



## 复合激光损伤CMOS图像传感器实验研究

朱孟真 刘云 米朝伟 魏靖松 陈霞 田方涛 冯苏茂 王赛

### Experimental study on a CMOS image sensor damaged by a composite laser

Zhu Mengzhen, Liu Yun, Mi Chaowei, Wei Jingsong, Chen Xia, Tian Fangtao, Feng Sumao, Wang Sai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210537>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 水基泡沫消光特性实验研究 (特约)

Experimental study on extinction characteristics of aqueous foam(*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20201023 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201023>

#### 超连续谱光源辐照可见光CMOS图像传感器的实验研究

Experimental study on supercontinuum laser irradiating a visible light CMOS imaging sensor

红外与激光工程. 2017, 46(1): 106004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0106004>

#### CMOS图像传感器辐射损伤导致星敏传感器性能退化机理

Degradation mechanism of star sensor performance caused by radiation damage of CMOS image sensor

红外与激光工程. 2020, 49(5): 20190555 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190555>

#### 可应用于高效光电对抗的新颖结构激光谐振腔

Laser resonator of novel configuration applicable to efficient electro-optical countermeasure

红外与激光工程. 2017, 46(8): 806002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0806002>

#### 0.53 μm全固态激光器热效应及其补偿技术研究

Study on thermal effect and compensation technology of 0.53 μm all-solid-state laser

红外与激光工程. 2017, 46(4): 406003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0406003>

#### CMOS传感器辐射损伤对视觉位姿测量系统性能的影响机制

Influence mechanism of CMOS sensor radiation damage on the performance of visual position and attitude measurement system

红外与激光工程. 2017, 46(S1): 69 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.S117002>

## 复合激光损伤 CMOS 图像传感器实验研究

朱孟真, 刘云, 米朝伟, 魏靖松, 陈霞, 田方涛, 冯苏茂, 王赛

(陆军工程大学 军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

**摘要:** 激光是对抗光电侦察的有效方式。为了提高损伤效能, 探索了复合激光损伤光电探测器的新思路。分别开展了波长 1064 nm 和 532 nm、脉宽 10 ns 的激光及其双波长复合激光, 以及波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 激光及其双脉宽复合激光对 CMOS 图像传感器的损伤效能实验。结果表明, 双波长复合激光对 CMOS 造成严重损伤时的基频光能量是单独 1064 nm 激光的 77.8%, 是单独 532 nm 激光的 62.5%; 双脉宽复合激光损伤时, 脉宽 0.4 ms 激光的能量密度降低为单独作用时的 1.7%, 脉宽 10 ns 激光的能量密度降低为单独作用时的 76.4%。这一发现为多制式复合激光高效光电对抗提供了新的思路 and 参考。

**关键词:** 光电对抗; 复合激光; 损伤效能; 对比实验

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210537

## Experimental study on a CMOS image sensor damaged by a composite laser

Zhu Mengzhen, Liu Yun, Mi Chaowei, Wei Jingsong, Chen Xia, Tian Fangtao, Feng Sumao, Wang Sai

(Ordnance NCO Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** Lasers are an effective way to counter photoelectric reconnaissance. To improve the damage efficiency, a new idea of a composite laser damage photodetector is explored. Damage efficiency experiments of a 1064 nm and 532 nm laser with a 10 ns pulse widths and its dual wavelength composite laser, 1064 nm laser with 0.4 ms and 10 ns pulse width and its dual pulse width composite laser on a CMOS image sensor were carried out respectively. The results show that when the dual-wavelength composite laser causes complete damage to the CMOS, the fundamental frequency light energy is 77.8% of the 1064 nm laser alone and 62.5% of the 532 nm laser alone; when the dual-pulse composite laser damages, the pulse width of the 0.4 ms laser is The energy density is reduced to 1.7% of the single action, and the energy density of the 10 ns pulse width laser is reduced to 76.4% of the single action. This discovery provides a new idea and reference for high efficiency optoelectronic countermeasures of multisystem composite lasers.

