

nm/532 nm皮秒激光对可见光CCD干扰损伤效应研究

韩仁杰 黄晨 郑长彬 王佳敏 孙俊杰 陈毅 于晶华 张逸文 张新 赵振 陈飞

Effect of nm/532 nm picosecond laser on visible light CCD interference and damage

HAN Ren-jie, HUANG Chen, ZHENG Chang-bin, WANG Jia-min, SUN Jun-jie, CHEN Yi, YU Jing-hua, ZHANG Yi-wen, ZHANG Xin, ZHAO Zhen, CHEN Fei

引用本文:

韩仁杰, 黄晨, 郑长彬, 王佳敏, 孙俊杰, 陈毅, 于晶华, 张逸文, 张新, 赵振, 陈飞. nm/532 nm皮秒激光对可见光CCD干扰损伤效应研究[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 317–324. doi: 10.37188/CO.2025–0116

HAN Ren-jie, HUANG Chen, ZHENG Chang-bin, WANG Jia-min, SUN Jun-jie, CHEN Yi, YU Jing-hua, ZHANG Yi-wen, ZHANG Xin, ZHAO Zhen, CHEN Fei. Effect of nm/532 nm picosecond laser on visible light CCD interference and damage[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 317–324. doi: 10.37188/CO.2025–0116

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0116>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0139>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0090>

距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究

Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 567 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0142>

多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 373 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0228>

5.2 W高重频257 nm深紫外皮秒激光器

High repetition frequency 257 nm deep ultraviolet picosecond laser with 5.2 W output power

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1318 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0026>

CsPbBr₃纳米晶电子辐照效应研究

Effect of electron irradiation on CsPbBr₃ perovskite nanocrystal

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 178 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0044>

文章编号 2097-1842(2026)02-0317-08

1064 nm/532 nm 皮秒激光对可见光 CCD 干扰损伤效应研究

韩仁杰^{1,2}, 黄晨^{1,2}, 郑长彬^{1,2}, 王佳敏^{1,2*}, 孙俊杰^{1,2}, 陈毅^{1,2}, 于晶华^{1,2}, 张逸文^{1,2},
张新^{1,2*}, 赵振³, 陈飞^{1,2*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 空装驻长春代表室, 长春 130102)

摘要:随着短脉冲激光技术的快速发展, CCD 图像传感器受到的潜在威胁呈现区别于传统连续/长脉冲激光的新特征。为了探究不同波长短脉冲激光致 CCD 图像传感器干扰损伤的影响机制和作用原理, 选用波长为 1064 nm、532 nm, 脉宽为 30 ps, 重复频率为 1 Hz 的皮秒激光对可见光 CCD 进行干扰损伤实验研究。通过光学显微镜、图像传感器自身成像观察 CCD 干扰损伤不同阶段的辐照效能。分析了短脉冲激光对 CCD 干扰损伤的机理, 对比了两种波长激光辐照 CCD 不同阶段的成像图像、微观形貌以及阈值。结果表明, 对于可见光 CCD, 波长为 532 nm 激光比波长为 1064 nm 的微透镜层贯穿能力更强, 波长 532 nm 激光比波长 1064 nm 激光干扰阈值低 1-2 个数量级, 点损和线损阈值低 2 个数量级。

关键词:短脉冲激光; CCD; 辐照效应; 干扰损伤

中图分类号: TN977 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0116 CSTR: 32171.14.CO.2025-0116

Effect of 1064 nm/532 nm picosecond laser on visible light CCD interference and damage

HAN Ren-jie^{1,2}, HUANG Chen^{1,2}, ZHENG Chang-bin^{1,2}, WANG Jia-min^{1,2*}, SUN Jun-jie^{1,2}, CHEN Yi^{1,2},
YU Jing-hua^{1,2}, ZHANG Yi-wen^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2*}, ZHAO Zhen³, CHEN Fei^{1,2*}

(1. *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;

3. Air Force Equipment of the Military Representative Office in Changchun, Changchun 130102, China)

* *Corresponding author, E-mail: wangjiamin@ciomp.ac.cn; zhang315xin@ciomp.ac.cn; feichenny@126.com*

Abstract: With the rapid development of short-pulse laser technology, the potential threats to CCD image sensors exhibit new characteristics distinct from those induced by traditional continuous-wave or long-pulse laser. To investigate the mechanisms and principles of interference and damage caused by short-pulse laser of

收稿日期: 2025-09-11; 修订日期: 2025-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62405311, No. 62405312); 中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA0380200)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62405311, No. 62405312); the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA0380200)

different wavelengths, picosecond laser with wavelengths of 1064 nm and 532 nm, a pulse width of 30 ps, and a repetition rate of 1 Hz were employed to irradiate visible-light CCD in interference and damage experiments. The irradiation effects at different interference and damage stages of the CCD were characterized using optical microscopy and its own imaging response. The mechanisms of short-pulse laser-induced interference and damage were analyzed, and the imaging response, microscopic morphology, and thresholds at various stages were compared for the two wavelengths. The results indicate that, for visible-light CCD, the 532 nm laser possesses stronger penetration capability through the microlens layer than the 1064 nm laser, and its interference threshold is 1–2 orders of magnitude lower. The point- and line-damage thresholds induced by the 532 nm laser are approximately 2 orders of magnitude lower than those induced by the 1064 nm laser.

