射系数 R 约为 0.33; $f_{\text{Si}}(x, y)$ 为沉积在 Si 层的激光能量空间分布; $g(t)$ 为激光能量时间分布。

2.2 损伤模型仿真结果

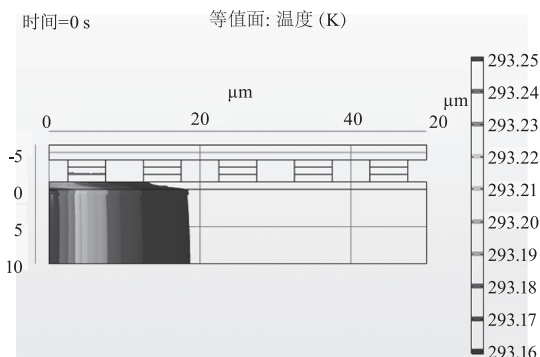
基于 1080 nm 激光辐照 CCD 探测器热效应损伤模型, 固定激光辐照时间 400 ms, 设置的激光半径为 $5 \mu\text{m}$, 能量分布满足高斯分布, 利用 COMSOL Multiphasic 软件对 CCD 瞬态温度场和应力场进行数值模拟, 分析连续激光损伤 CCD 多层结构的时间演化规律。

$t=0$ 时刻, 激光开始辐照探测器, 光斑中心位置开始升温, 但温升幅度非常小。热源加载到底层 Si 层, 由于 Si 对 1080 nm 连续激光的吸收系数很小, 材料层厚度很薄, 因此激光对 Si 的穿透力很强, 此时还没有出现明显的热传递现象, 如图 2 所示。

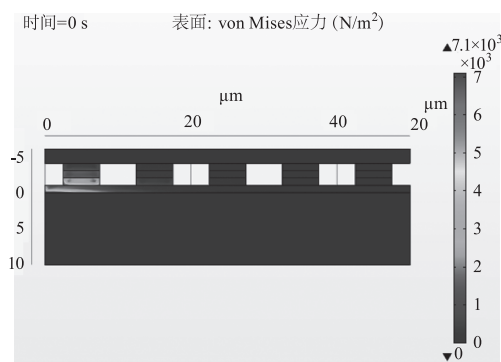
从图 2 可以看出, 除了光斑中心区域, 其他区域材料的温度基本没有变化, 非常接近初始值温度 293.15 K。全域应力最大值为 $7.1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$, 位置出现在 SiO_2 和 Si 接触面附近, 最大位移为 $1.7 \times 10^{-7} \mu\text{m}$, 位置出现在 SiO_2 层。因此, 在初始时刻全域基本没有温升和热传递发生, 内部没有大的应力和位移形变。



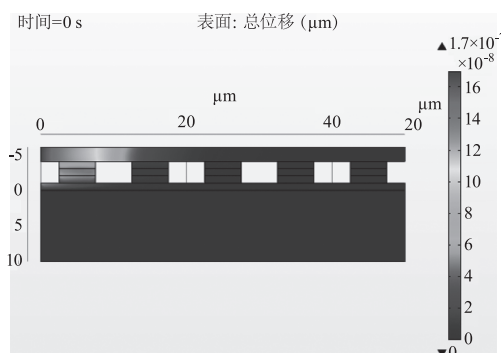
(a) 表面温度分布图



(b) 等温面图



(c) 应力分布图

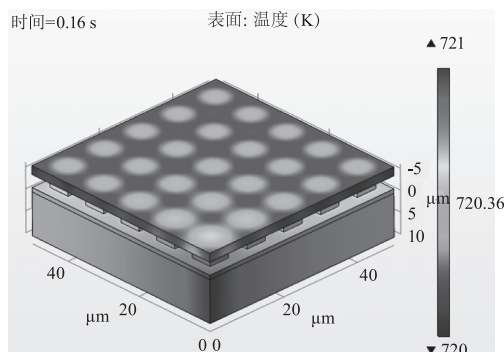


(d) 表面总位移图

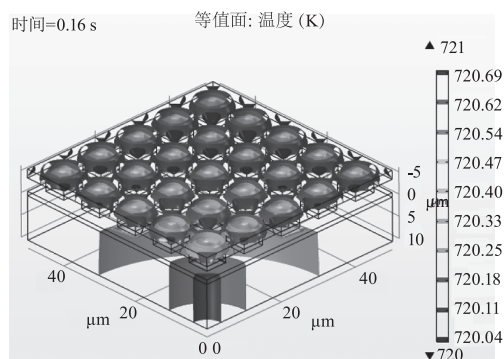
图 2 $t=0$ 时刻 CCD 内部热力学表面分布

Fig. 2 Thermodynamic surface distribution inside CCD at $t=0$

时间 $t=160 \text{ ms}$ 时刻, 模型全域最高温度达到 721 K, 最低温度超过 720 K。最低温度出现在 PI 层, 其已经熔化, 但是 PI 层以外区域温度均未达到熔点因此并没有发生熔化, 如图 3 所示。