**Key words:** optoelectronic countermeasure; composite laser; damage effectiveness; contrast experiment

收稿日期: 2021-08-04; 修订日期: 2021-09-22

基金项目: 国防预研基金 (30102050101); 国防科研重点项目 (KYWHJWJK1702)

作者简介: 朱孟真, 男, 讲师, 硕士, 主要从事固态激光器及激光毁伤对抗技术方面的研究。

## 0 引言

CCD 和 CMOS 是图像传感器的典型代表,被广泛应用于军事侦察成像、精确制导及激光雷达等领域<sup>[1]</sup>。激光是对抗光电侦察探测的有效方式,开展激光对图像传感器的损伤效能研究,对提高光电对抗能力具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。目前,学者对激光损伤 CCD 和硅材料的研究较多,分别有连续激光、脉冲激光以及不同脉宽、能量密度、作用时间等对 CCD 或硅材料损伤效应及机理的研究<sup>[4-12]</sup>。近年来,已有学者开展激光辐照 CMOS 图像传感器的干扰效应<sup>[13-14]</sup>、损伤效应<sup>[15-16]</sup>以及对 CCD、CMOS 辐照的对比性研究<sup>[17-20]</sup>,并开展了宽谱光源干扰效应<sup>[21-22]</sup>等方面的研究,但是尚无利用复合激光对 CMOS 图像传感器进行损伤的研究。

为了提高损伤效能,文中提出采用复合激光损伤 CMOS 的新思路,分别开展了双波长、双脉宽的复合激光对 CMOS 进行功能失效损伤的实验研究,发现复合激光能够有效提高损伤效能,降低损伤能量密度阈值,为多制式复合激光高效光电对抗提供了新的思路。

## 1 实验装置与方案

### 1.1 实验装置

实验装置主要包括激光器、CMOS、能量计、显示器、小孔光阑、分光镜、合束镜、倍频晶体等。激光器包括三种制式,分别为:(1)波长 1064 nm 的 10 ns 激光器,能量 7~60 mJ 可调、重频 1~20 Hz、光斑直径 2.6 mm;(2)波长 1064 nm 的 0.4 ms 激光器,能量 460 mJ~1.76 J 可调、重频 1~5 Hz、光斑直径 5 mm;(3)波长 532 nm 的 10 ns 激光器,通过 1064 nm 的 10 ns 激光倍频得到,倍频晶体为 10 mm×10 mm×8 mm 的 KTP。

CMOS 型号为 SC1145,光敏面 4.12 mm×3.1 mm、100 万像素、像素单元尺寸为 3 μm×3 μm。由像素阵列、驱动电路、时钟电路、译码控制器、A/D 转换器、总线控制等几部分组成<sup>[23]</sup>。像素阵列由像素单元及晶体管组成,是图像传感器的主体部分,也是容易受激光损伤部分。像素单元包括微透镜、彩色滤光片、金属铝、二氧化硅及掺杂硅等<sup>[24]</sup>,如图 1 所示。

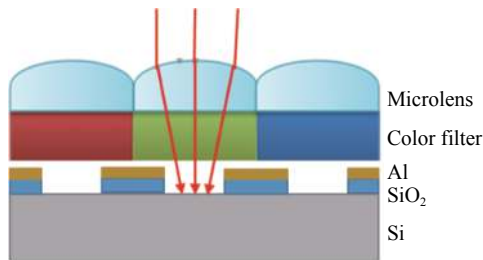


图 1 CMOS 基本结构示意图

Fig.1 Structure diagram of CMOS

### 1.2 实验方案

实验分两步进行:(1)波长 1064 nm 和 532 nm 的脉宽 10 ns 激光以及波长 1064 nm 的脉宽 0.4 ms 激光分别对 CMOS 进行损伤;(2)脉宽 10 ns、波长 1064 nm 和 532 nm 双波长复合激光,以及波长 1064 nm 的 0.4 ms 和 10 ns 双脉宽复合激光对 CMOS 损伤。实验均以单个脉冲辐照的方式进行,调节泵浦电流控制输出激光能量,观察在不同能量作用下 CMOS 损伤情况。以 CMOS 损伤占全屏 2/3 以上的面积为致盲损伤阈值判断标准。