Key words: short-pulse laser; CCD; irradiation effect; interference and damage

1 引言

电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 作为现代光学器件的核心元件, 凭借其卓越的空间分辨率、优异的灵敏度以及稳定的工作寿命等优点, 在军事、卫星遥感、医学成像和工业检测等领域得到了广泛应用^[1-4]。近年来, 随着短脉冲激光技术的突破性进展, 特别是皮秒和飞秒量级超高峰值功率激光器的成熟应用^[5-6], 对 CCD 传感器构成的潜在威胁呈现出显著区别于传统连续/长脉冲激光的新特征^[7-8]: 一方面, 短脉冲激光与 CCD 的相互作用可能诱发一系列非线性光学效应; 另一方面, 其极高的峰值功率更容易引起 CCD 图像传感器的硬损伤, 导致器件无法正常工作。因此开展短脉冲激光对 CCD 图像传感器的干扰及损伤研究具有重要意义。江继军等人利用 800 nm 飞秒激光对 CCD 图像传感器进行辐照实验, 发现栅极没有出现裂纹, CCD 内部电路被烧毁^[9]。高刘正研究团队系统比较了单脉冲 1064 nm 纳秒激光、1064 nm 皮秒激光以及 800 nm 飞秒激光对图像传感器的辐照效应, 实验数据表明: 点损伤阶段, 飞秒激光具有更低的损伤阈值, 线损伤阶段, 皮秒激光的损伤效率更高^[10]。杨海波等人开展了 532 nm 纳秒和 532 nm 皮秒激光辐照 CCD 图像传感器实验, 实验结果表明皮秒激光和纳秒激光效能相近^[11]。

目前短脉冲激光辐照 CCD 图像传感器研究主要集中于对 CCD 图像传感器干扰损伤的脉宽效应的研究, 不同波长作用下的短脉冲激光辐照

图像传感器的研究较少。不同波长激光在 CCD 图像传感器的吸收深度以及载流子生成分布存在差异, CCD 的光谱响应曲线与实际干扰损伤之间也并非简单的线性关系, 同时在实际工程应用中, CCD 图像传感器可能面临多波长的激光威胁, 研究多波长激光对 CCD 图像传感器的干扰损伤效应能够建立更完善的多波长干扰损伤模型, 为激光防护设计提供充足的波长—效应数据。因此, 本文开展了脉宽为 30 ps, 波长分别为 1064 nm 和 532 nm 的单脉冲激光对 CCD 图像传感器的干扰损伤实验研究, 从实验过程中 CCD 成像图像、实验后损伤形貌以及干扰损伤阈值三方面比较实验结果, 并且分析了相关现象的机理。

2 实验研究

2.1 实验设备及原理

本研究采用的可见光黑白 CCD 图像传感器的型号为 WAT-902B, 其光电成像器件为 Sony ICX419AL 行间转移型标准 1/2 英寸芯片, 尺寸为 7.4 mm(H)×5.95 mm(V), 总像素数 795(H)×596(V), 像元尺寸为 8.6 μm(H)×8.3 μm(V), 光学镜头采用 10–50 mm 变焦 FA 镜头, 像面尺寸为 9 mm。图 1 为 CCD 图像传感器的多层结构图。图 2 为该 CCD 图像传感器的响应波段。

实验原理如图 3 所示。采用 1064/532 nm 皮秒激光器作为光源, 脉冲宽度为 30 ps, 重复频率为 1 Hz~10 Hz 可调, 最大输出能量为 12 mJ, 输出光斑为高斯分布。单脉冲皮秒激光经过半波片和偏振片组成的衰减器实现激光能量的调节, 并

由 Ophir Centauri 型能量计(测量范围为 200 μJ ~10 J, 实际使用量程为 20 mJ)接收分束光, 实现激光功率的实时监测, 实验前对衰减器能量进行标定。