(a) 表面温度分布图



(b) 等温面图

图 3 $t=160 \text{ ms}$ 时刻 CCD 内部热力学表面分布

Fig. 3 Thermodynamic surface distribution inside CCD at $t=160 \text{ ms}$

时间 $t = 240$ ms 时刻, 模型全域温度将近 1000 K, 超过了 Al 层的熔点, 此时 Al 层发生熔化。从表面应力分布上来看, 应力最大值出现在 Al 和 SiO_2 层接触的附近, 达到了 $1.77 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 说明在此温度下, 模型内部已经出现了比较大的位移变形, 如图 4 所示。

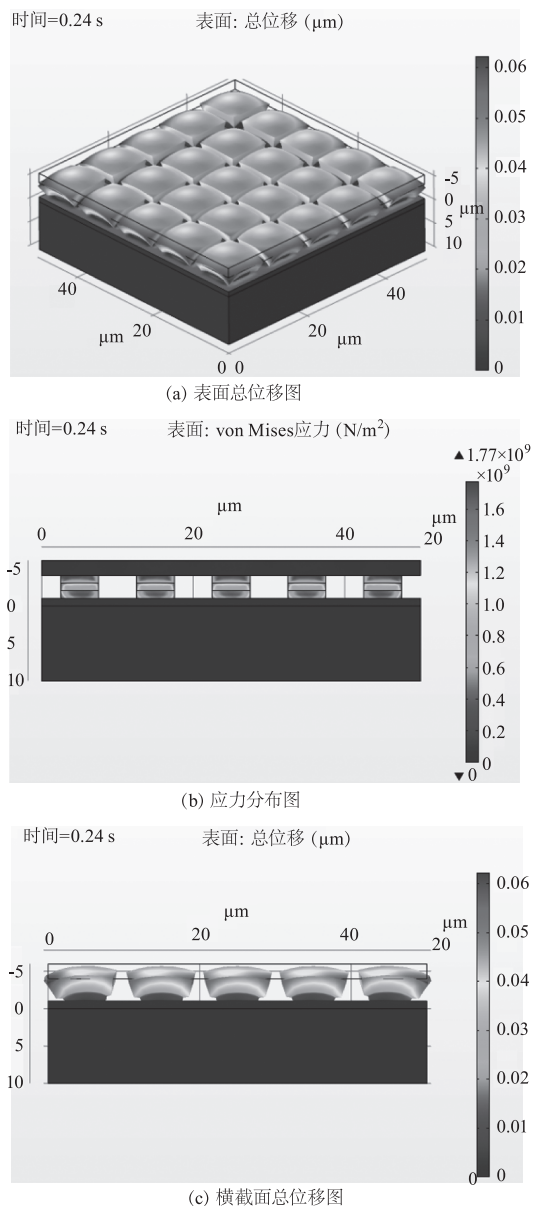


图 4 $t = 240$ ms 时刻 CCD 内部热力学表面分布

Fig. 4 Thermodynamic surface distribution inside CCD at $t = 240$ ms

时间 $t = 400$ ms 时刻, 模型全域温度达到 1310 K, 多晶 Si 和 SiO_2 之间的应力值达到最大 $2.86 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 位移变形进一步扩大, 但增长幅度有限, 如图 5 所示。因此, 从 $t = 240$ ms 到 $t = 400$ ms, 内部主要是以热传导的方式继续向周围进行扩散, 直到其他区域 Al 层和 PI 层的温度超过熔点发生熔化。从仿真结果来看, 探测器表面至少 10×10 像素范围内的 PI

层和 Al 层达到熔点, 出现热烧蚀现象, 已经到了面损伤层级, 激光功率为 $1.45 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 即 1080 nm 连续激光辐照可见光 CCD 探测器 400 ms 时的损伤阈值为 $1.45 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