脉宽 10 ns、波长 1064 nm 和 532 nm 双波长复合激光损伤实验方案如图 2 所示。将波长 1064 nm、脉宽 10 ns 的激光腔外倍频,产生 1064 nm 和 532 nm 的复合激光。直径 0.8 mm 的小孔光阑置于 CMOS 前 1 cm 处,作用在 CMOS 上的光斑面积等于小孔光阑透光面积。通过 1064 nm/532 nm 双色分光镜,分别测量通过小孔后不同波长的激光能量。

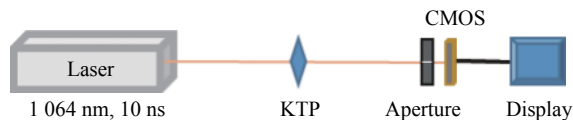


图 2 双波长复合激光损伤实验方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of double wavelength composite laser damage experimental scheme

波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 双脉宽的复合激光损伤实验方案如图 3 所示。将 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 激光偏振合束为一束激光,用信号发生器控制激光器的触发,使 10 ns 激光在 0.4 ms 激光的脉宽时间中点发射,通过直径为 0.8 mm 的小孔光阑后作用在 CMOS 上。实验中保持光阑后脉宽 0.4 ms 激光能量 31 mJ 恒定不变,改变脉宽 10 ns 激光能量,并测量能量大小。

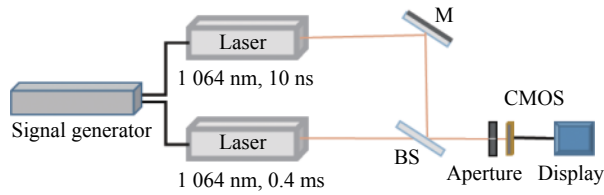


图 3 双脉宽复合激光损伤实验方案示意图

Fig.3 Schematic diagram of double pulse width composite laser damage experimental scheme

## 2 结果与分析

### 2.1 单制式激光对 CMOS 损伤

#### 2.1.1 波长 1064 nm 和 532 nm 的 10 ns 激光分别对 CMOS 损伤

波长 1064 nm、脉宽 10 ns 激光作用时,随着能量的增大,CMOS 依次出现白色光斑损伤、线损伤、十字交叉线面损伤,如图 4(a)~(c) 所示。开始出现白色光斑损伤时,作用在 CMOS 上的激光能量为 1.48 mJ,能量密度为 294.6 mJ/cm<sup>2</sup>。当能量增大至 1.91 mJ、能量密度为 380.2 mJ/cm<sup>2</sup> 时,出现十字交叉线面损伤,此时,屏左侧(全屏 2/3 以上面积)严重损伤。

波长 532 nm 激光、脉宽 10 ns 激光作用时,随着

能量的增大,CMOS 依次出现绿色光斑损伤、线损伤、十字交叉线面损伤,如图 4(d)~(f) 所示。开始出现绿色光斑损伤时,作用在 CMOS 上的激光能量为 0.32 mJ,能量密度为 63.7 mJ/cm<sup>2</sup>。当能量增大至 0.8 mJ、能量密度为 159.7 mJ/cm<sup>2</sup> 时,出现十字交叉线面损伤,此时屏左侧(全屏 2/3 以上面积)严重损伤。

由图 4 可知,随着激光能量增加,CMOS 依次出现光斑损伤、线损伤、十字交叉线面损伤。通过 CMOS 失效机理分析<sup>[18,23]</sup>、结合损伤 CCD 仿真模拟<sup>[10-11]</sup>,可知:CMOS 出现光斑损伤主要是由于微透镜和滤光片受损,伴随着部分金属铝剥落融化,部分单元像素失效造成的;出现线损伤主要是由于局部电路短路或断路导致信号传输中断;随着 CMOS 温度继续升高,晶体硅融化,二氧化硅由于受到热应力作用发生变形和断裂,金属线路严重损坏,出现十字交叉线面损伤,CMOS 大面积失效。

对比图 4 中两组损伤图像可以发现,波长 532 nm 激光造成的损伤状态中出现了绿色光斑损伤。由于 532 nm 激光辐射到彩色滤光片,致使滤光片发生光化学反应从而改变颜色,并造成滤光片受损区域无法成像<sup>[8]</sup>。