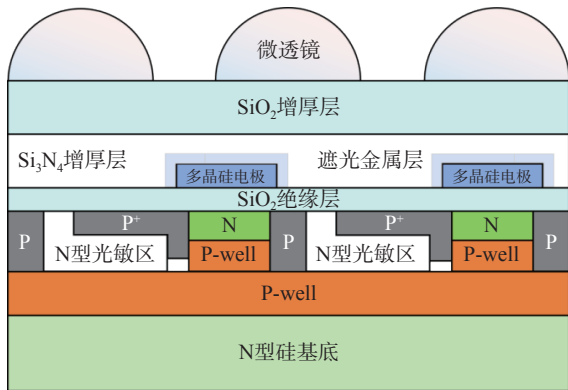


图 1 CCD 图像传感器横截面结构图

Fig. 1 Cross-sectional structure diagram of CCD image sensor

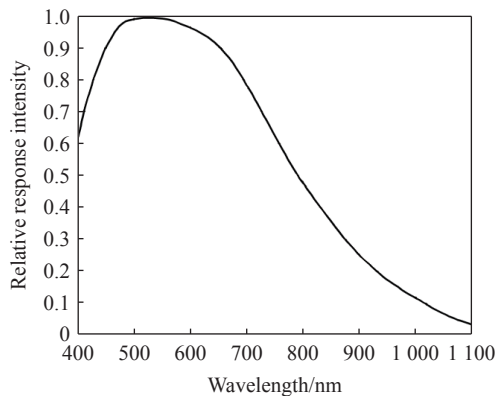


图 2 CCD 图像传感器光谱响应曲线

Fig. 2 Spectral response curves of CCD image sensor

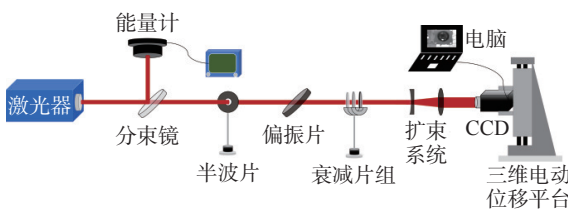


图 3 激光辐照可见光 CCD 图像传感器实验原理图

Fig. 3 Experimental schematic diagram of the laser irradiation on visible-light CCD image sensor

在图 3 所示的实验装置基础上, 在靶面位置处仅保留光学镜头, 在分束镜后放置能量计, 利用两个能量计对分束镜的分束比进行标定, 用透射功率除以分光测得的功率得到透反比 R_1 , 将其作为基准, 随后将能量计放置于偏振片后, 测得新的透反比 R_2 。 R_2/R_1 即为半波片每转一度对应的衰

减倍率。之后, 固定半波片的度数, 将功率计依次放置于衰减片组、扩束系统以及光学镜头后, 测得分束镜后所有光学器件的衰减倍率。在实验过程中, 将半波片转动不同度数, 加入不同衰减片组合, 分束镜测得的激光能量为 W 。 W/R_1 再乘以半波片对应度数的衰减倍率、衰减片的衰减倍率、扩束系统的透过率、光学镜头的透过率即为激光干扰损伤图像传感器的实际到靶能量。实验测得波长为 532 nm 时, 扩束系统的透过率为 0.8139, 光学镜头透过率为 0.6209; 波长为 1064 nm 时, 扩束系统的透过率为 0.9008, 光学镜头透过率为 0.2255。计算机控制三维转台并对 CCD 图像传感器图像进行采集。

2.2 到靶光斑计算

实验过程中, CCD 图像传感器实时所成图像中各像素灰度值的相对值代表激光辐照光强分布的相对值。根据像素分布的灰度值情况, 结合 CCD 图像传感器的像素面积, 可以计算得到实际作用到靶面的光斑大小。利用计算机采集激光作用下 CCD 图像传感器的图像, 调节图像传感器的光学镜头使其聚焦, 获得未发生像素饱和且稳定的光斑。在像元未饱和状态下, 利用成像软件获得到靶光斑图以及背底灰度值分布, 利用差分法计算实际到靶光斑分布灰度值, 如图 4 所示。