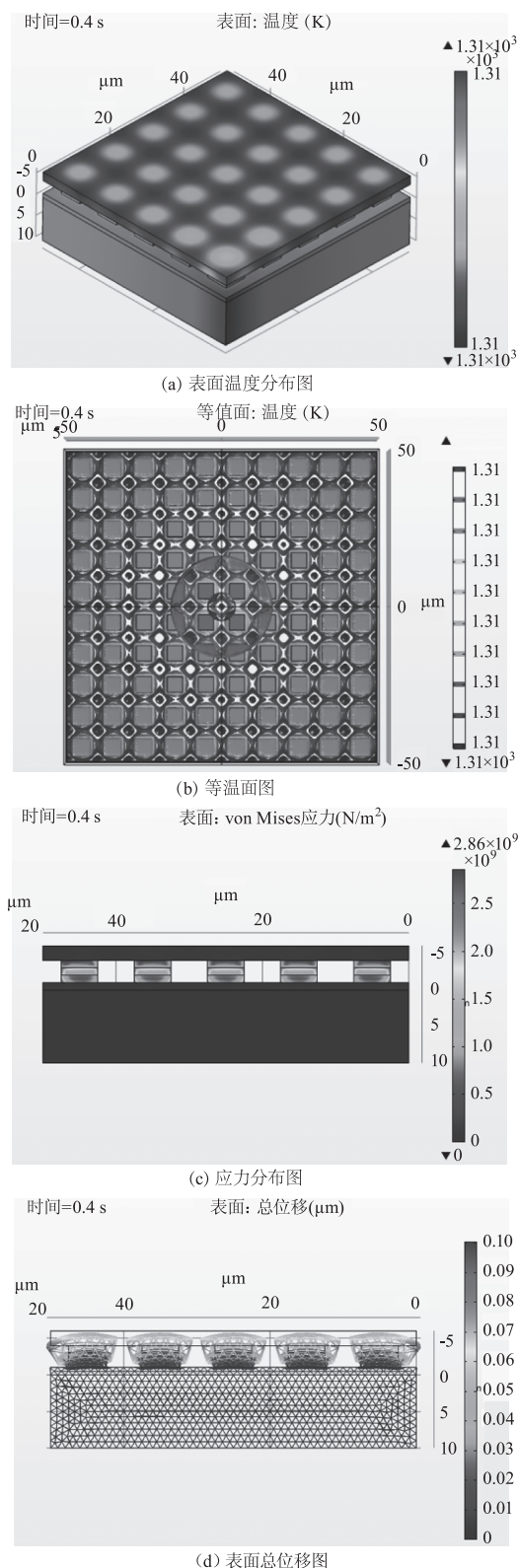


图 5 $t = 400$ ms 时刻 CCD 内部热力学表面分布

Fig. 5 Thermodynamic surface distribution inside CCD at $t = 400$ ms

通过研究最高温度变化曲线可以得到内部的传热关系。图 6 为 CCD 模型各层结构在不同计算时间下的最高温度,可以看出各层最高温度随时间呈线性变化。因此可以判断,如果激光继续加载,那各层最高温度将在此基础上继续线性变化。此外,可以看出各层之间最高温度的差距较小,说明长时间照射导致内部升温比较均匀,没有出现大的温差。

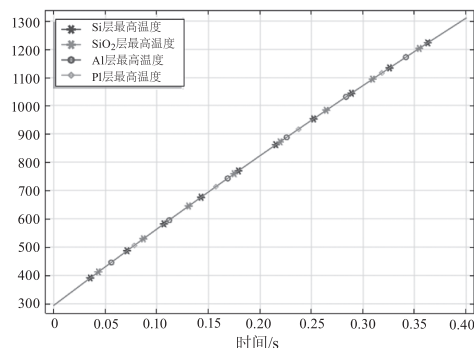


图 6 各层最高温度随时间变化曲线

Fig. 6 Curve of maximum temperature of each layer with time

从最大应力图上看出,最大应力随时间同样呈现线性变化,最大应力在 SiO_2 层,其次 Al 层, Si 层和 PI 层应力最小。时间越长,温度越高,应力差距越大。从最大位移图上看出,最大位移随时间呈现线性变化,最大位移出现在 PI 层,其次 Al 层, Si 层的位移变形量基本为 0,变化最小。