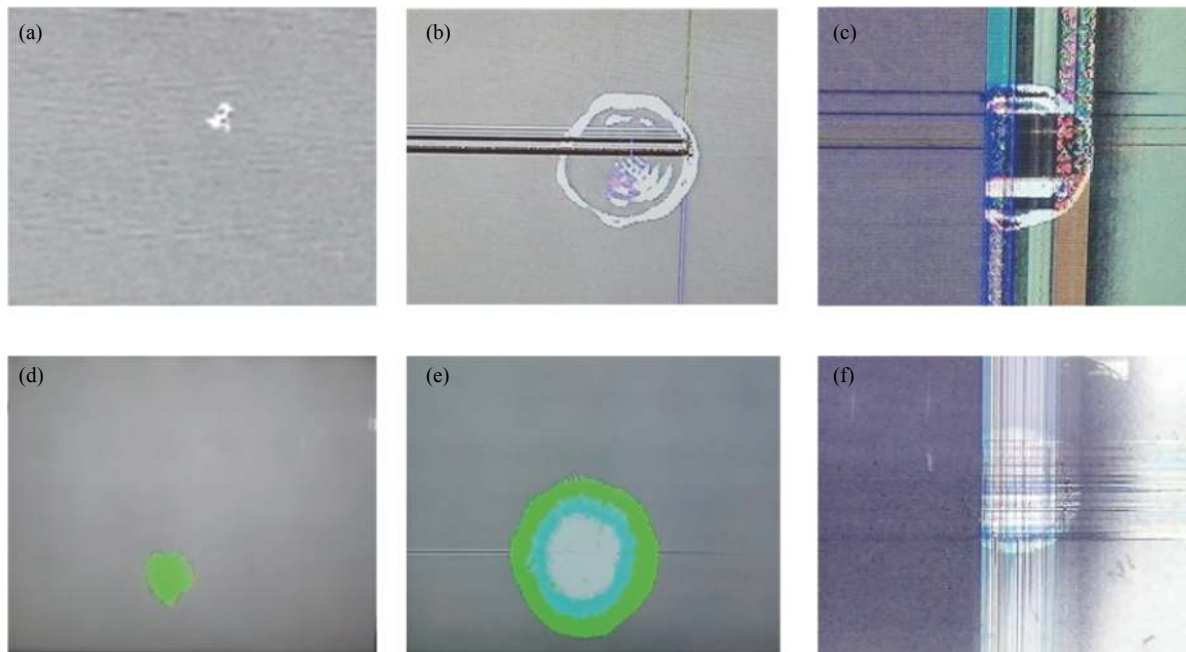


图 4 CMOS 在 10 ns 激光能量不断增加时的损伤效果图。(a)~(c) 波长 1064 nm 激光对 CMOS 损伤变化效果图;(d)~(f) 波长 532 nm 激光对 CMOS 损伤变化效果图

Fig.4 Damage effect picture of the CMOS under increasing 10 ns laser energy. (a)~(c) Damage effect of 1064 nm laser on CMOS; (d)~(f) Damage effect of 532 nm laser on CMOS

2.1.2 波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 激光分别对带镜头 CMOS 的损伤

波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 激光辐照 CMOS, 当光阑后能量为 70.4 mJ, 能量密度达 14 J/cm<sup>2</sup> 时也无法对其完成有效损坏, 此时已经达到激光器最大输出能

量。故采用对探测器加装焦距 8 mm 成像镜头的方式开展实验, 镜头前置直径 1.78 mm 的小孔光阑。在逐渐增加能量的过程中, 未出现点损伤的情况, 当能量为 96 mJ, 能量密度为 3.84×10<sup>3</sup> mJ/cm<sup>2</sup> 时, CMOS 几乎完全损伤, 如图 5(a) 所示。



图 5 带镜头的 CMOS 在 1064 nm 激光能量增加时的损伤效果图。(a) 0.4 ms 激光对 CMOS 损伤效果图; (b)~(e) 10 ns 激光对 CMOS 损伤效果图  
Fig.5 Damage effect picture of the CMOS with lens under increasing 1064 nm laser energy. (a) Damage effect of 0.4 ms laser on CMOS; (b)~(e) Damage effect of 10 ns laser on CMOS