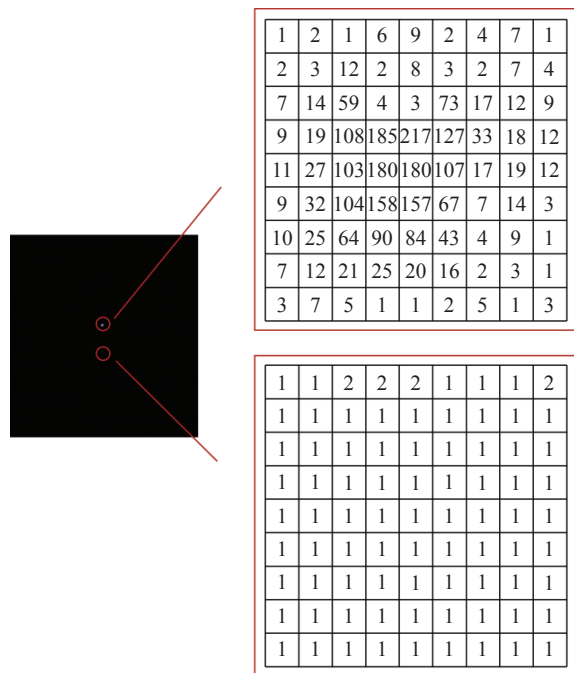


图 4 激光光斑图及其灰度值分布

Fig. 4 Laser spot image and its gray value distribution

由图 4 可以看出, 减去背底灰度值, 光斑中心光强的灰度值为 217, 则边缘光强的灰度值应为 $217/e^2=29$, 所以光斑应取灰度值高于 29 的单元所组成的区域, 如图 5 所示。

1	2	1	6	9	2	4	7	1
2	3	12	2	8	3	2	7	4
7	14	59	4	3	73	17	12	9
9	19	108	185	217	127	33	18	12
11	27	103	180	180	107	17	19	12
6	32	104	158	157	67	7	14	3
10	25	64	90	84	43	4	9	1
7	12	21	25	20	16	2	3	1
3	7	5	1	1	2	5	1	3

图 5 激光辐照区域像元灰度值分布

Fig. 5 Pixel gray value distribution in the laser-irradiated region

该区域共 20 个单位像元符合激光光强分布, 每个像素单元的面积: $s_0=d \times d=8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}=71.38 \mu\text{m}^2$, 故到靶光斑的面积: $s=s_0 \times 20=1427.6 \mu\text{m}^2$ 。

3 实验结果与分析

3.1 短脉冲激光辐照 CCD 图像传感器干扰实验

采用脉宽为 30 ps, 波长为 1064 nm 和 532 nm 的脉冲激光以 1-on-1 的模式分别辐照同一批次相同型号的多个 CCD 图像传感器。通过调节衰减器和衰减片的组合来调节到靶能量。激光能量由小到大来进行干扰实验, 利用计算机监测 CCD 图像传感器在不同激光能量密度下的干扰效果并进行图像采集。对不同波长干扰实验结果进行分析比较, 实验现象如图 6 和图 7 所示。

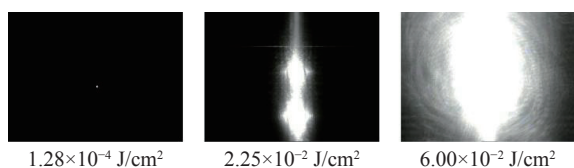


图 6 波长 1064 nm 激光对 CCD 干扰实验结果

Fig. 6 Experiment results of 1064 nm laser interference on CCD

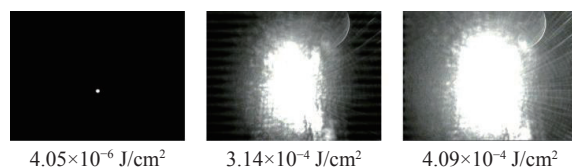


图 7 波长 532 nm 激光对 CCD 干扰实验结果

Fig. 7 Experiment results of 532 nm laser interference on CCD

从上述两组实验数据来看, 随着入射激光能量密度增大, 器件饱和和干扰面积随之增大。1064 nm 激光到靶能量密度达到 10^{-4} J/cm^2 量级时, 图像传感器开始出现饱和; 随着激光到靶能量密度的提高, 饱和像元数增加, 干扰面积扩大, 当能量密度达到 10^{-2} J/cm^2 量级, 可观察到明显的电荷溢出效应, 表现为信号电荷从收集势阱向传输势阱的横向扩散, 如图 6 所示。这是由 CCD 图像传感器本身的结构决定的, 图像传感器的收集势阱被填满后, 后续产生的信号电荷将溢出至同像素的传输势阱中。当到靶能量密度进一步增大, 干扰面积几乎覆盖至整个像面, 严重影响了成像效果, 当激光停止辐照后, 成像恢复正常。532 nm 激光到靶能量密度达到 10^{-6} J/cm^2 量级时, 图像传感器开始出现饱和。随着激光到靶能量密度的增大, 干扰面积不断变大, 当能量密度达到 10^{-4} J/cm^2 量级, 如图 7 所示, 图像传感器已经不能正常成像。由上述结果可知, 1064 nm 激光干扰区主要沿垂直方向拉伸, 饱和区域逐渐扩大, 但边界过渡较为平滑, 外围光晕较弱。相比之下, 532 nm 激光在能量增加后, 干扰斑呈现大范围饱和, 且伴随明显的径向衍射花纹, 边缘更加锐利。