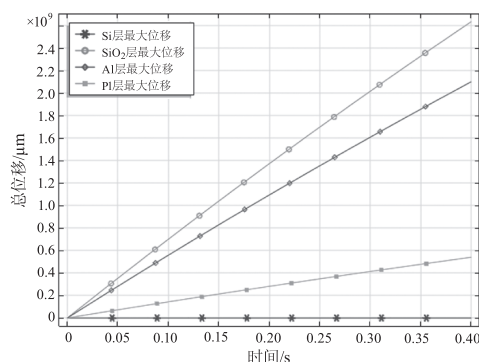


图 7 各层最大应力随时间变化曲线

Fig. 7 Curve of maximum stress of each layer with time

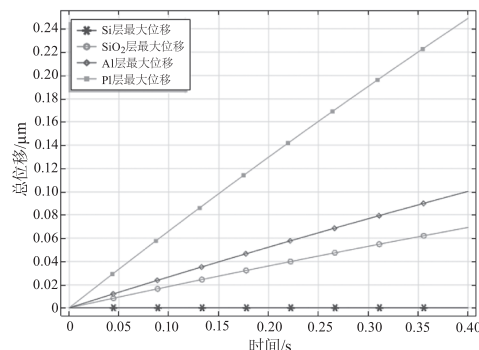


图 8 各层最大位移随时间变化曲线

Fig. 8 Curve of maximum displacement of each layer with time

3 连续激光对 CCD 探测器损伤实验

3.1 实验布局及步骤

实验选用光纤激光器输出 1080 nm 连续激光对 CCD 探测器进行损伤实验。光纤激光器的输出功率 30 W ~ 3000 W, 连续波 (CW) 单模输出光, 光束质量 M2 不大于 1.2, 功率不稳定性优于 2 %。WAT-902b 型 CCD 探测器光谱响应范围 0.4 μm ~ 1.1 μm , 像元数 752 $\times$ 582, 像元尺寸 8 μm 。实验布局如图 9 所示, 分束镜将一路激光导入功率计进行功率监测, 另一路激光对 CCD 探测器进行直瞄式干扰, 图像采集处理系统实时采集和存储 CCD 输出图像。实验时, 利用光开关固定激光辐照时间 400 ms (与仿真一致), 通过衰减片、格兰棱镜、半波片逐步增大到靶激光功率, 完成了连续激光对 CCD 探测器损伤实验。

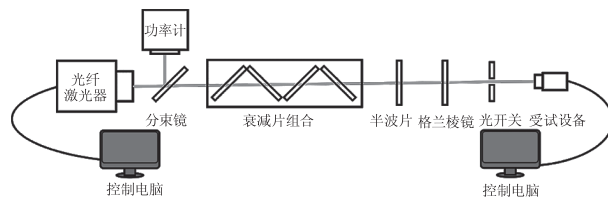


图 9 损伤实验布局图

Fig. 9 Layout diagram of damage experiment

3.2 损伤实验结果

逐步增大到靶激光功率, 当功率密度增大至 $2.13 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, CCD 探测器出现面损伤, 输出图像如图 10 所示。因此, 可得 CCD 探测器实验损伤阈值为 $2.13 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

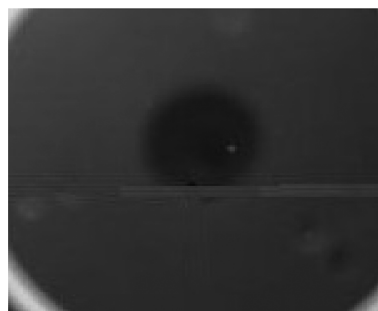


图 10 CCD 输出图像(面损伤)

Fig. 10 CCD output image (surface damage)

金相显微镜下可以观察到, CCD 探测器烧蚀区域近乎圆形, 直径约为 71 μm , 如图 11 所示。烧蚀边缘区域主要是 PI 层出现熔融现象, 但并不彻底。在越靠近烧蚀中心区域, 烧蚀现象越严重, 受到金相显微镜物镜景深所限, 不能够进一步观察清楚。

在扫描电子显微镜下, 可以明显看清烧蚀后的内部结构, 如图 12 所示。烧蚀区域的最外层是不完

全烧蚀的 PI 层,该层由于 PI 层熔化从而铺满整个的外层区域,此时最外层区域的像素分界线无法分辨。从形貌上看,PI 层呈现明显的中心向外的波浪形烧蚀形貌且较为平整,中心区域烧蚀形貌并不规则,烧蚀区域的中心层和外层存在明显的分割线。