波长 1064 nm、脉宽 10 ns 激光作用于镜头时, 随着激光能量的增加, CMOS 依次出现点损伤、线损伤、面损伤, CMOS 损伤状态如图 5(b)~(d) 所示。图 5(e) 是通过显示器显示的对应于图 5(d) 的图像。CMOS 开始出现点损伤时, 光阑后激光能量为 0.065 mJ; 当激光能量增大到 0.1 mJ 时, CMOS 出现致盲损伤, 此时的能量密度为 4 mJ/cm<sup>2</sup>。

实验得到脉宽 0.4 ms 和 10 ns 激光分别对 CMOS 实现致盲损伤时的能量, 并结合光斑面积和脉宽, 计算可得致盲时的峰值功率密度和能量密度如表 1 所示。由表可知, 脉宽 0.4 ms 激光致盲 CMOS 的能量密度是脉宽 10 ns 激光的 960 倍, 峰值功率密度是脉宽 10 ns 激光的 1/42。这是因为 ns 激光的峰值功率密度更高, 在短时间内使温度快速上升, 造成 CMOS 致盲损伤。

表 1 不同脉宽的激光对带镜头的 CMOS 的损伤阈值  
Tab.1 Damage threshold of CMOS with lens by different pulse width laser

Pulse width	Laser pulse power density/W·cm <sup>-2</sup>	Laser pulse energy density/mJ·cm <sup>-2</sup>
0.4 ms	9.6×10 <sup>3</sup>	3.84×10 <sup>3</sup>
10 ns	4×10 <sup>5</sup>	4

对比波长 1064 nm、脉宽 10 ns 激光对加装镜头前后 CMOS 的致盲损伤能量密度阈值分别为 380.2 mJ/cm<sup>2</sup> 和 4 mJ/cm<sup>2</sup>, 设镜头的光学增益是恒定的, 脉宽 0.4 ms 激光对带镜头的 CMOS 的致盲损伤能

量密度阈值为 3.84×10<sup>3</sup> mJ/cm<sup>2</sup>, 计算可得脉宽 0.4 ms 激光对不带镜头的 CMOS 的致盲损伤能量密度阈值为 3.65×10<sup>5</sup> mJ/cm<sup>2</sup>。

2.2 复合激光对 CMOS 损伤

2.2.1 脉宽 10 ns、波长 1064 nm 和 532 nm 双波长复合激光对 CMOS 损伤

增大双波长复合激光输出能量, CMOS 依次出现绿色光斑损伤、交叉线损伤、完全损伤, 如图 6(a)~(c) 所示。探测器开始出现绿色光斑损伤时, 光阑后复合激光能量为 0.57 mJ, 其中 1064 nm 激光能量为 0.43 mJ, 532 nm 激光能量为 0.14 mJ。复合激光能量增大至 1 mJ 时, 出现交叉线和绿色光斑损伤。能量增大至 1.19 mJ 时完全损伤, 其中 1064 nm 激光能量为 0.64 mJ, 532 nm 激光能量为 0.55 mJ, 此时激光器通过倍频晶体之前的原始输出能量为 35 mJ。

波长 1064 nm 和 532 nm 的 10 ns 激光单独作用以及双波长复合激光作用于 CMOS 的致盲损伤数据如表 2 所示。对比可知:

(1) 单波长激光完全损伤 CMOS 时, 532 nm 激光能量密度阈值是 1064 nm 激光的 42%, 且损伤效能高。这是因为相对于 1064 nm 激光, 532 nm 激光波长较短, 光子能量较大, 且吸收系数较大, 吸收深度小, 更容易造成 CMOS 的损伤<sup>[6]</sup>。

(2) 双波长复合激光致盲损伤 CMOS 的能量密度阈值是单独 1064 nm 激光的 62.3%, 是单独 532 nm 激光的 148%, 但是对比损伤效果图可以发现, 复合激光