两种波长激光在不同阶段的干扰阈值如表 1 所示。由表 1 可知, 波长为 532 nm 的激光能以更小的能量密度使可见光 CCD 图像传感器达到同种干扰的效果。在满靶面饱和阶段, 532 nm 饱和阈值比 1064 nm 低 2 个数量级。

表 1 双波长 30 ps 脉冲激光辐照 CCD 干扰阈值对比 (单位: J/cm^2)

Tab. 1 Comparison of interference thresholds of CCD under dual-wavelength 30 ps pulse laser irradiation (Unit: J/cm^2)

波长	初始饱和	串扰	满靶面饱和
1064 nm	1.91×10^{-4}	3.34×10^{-3}	6.00×10^{-2}
532 nm	4.05×10^{-6}	9.10×10^{-5}	3.14×10^{-4}

图 8 为不同波段单晶硅的吸收系数曲线。

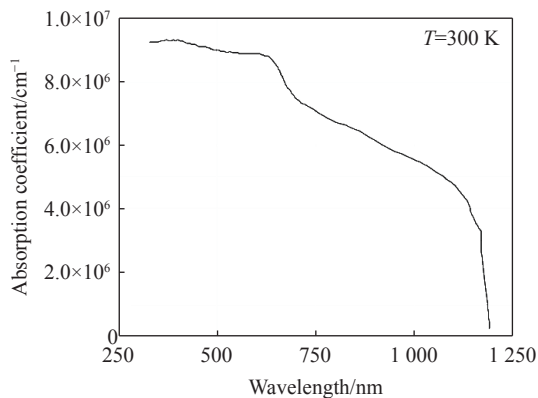


图 8 单晶硅的吸收系数曲线

Fig. 8 Absorption coefficient curve of single crystal silicon

由图 8 单晶硅的吸收系数与波长之间的关系可知, 波长越短, 硅的吸收系数越大, 从可见光到红外波段, 吸收系数 a 随着波长的增加而减小, 而吸收深度 $L=1/a$ 便会随着波长的增加而增加^[10]。以硅表面为坐标零点, 垂直入射方向为 x 轴, 硅表面光强为 I_0 , 硅表面反射率为 R , 则 x 深度处吸收的光强为 $I=I_0-I_0(1-R)e^{-ax}$ 。单晶硅吸收波长分别为 532 nm 和 1064 nm 激光不同深度相对光强分布曲线如图 9(彩图见期刊电子版)所示。

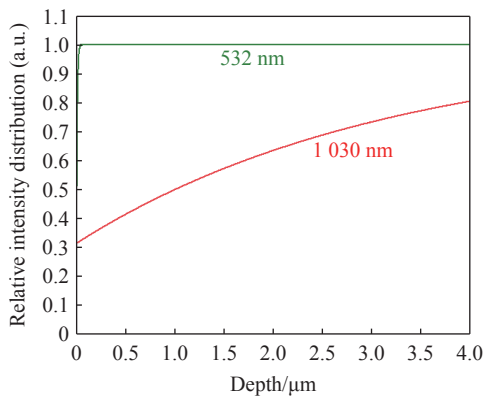


图 9 单晶硅吸收 1064 nm/532 nm 激光不同深度光强分布
Fig. 9 Single crystal silicon absorption intensity distribution at different depths for 1064 nm/532 nm lasers

由图 9 可知, 波长越长的激光单晶硅吸收系数越小, 吸收同样的光能量所需的吸收深度越大, 干扰阈值越高。532 nm 激光能量在硅表面瞬间释放, 因其浅层沉积和瞬时高能量密度, 从而产生锐利的边缘, 而 1064 nm 由于吸收深度大^[12], 吸收过程中大部分能量在硅体内扩散沉积, 因此产生平滑、扩散的边缘。此外, 一个 CCD 图像传感

器是由很多微小的像素组成的, 每个像素上面均有一个微透镜和金属光阑。这些金属光阑在像素之间形成了非感光的网格, 其尺寸在微米量级。激光通过复杂的光学机构在光学镜头内部发生多次反射、衍射和散射, 在激光光强分布中心附近出现圆环状散斑。分析认为: 该散斑是由于光学镜头对 532 nm 激光的透射率高, 一部分激光通过 CCD 图像传感器内部系统被偏转, 故其能量透过光学系统形成圆环状散斑。