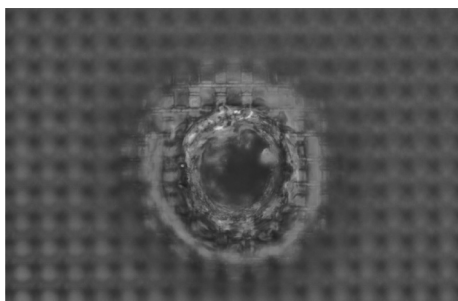


图 11 损伤形貌(金相显微镜)

Fig. 11 Damage morphology(metallographic microscope)

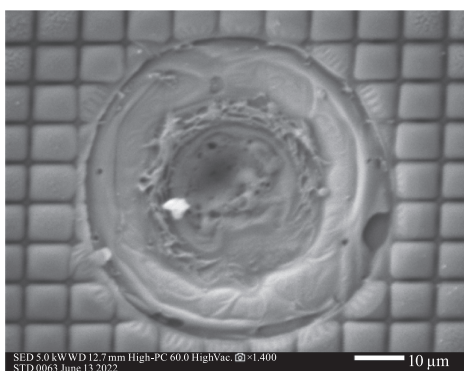
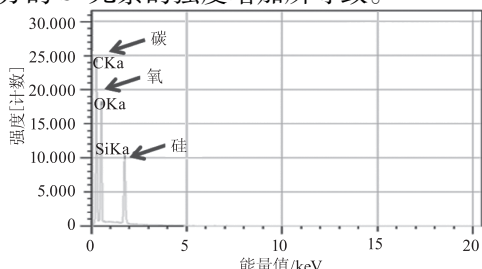


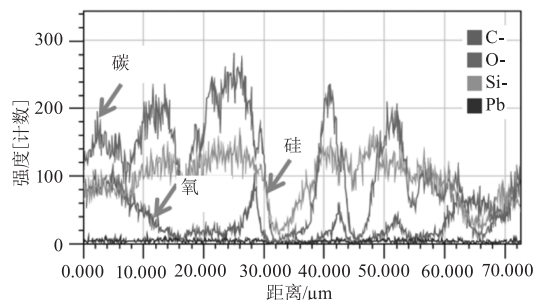
图 12 损伤形貌(扫描电镜)

Fig. 12 Damage diagram(scanning electron microscope)

画一条贯穿损伤区域的直线对烧蚀区域进行线分析,结果显示烧蚀区域主要包含 C 元素、O 元素和 Si 元素。在外层边缘区域相较于中心区域 C 和 O 元素含量明显更高,对应了烧蚀区域外层主要是不完全熔化后的 PI 层。烧蚀中心区域 C 和 O 元素含量明显低, Si 含量比较高,这是由于在中心区域 PI 层烧蚀后露出了内部材料,由于元素中不再包含 Al 元素,说明烧蚀中心区域,不光发生了 PI 气化,遮光 Al 层也熔化后消失。Si 元素的分布有所不同,除了在烧蚀中心区域会有明显的强度分布,烧蚀外围同样有强度分布,这是由 PI 层烧蚀不完全,厚度降低,其下方的 Si 元素的强度增加所导致。



(a) 线分析元素强度统计



(b) 线分析元素强度分布

图 13 线元素分析结果

Fig. 13 Line element analysis results

4 仿真与实验结果比对

模型仿真和损伤实验结果均表明, CCD 探测器在损伤前, PI 层都出现有大规模的烧蚀现象, 金属 Al 膜层均发生了融化。1080 nm 连续激光辐照可见光 CCD 探测器 400 ms 时的仿真损伤阈值为 $1.45 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 实验损伤阈值 $2.13 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 误差约为 31.9 %, 验证了仿真模型的科学性、准确性。

经分析, 仿真与实验损伤阈值存在偏差的原因主要有两个方面: 一方面, 模型仿真时 CCD 各层材料比热容、热传导率等参数均设定为常数, 没有考虑材料的参数随温度的变化, 因而造成了一定的误差。另一方面, 虽然 CCD 的某层结构已经被损伤破坏, 但实际损伤实验时, 该材料并未消失, 仍然会对激光的辐照造成一定的影响, 而模型仿真中, 忽略了残留物质对激光入射的影响。此外, 仿真计算时, 圆形激光光斑扩展后, 模拟激光正面直接辐照; 在实际的损伤实验中, 不能够保证绝对精准的正面入射, 因此实际烧蚀形貌并非绝对的圆形。