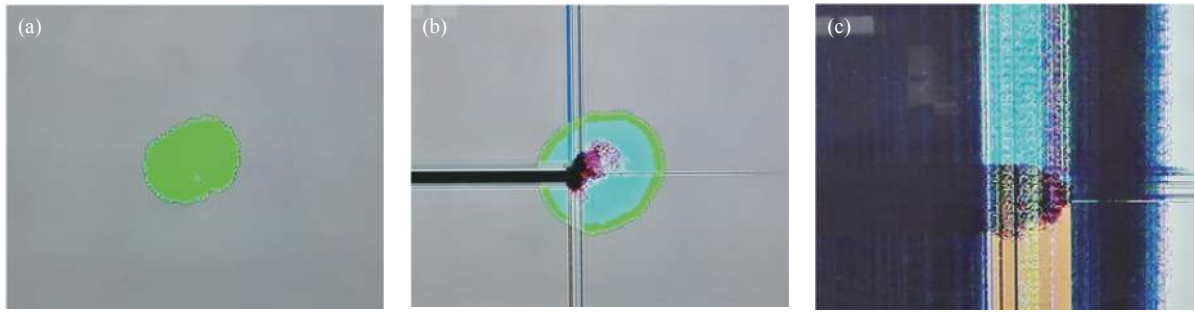


图 6 双波长复合激光对 CMOS 损伤图像。(a) 绿色光斑损伤; (b) 交叉线损伤; (c) 完全损伤

Fig.6 Damage effect picture of double wavelength composite laser on CMOS. (a) Green spot damage; (b) Cross line damage; (c) Complete damage

表 2 双波长复合激光和单波长激光损伤阈值对比

Tab.2 Comparison of damage threshold between double wavelength composite laser and single wavelength laser

Wavelength/nm	Output laser energy/mJ	Complete damage		
		Laser energy/mJ	Laser pulse power density/W·cm <sup>-2</sup>	Laser pulse energy density/mJ·cm <sup>-2</sup>
1064	45	1.91	3.8×10 <sup>7</sup>	380.2
532	56	0.80	1.6×10 <sup>7</sup>	159.7
1064+532	35	1.19	2.4×10 <sup>7</sup>	236.9

的损伤力度更强。1064 nm 激光具有更强的穿透能力,可以实现更严重的热损伤和力学损伤,532 nm 激光具有更大的光子能量,且处于 CMOS 的主响应波段内,具有更高响应能力<sup>[25]</sup>。双波长激光融合了 1064 nm 和 532 nm 激光的高能量、长吸收深度、高吸收系数等特性,具有更强的损伤效能,能够对像素单元及线路造成更严重的损伤。

(3) 对比三种模式激光对 CMOS 造成致盲损伤时的基频光激光能量,双波长复合激光的基频光能量为 35 mJ,是三种模式中最低的,反而单独 532 nm 激光的基频光能量为 56 mJ,是三种模式中最高的。双波长复合激光致盲损伤 CMOS 的基频光能量是单独 1064 nm 的 77.8%,是单独 532 nm 激光的 62.5%。

### 2.2.2 波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 双脉宽复合激光对 CMOS 损伤

波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 的激光复合输出,保持光阑后脉宽 0.4 ms 激光能量 31 mJ 恒定不变,随着脉宽 10 ns 激光能量的增大,CMOS 依次出现白点损伤、交叉线损伤、完全损伤现象,如图 7(a)~(c) 所示。当光阑后脉宽 10 ns 激光能量为 1.03 mJ 时,CMOS 开始出现白点损伤,当激光能量上升到 1.46 mJ 时,CMOS 致盲损伤。

波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 激光单独作用以及双脉宽复合激光作用于 CMOS 的损伤数据如表 3 所示。对比可知:

(1) 脉宽 10 ns 激光的加入,使复合激光中脉宽

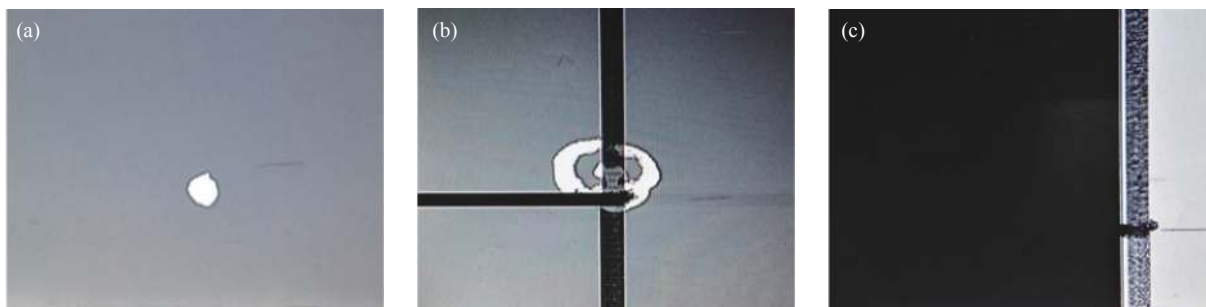


图 7 双脉宽复合激光对 CMOS 损伤图像。(a) 白点损伤; (b) 交叉线损伤; (c) 完全损伤

Fig.7 Damage effect picture of double pulse width composite laser on CMOS. (a) White spot damage; (b) Cross line damage; (c) Complete damage

0.4 ms 激光的致盲损伤阈值降低为  $6.17 \times 10^3 \text{ mJ/cm}^2$ , 是单独作用时的 1.7%。

(2) 脉宽 0.4 ms 激光的加入, 使复合激光中脉宽

10 ns 激光的致盲损伤阈值降低为  $290.6 \text{ mJ/cm}^2$ , 是单独作用时的 76.4%, 且从损伤图像上可看出, CMOS 的损伤面积加大, 破坏力度更强。

表 3 双脉宽复合激光和单脉宽激光损伤阈值对比

Tab.3 Comparison of damage threshold between double pulse width composite laser and single pulse width laser

Pulse width	Spot damage		Complete damage	
	Laser energy/mJ	Laser energy/mJ	Laser pulse power density/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	Laser pulse energy density/ $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$
10 ns	1.48	1.91	$3.8 \times 10^7$	380.2
0.4 ms	-	-	$9.1 \times 10^5$	$3.65 \times 10^5$
10 ns+0.4 ms	1.03+31	1.46+31	$2.9 \times 10^7 + 1.5 \times 10^4$ (10 ns laser action time) $1.5 \times 10^4$ (other time)	$290.6 + 6.17 \times 10^3$

波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 和 10 ns 激光合作用过程分为三个阶段: 第一阶段, 在脉宽 0.4 ms 激光的作用下, CMOS 表面温度升高, 表面变软, 屈服强度大大降低, 同时吸收系数增大; 第二阶段, 在脉宽 0.4 ms 激光作用的中间时刻加入的脉宽 10 ns 激光具有高峰值功率特性, 辐照后能够快速提高材料表面温度, 产生热学和力学损伤, 在第一阶段激光作用的基础上对 CMOS 造成初步局部损伤, 同时产生的表面损伤会增加表面粗糙度, 提高后续激光的吸收率; 第三阶段, 脉宽 0.4 ms 激光携带的大能量在前两个阶段造成的初步损伤和高吸收率基础上, 迅速扩大和加深 CMOS 的损伤程度, 造成致盲损伤。

### 3 结 论

文中开展了波长 1064 nm、532 nm 以及脉宽 0.4 ms、10 ns 激光及其复合激光对 CMOS 图像传感器损伤效能的实验, 对比了单波长与双波长复合激光、单脉宽与双脉宽复合激光的损伤阈值和损伤效能。

研究发现, 双波长复合激光只是在腔外增加倍频晶体即可获得, 其辐照 CMOS 造成致盲损伤时的基频光能量是单独 1064 nm 激光的 77.8%, 是单独 532 nm 激光的 62.5%, 且损伤效能更好。在干扰、致盲损伤敌方光电探测器时, 利用双波长复合激光可以获得更佳的对抗效果, 并且在未知敌方光电探测器响应波段和保护窗口的情况下还可以对不同工作模式的光电探测器实施对抗, 提高对抗效能。双脉宽复合激光损伤时, 脉宽 0.4 ms 激光的能量密度降低为单独 0.4 ms 激光损伤时的 1.7%, 脉宽 10 ns 激光的能量密度降低

为单独 10 ns 激光时的 76.4%。双脉宽复合激光融合了 ns 激光高功率的热学损伤、力学损伤以及 ms 激光大能量的热学损伤, 相互加强激光的作用效果, 使 CMOS 损伤面积加大, 破坏程度加深, 提高损伤效能。在光电对抗中, ms 激光可以获得大的能量输出, 不但可以与 ns 激光复合对光电探测器进行软杀伤, 还可以与连续激光复合对目标进行硬毁伤<sup>[26]</sup>, 实现多功能打击。这一发现为多制式复合激光高效光电对抗提供了新的思路和参考。