3.2 短脉冲激光辐照 CCD 图像传感器损伤实验

3.2.1 点损伤阶段

该阶段双波长激光分别致 CCD 图像传感器损伤图像、损伤后成像图像以及相应微透镜的光学显微图像如图 10 和图 11 所示, 图 10(a)、图 11(a) 分别对应 1064 nm 和 532 nm 致 CCD 图像传感器点损的图像, 图 10(b)、图 11(b) 分别对应双波长致 CCD 点损后成像图像, 图 10(c)、图 11(c) 分别对应双波长致 CCD 点损处的微透镜层形貌。从图 10(a)、图 11(a) 可观察到两个波长激光致 CCD 图像传感器点损伤结果基本相同, 均出现了白点损伤。利用光学显微镜观察微透镜发现并未出现明显的损伤。微透镜的主要功能为聚焦光线至感光区域, 材料一般为聚酰亚胺, 在可见光和红外光谱范围内, 光学吸收率较低, 透光性好, 两种波长的激光能量不会被显著吸收, 因此低激光能量密度下, 微透镜层不易损坏。表明在点损伤时, 损伤主要产生于内层材料, 引起了内层材料的物理特性发生变化^[13-14]。

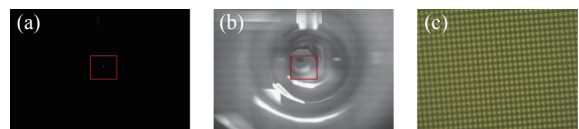


图 10 波长 1064 nm 激光 (a) 点损成像、(b) 点损后成像及 (c) 微透镜形貌

Fig. 10 (a) Point damage image, (b) post-point damage image for 1064 nm laser and (c) microlens morphology

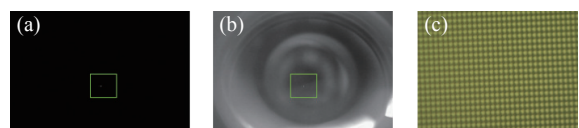


图 11 波长 532 nm 激光 (a) 点损成像、(b) 点损后成像及 (c) 微透镜形貌

Fig. 11 (a) Point damage image, (b) post-point damage for 532 nm laser image and (c) microlens morphology

3.2.2 线损伤阶段

白点损伤产生后,继续增加激光能量密度,CCD 图像传感器输出图像开始出现白线损伤,双波长激光致 CCD 图像传感器线损伤的图像、损伤后成像如图 12 和图 13 所示。

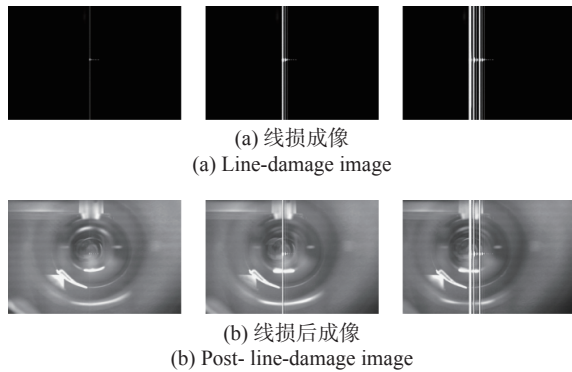


图 12 波长 1064 nm 激光线损成像、线损后成像
Fig. 12 Line-damage image and post-line-damage image for 1064 nm laser

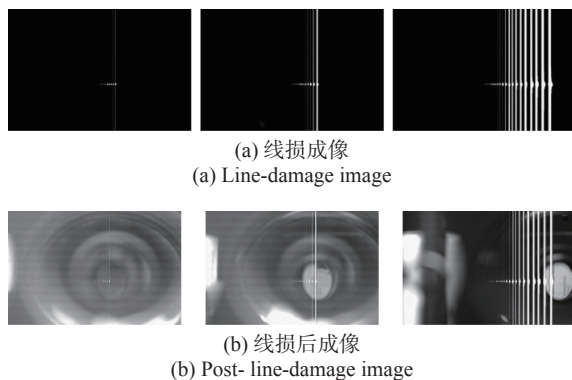


图 13 波长 532 nm 激光线损成像、线损后成像
Fig. 13 Line-damage image and post-line-damage image for 532 nm laser

由图 12(a)、图 13(a)可观察到激光辐照中心的损伤宽度大于远离中心的白线损伤宽度,波长为 532 nm 的线损图像最为明显,并且两种波长的白线线损的宽度大小不一致,波长为 532 nm 的线损宽度略宽。通过观察双波长线损处的微透镜层形貌如图 14(a)和图 14(b)(彩图见期刊电子版),发现激光辐照处的微透镜层产生了明显的颜色变化,甚至能隐约看到波长为 532 nm 微透镜层下面的二氧化硅增厚层发生了贯穿。由于光学显微镜能观测到构成 CCD 图像传感器的层级有限(目前只能观察到微透镜层以下的二氧化硅增厚层),看不到遮光层以及硅基底,推测纵向白线损伤是 CCD 图像传感器的金属遮光层被破坏。短脉冲