5 结论

本文主要以 1080 nm 连续激光辐照损伤 CCD 探测器为例, 开展了模型仿真及损伤实验。首先, 基于 CCD 典型结构及各层材料特性, 建立了连续激光对 CCD 探测器热效应损伤模型, 仿真模拟了 CCD 各层瞬态温度场和应力场分布; 其次, 开展了连续激光对 CCD 探测器损伤实验, 获取了 CCD 损伤阈值, 并利用金相显微镜、扫描电镜对 CCD 探测器各层熔融情况进行了分析; 最后, 对模型仿真与损伤实验结果进行了对比。结果表明, 1080 nm 连续激光辐照可见光 CCD 探测器 400 ms 时的仿真损伤阈值为 $1.45 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 实验损伤阈值 $2.13 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 误差约为 31.9 %, 验证了仿真模型的准确性。CCD 探测器热效应损伤模型对预估探测器损伤阈值具有一定的参考意义, 仿真与实验结果对探究大功率激

光辐照 CCD 探测器损伤机理、评估干扰效果具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Wang Shiling, Fang Fengzhou. High power laser and its development[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 51–64. (in Chinese)
王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 51–64.
- [2] Huang Pei, Cao Guohui, Zhang Haijing, et al. Development analysis of US army vehicle tactical laser weapons[J]. Laser Journal, 2022, 46(6): 817–822. (in Chinese)
黄沛, 曹国辉, 张海晶等. 美国陆军车载战术激光武器发展分析[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 817–822.
- [3] Zhu Mengzhen, Chen Xia, Liu Xiu, et al. Situation and key technology of tactical laser anti-UAV[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 181–193. (in Chinese)
朱孟真, 陈霞, 刘旭, 等. 战术激光武器反无人机发展现状和关键技术分析[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 181–193.
- [4] Liang Weiwei, Yin Ruiguang, Li Hui, et al. Influence of laser damage quadrant detector on laser guided weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2672–2676. (in Chinese)
梁巍巍, 殷瑞光, 李慧, 等. 激光损伤四象限探测器对制导武器的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2672–2676.
- [5] Wang Yanbin, Zhang Dengfeng, Zhou Xuanfeng, et al. Formation mechanism of regular lattices on photosensitive surface of CCD[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1242–1250. (in Chinese)
王彦斌, 张德锋, 周旋风, 等. CCD 光敏面上规则点阵的产生机理[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6): 1242–1250.
- [6] Lou Xiaocheng, Li Xiaoying, Niu Chunhui, et al. Study on the interference effect of white light irradiation multispectral CCD[J]. Laser Journal, 2021, 45(6): 703–708. (in Chinese)
- 娄小程, 李晓英, 牛春晖, 等. 白光辐照多光谱 CCD 的干扰效应研究[J]. 激光技术, 2021, 45(6): 703–708.
- [7] Tan Qun, Fan Jieqing, Zhao Qiang, et al. Three-dimensional monte carlo simulation of electron irradiation effect on CCD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(4): 115–120. (in Chinese)
谭群, 范杰清, 赵强, 等. CCD 电子辐照效应三维蒙特卡罗模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(4): 115–120.
- [8] Yuan Hang, Wang Xiaorui, Li Dancui, et al. Modeling and Simulation Analysis for Crosstalk Effects and Secondary Spots of Laser Irradiation on TDI-CCD Camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 1214001. (in Chinese)
袁航, 王晓蕊, 李丹翠, 等. 激光辐照 TDI-CCD 相机饱和串扰效应及侧斑建模仿真分析[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1214001.
- [9] Nie Jinsong, Wang Xi, Li Hua, et al. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by 1.06 μm laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2). (in Chinese)
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).
- [10] Yi Quan, Zhang Yang, Yang Jianchang, et al. Research on damage simulation technology of laser to CCD[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2020, 43(6): 31–35. (in Chinese)
易琰, 张阳, 杨建昌, 等. 激光对 CCD 毁伤的仿真技术研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2020, 43(6): 31–35.
- [11] Liu Wei, Li Guoqin. Sensor principle and application technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019. (in Chinese)
刘伟, 李国芹. 传感器原理及应用技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.