### 参考文献:

- [1] Sun Zhijun, Ou Daiyong. Solid state optical imaging sensor technologies and their new applications in military equipments [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26: 170-175. (in Chinese)
- [2] Ye Jiesong, Zhu Yuechao. Analyses of laser countermeasure and it's development trends [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 458-460. (in Chinese)
- [3] Zhu Mengzhen, Chen Xia, Liu Xu, et al. Situation and key technology of tactical laser anti-UAV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200230. (in Chinese)
- [4] Li Zewen. Research on the damage mechanisms of silicon and silicon-based photodetectors irradiated by millisecond laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] Li Hua, Wang Xi, Nie Jinsong, et al. Influence of pulse width on damage effects of CCD detector induced by laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 403-406. (in Chinese)
- [6] Feng Aixin, Zhuang Xuhua, Xue Wei, et al. Damage characteristics of polysilicon under wavelengths of 1064 nm,

- 532 nm and 355 nm laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 461-465. (in Chinese)
- [7] Lv Xueming, Li Zewen, Zhang Jianmin, et al. Surface damage study of silicon induced by combined millisecond and nanosecond laser with different delays [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(6): 695-699. (in Chinese)
- [8] Zhang Xin, Niu Chunhui, Ma Muyan, et al. Experimental study on three-wavelength single-pulse nanosecond laser damage CCD [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(2): 300-307. (in Chinese)
- [9] Wu Di, Lv Yong, Niu Chunhui. Damage of CCD detector by multi-pulse laser [J]. *Applied Laser*, 2019, 39(2): 17-24. (in Chinese)
- [10] Han Min, Nie Jinsong, Dou Xian'an, et al. Temporal evolution characteristics of CCD detector based on different laser loading methods [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(6): 788-794. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Zhang Mingxin, Nie Jinsong, Sun Ke, et al. Experimental study on laser cat's eye echoes from optical imaging system in the process of CCD damaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 17-24. (in Chinese)
- [13] Sheng Liang, Zhang Zhen, Zhang Jianmin, et al. Pixel upset effect and mechanism of CW laser irradiated CMOS camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606004. (in Chinese)
- [14] Zhou Xuanfeng, Chen Qianrong, Wang Yanbin, et al. Image interrupt effect and mechanism of pulse laser irradiated CMOS camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0306002. (in Chinese)
- [15] Wang Ang, Guo Feng, Zhu Zhiwu, et al. Comparative study of hard CMOS damage irradiated by CW laser and single-pulse ns laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9). (in Chinese)
- [16] Lei Peng, Sun Ke, Li Hua, et al. Experimental study on the change of cat eye echo pattern with laser damage of CMOS detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601001. (in Chinese)
- [17] Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua, et al. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(6): 475-478. (in Chinese)
- [18] Guo Feng. Comparative study on the irradiation effect of the laser to CMOS and CCD [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [19] Gao Run, Niu Chunhui, Li Xiaoying. Experiment and mechanism analysis of 632 nm laser jamming CCD and CMOS [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(9): 5-9. (in Chinese)
- [20] Wang Xue. Study on laser blindness and damage technology of photoelectric sensors [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [21] Wang Jingnan, Nie Jinsong. Experimental study on supercontinuum laser irradiating a visible light CMOS imaging sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0106004. (in Chinese)
- [22] Lai Liping, Fu Bo, Zhang Rongzhu. Effect of broadband sources on electrical crosstalk of CMOS array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0120005. (in Chinese)
- [23] Liu Chuanjun. Failure analysis and process optimization of CMOS image sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [24] Yang Jiping, Zhang Jianmin. Principle of CMOS camera and its application [J]. *Journal of Tianjin University of Technology and Education*, 2008, 18(3): 36-39. (in Chinese)
- [25] Yang Xiaoliang. Simulation analysis of radiation characteristic of CMOS image sensor pixel [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [26] Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng, et al. Mechanism and effects of complex laser ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105005. (in Chinese)