激光使得 CCD 图像传感器短时间内产生大量的电子,超出容量限制,溢出到传输沟道,再次经过损伤区域,从而扩大了损伤范围,造成了白线损伤^[15-16]。但辐照中心与远离中心的线损部分损伤机理并不一样,辐照中心处激光能量密度最高,局部像素瞬时饱和导致多个像元结构被破坏,同时因为热应力等影响因素的存在致损伤区域宽度增加,而远离中心的线损部分则主要是由于载流子扩散进一步经过损伤区域造成的,像素损伤范围较小,所以辐照中心损伤宽度大于纵向白线损伤宽度。可以看到,图 14(b)中微透镜层下方结构明显比图 14(a)的损伤程度更大,这是由于波长为 532 nm 激光吸收深度小,吸收系数大,大部分能量沉积在表层,而 1064 nm 激光吸收深度大,吸收系数小,大部分能量在穿透过程中纵向沉积,在同一层造成的损伤程度不如 532 nm,因此当高密度载流子再一次通过损伤区域,532 nm 造成的线损宽度大于 1064 nm。这也同时验证了吸收系数和吸收深度对于图像传感器损伤程度的影响。

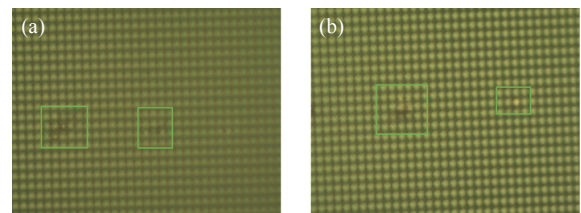


图 14 双波长线损处微透镜形貌。(a) 1064 nm; (b) 532 nm
Fig. 14 Microlens morphology characterization at dual-wavelength line-damage sites. (a) 1064 nm; (b) 532 nm

双波长 30 ps 脉冲激光辐照(a)不同损伤阶段的阈值如表 2 所示。从表 2 可知,点损伤阶段,532 nm 激光的阈值比 1064 nm 低 2 个数量级。线损伤阶段,532 nm 激光的阈值同样比 1064 nm 低 2 个数量级。

表 2 双波长 30 ps 脉冲激光辐照 CCD 不同损伤阶段阈值对比(单位: J/cm²)

Tab. 2 Comparison of damage thresholds at different stages in CCD under dual-wavelength 30 ps pulsed laser irradiation (Unit: J/cm²)

波长(nm)	点损伤阈值	线损伤阈值
1064	6.86×10^{-2}	2.85×10^{-1}
532	5.78×10^{-4}	3.42×10^{-3}

硅的带隙能量约为 1.12 eV, 532 nm 激光的光子能量 E_{532} 为 2.33 eV, 1064 nm 激光的光子能量为 E_{1064} 为 1.17 eV, 单个 532 nm 光子的能量足以激发电子空穴对, 而单个 1064 nm 光子的能量略高于硅带隙。CCD 图像传感器中硅材料由于掺杂和缺陷, 允许一定的单光子吸收, 但效率很低, 所以主要的吸收机制是双光子吸收。硅表面激光的能量密度为 I , 对于 532 nm 激光, 能量沉积率 R_{532} 正比于 I , 而对于 1064 nm 激光, 能量沉积率 R_{1064} 则正比于 βI^2 , β 为双光子吸收系数, 因此当两个能量沉积率相同时, 1064 nm 激光所需的入射能量密度理论上高于 532 nm 激光, 因此 1064 nm 激光的损伤阈值更高^[17]。

4 结 论

本文分别开展了 1064 nm 和 532 nm 单脉冲

皮秒激光干扰和损伤 CCD 图像传感器实验。实验结果表明, 两种波长激光致 CCD 图像传感器干扰图像有所差异, 相比于 1064 nm 激光, 532 nm 激光干扰边缘更加锐利, 并且干扰阈值更低; 随着激光能量密度的增加, 损伤依次从像元结构开始, 逐步影响金属遮光层、多晶硅电极, CCD 图像传感器经历了白点损伤、白线损伤两个阶段。两种波长参数下, 532 nm 致微透镜层的损伤程度更加严重, 损伤深度更大, 点损和线损阶段, 532 nm 阈值比 1064 nm 阈值低 2 个数量级。下一步, 将基于现有研究开展以下两个方面工作: (1) 完善 1064 nm 和 532 nm 单脉冲皮秒激光损伤 CCD 图像传感器实验, 采用更大激光能量的激光器对图像传感器造成更大程度的损伤, 采用更细致的微观形貌检测手段, 探究损伤机理; (2) 基于 532 nm 波长激光, 开展皮秒量级脉冲激光干扰损伤 CCD 图像传感器脉宽效应研究。

参考文献:

- [1] ARTÍNEZ-GONZÁLEZ A, MORENO-HERNÁNDEZ D, LEÓN-RODRÍGUEZ M, *et al.*. Simultaneous schlieren-shadowgraph visualization and temperature measurement fields of fluid flow using one color CCD camera[J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9529-9529.
- [2] 李壮壮. 医用柔性内窥镜光学性能检测系统关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2024.
LI ZH ZH. *Medical flexible endoscope optical performance testing system key technology research* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024. (in Chinese).
- [3] MORI S, ENOKUCHI A, KONOUE K. Time delay integration using COTS IT-CCD for remote sensing and other applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11422: 1142203.
- [4] 朱方印, 林锐涛, 王斌, 等. 高重频光纤激光诱导击穿光谱对 TC4 钛合金的免定标分析[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(19): 3032-3042.
ZHU F Y, LIN R T, WANG B, *et al.*. Calibration-free analysis of TC4 titanium alloy using high-repetition-rate fiber laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(19): 3032-3042. (in Chinese).
- [5] 赵子涵, 周欣宇, 杜晨鹏, 等. 超快激光隐形切割的应力分析与复杂晶圆结构的高效切割工艺研究[J/OL]. *中国激光*. (2025-06-03). <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20250530.1534.020>.
ZHAO Z H, ZHOU X Y, DU CH P, *et al.*. Stress analysis and high-efficiency dicing process for complex wafer structures using ultrafast laser stealth technology[J/OL]. *Chinese Journal of Lasers*, (2025-06-03). <https://link.cnki.net/urlid/31.1339.TN.20250530.1534.020>.
- [6] TAKEDA G, SHIMOJO Y, OZAWA T, *et al.*. Spatial distribution of light-melanosome interaction dependent on irradiation fluence and spot size for short-pulsed laser skin treatment: a phantom study[J]. *Lasers in Medical Science*, 2025, 40(1): 251.
- [7] CAO H, XIE X F, CHANG H, *et al.*. Laser-induced damages to charge coupled devices with combined nanosecond/picosecond short-pulse lasers[J]. *Frontiers in Physics*, 2024, 12: 1345859.
- [8] 刘照虹, 樊榕, 李宁, 等. 基于 SBS 的百皮秒激光在光电对抗中的应用前景 (特邀)[J]. *光电技术应用*, 2021, 36(5): 15-22.
LIU ZH H, FAN R, LI N, *et al.*. Application prospect of SBS hundred picosecond pulse compression laser in electro-optical countermeasure system (invited)[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2021, 36(5): 15-22. (in Chinese).
- [9] 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).
- [10] 高刘正. 激光辐照破坏 CCD 的微观机理分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
GAO L ZH. *The micro damage mechanism of charge coupled device under laser irradiation*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese).
- [11] 杨海波, 蔡军. 不同脉宽 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(4): 30-32,41.
YANG H B, CAI J. Experimental research on CCD irradiated by 532 nm pulse laser with different pulse width[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(4): 30-32,41. (in Chinese).
- [12] 钱方, 彭佳琦, 许永博. 脉冲激光辐照背照式 CMOS 图像传感器损伤机理研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(2): 256-265.
QIAN F, PENG J Q, XU Y B. Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 256-265. (in Chinese).
- [13] 欧渊, 石根柱, 李点点, 等. 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 损伤机理研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 534-541.
OU Y, SHI G ZH, LI D D, *et al.*. Research on damage mechanism of 416 nm nanosecond pulsed laser to CCD[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 534-541. (in Chinese).
- [14] LI Y F, KOU Z L, WANG G, *et al.*. Recent advances of short-pulse laser-induced breakdown effect on charge-coupled device detectors[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108533.
- [15] 吕欣宇. 组合激光对 CCD 损伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2024.
LV X Y. *Study on the damage effect of combined laser on CCD*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2024. (in Chinese).
- [16] 佐明慧, 张翠恒, 聂品, 等. 纳秒激光辐照彩色 CCD 探测器损伤实验研究[J]. *应用光学*, 2025, 46(2): 451-457.
ZUO M H, ZHANG C H, NIE P, *et al.*. Experimental study of color CCD detector damage by nanosecond laser irradiation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(2): 451-457. (in Chinese).
- [17] 刘晨星. 激光与绝缘体上硅材料相互作用中的波长效应研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
LIU CH X. *Study on laser of different wavelengths interaction with silicon-on-insulator material*[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012. (in Chinese).

作者简介:



王佳敏(1995—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 助理研究员, 2023 年于中国科学院大学取得博士学位, 主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail: wangjiamin@ciomp.ac.cn



张 新(1991—), 男, 辽宁丹东人, 博士, 助理研究员, 2021 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事新型激光技术及其应用研究。E-mail: zhang315xin@ciomp.ac.cn



陈 飞(1982—), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 2011 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事新型激光技术及应用研究。E-mail: feichenny@126.com