



连续激光辐照背照式CMOS图像传感器实验研究

许永博 王云哲 郑长彬 刘扬 程相正 邵俊峰

Experimental study on back-illuminated CMOS image sensor irradiated by CW laser

XU Yongbo, WANG Yunzhe, ZHENG Changbin, LIU Yang, CHENG Xiangzheng, SHAO Junfeng

引用本文:

许永博,王云哲,郑长彬,等.连续激光辐照背照式CMOS图像传感器实验研究[J].*应用光学*,2024,45(5): 1072–1078. DOI: 10.5768/JAO202445.0507003

XU Yongbo, WANG Yunzhe, ZHENG Changbin, et al. Experimental study on back-illuminated CMOS image sensor irradiated by CW laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(5): 1072–1078. DOI: 10.5768/JAO202445.0507003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0507003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

连续激光干扰效果评估方法

Evaluation method of continuous laser interference effect

应用光学. 2022, 43(2): 345–351 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0207002>

激光损伤阈值自动测量装置及实验

Automatic measurement device of laser-induced damage threshold and its experiment

应用光学. 2023, 44(4): 852–858 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403006>

PEG含量对多孔膜光学带隙及激光损伤特性的影响

Influence of PEG content on optical band gap and laser damage characteristics of porous films

应用光学. 2024, 45(4): 841–848 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0407002>

中波红外激光器干扰效果对比实验研究

Comparative experimental study on interference effect of medium wave infrared laser

应用光学. 2024, 45(4): 709–715 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401006>

大量程激光位移传感器的成像系统设计

Design of imaging system for wide-range laser displacement sensor

应用光学. 2022, 43(3): 386–391 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301002>

高损伤阈值激光薄膜的制备方法

Review of preparation methods of laser films with high damage threshold

应用光学. 2023, 44(6): 1185–1194 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 05-1072-07

连续激光辐照背照式 CMOS 图像传感器实验研究

许永博^{1,2}, 王云哲^{1,2}, 郑长彬¹, 刘扬¹, 程相正³, 邵俊峰¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国洛阳电子装备试验中心 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 背照式互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 图像传感器较前照式结构显著提高了低光照环境下的拍摄效果, 激光对不同结构传感器有不同的干扰损伤机制。为了研究激光对背照式 CMOS 图像传感器的影响, 利用 1 064 nm 连续激光, 开展对背照式 CMOS 图像传感器的干扰和损伤实验研究。干扰实验观察到饱和与反饱和现象, 激光功率密度大于 $1.39 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ 时出现饱和现象, 大于 $1.03 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时出现反饱和现象。损伤实验观察到点损伤、十字线损伤、面损伤和致盲现象, 功率密度大于 $1.35 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 出现点损伤, 大于 $1.74 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 出现十字线损伤, 大于 $1.65 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时出现面损伤现象, 进一步增加激光功率, 探测器最终出现致盲现象。背照式结构电路较前照式结构的位置更深, 干扰和损伤所需的激光功率更高, 因此抗激光能力更强。

关键词: 连续激光; 图像传感器; 背照式; 激光干扰; 激光损伤

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0507003](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0507003)

Experimental study on back-illuminated CMOS image sensor irradiated by CW laser

XU Yongbo^{1,2}, WANG Yunzhe^{1,2}, ZHENG Changbin¹, LIU Yang¹,
CHENG Xiangzheng³, SHAO Junfeng¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, 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. Key Laboratory of Electro-Optic Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: Compared to the front-illuminated structure, the back-illuminated complementary metal oxide semiconductor (CMOS) image sensor significantly improves the shooting effect in low light environments, and lasers have different interference and damage mechanisms on different sensor structures. To investigate the impact of lasers on back-illuminated CMOS image sensors, experiments were conducted using a 1 064 nm continuous laser to study the interference and damage. In the interference experiment, saturation and over saturation phenomena were observed. When the laser power density exceeded $1.39 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$, saturation occurred, and when it exceeded $1.03 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, over saturation occurred. In the damage experiment, spot damage, crossline damage, surface damage, and blindness were observed. When the power density exceeded $1.35 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, spot damage occurred, and when it exceeded $1.74 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, crossline damage occurred. When the power density exceeded $1.65 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, surface damage occurred. If the laser power was further increased, the detector ultimately became blind. The back-illuminated structure circuit is deeper than the front-

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 国家重点实验室自主基础研究课题 (SKLLIM-2105)

作者简介: 许永博 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光辐照效应研究。E-mail: 773682274@qq.com

通信作者: 邵俊峰 (1984—), 男, 博士, 研究员, 主要从事激光辐照效应研究。E-mail: 13159754836@163.com

illuminated structure and requires higher laser power for damage. Therefore, it has stronger laser resistance.

Key words: continuous wave laser; image sensor; back-illumination; laser interference; laser damage

引言

互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 图像传感器, 因其高集成度、低功耗、小体积和快速传输能力, 在各领域得到了广泛应用。这些传感器能够捕捉到可见光和近红外波段的图像, 为关键决策提供重要信息。

作为光电系统的薄弱环节, CMOS 图像传感器极易受到激光的干扰, 严重情况下则导致传感器内部结构损坏, 造成永久性损伤。开展激光对 CMOS 图像传感器干扰和损伤研究, 对激光防护研究具有重要意义。对于干扰效应研究, 研究人员通过饱和像元数、干扰有效面积、干扰图像相关度等来评估干扰效果^[1], 并开展了连续激光和脉冲激光^[2]、不同波长^[3]、不同探测器^[4]的干扰效果对比性研究; 文献 [5-6] 对干扰过程中的像素翻转效和图像间断现象进行了解释。对于损伤效应研究, 林均仰对比了真空和常压条件对损伤阈值的影响^[7]。国防科技大学利用光学显微镜和扫描电镜等检测手段, 结合损伤阈值分析了不同参数激光对 CMOS 图像传感器的损伤机理^[8-10]。文献 [11-12] 中, 研究人员结合了猫眼回波图像的变化, 来分辨器件微观结构的损伤状况。此外, 在目前的损伤研究当中, 也考虑了复合激光造成的影响^[13]。

随着生产工艺和微处理技术的发展, 背照式 CMOS 图像传感器应运而生, 然而, 前期研究主要针对前照式 CMOS 图像传感器, 目前鲜有针对背照式 CMOS 图像传感器的激光干扰和损伤研究^[14]。为了研究激光对背照式 CMOS 图像传感器的干扰和损伤机制, 本文采用 1064 nm 连续激光作为光源, 初步开展激光干扰和损伤背照式 CMOS 图像传感器研究。

1 理论研究

在 1975~1977 年间, BARTOLI F 建立了红外探测器的激光加载热力学模型, 其能对连续/长脉冲激光对探测器的热力学效应进行较为准确的计算^[15-17]。基于该模型理念结合 CMOS 内部的热传导过程, 采用热传导微分方程求解连续激光加载 CMOS 图像传感器的温度场。根据能量守恒定律, 三维非稳态热传导微分方程的一般形式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中: k 为材料的导热系数; ρ 为密度; c 为热容; T 为温度。方程左边是单位时间内微元的热力学增量(非稳态项), 右侧前 3 项之和是单位时间微元通过界面热传导增加的能量(扩散项), 最后热源项 Q 可表示为

$$Q(r, z, t) = I(1 - R)\alpha \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

式中: I 为脉冲激光的峰值功率密度; R 为激光半径; α 为材料的吸收系数。

由于构成 CMOS 各层的材料具有不同的热膨胀系数, 因此当温度升高时, 各层会发生不同程度的变形, 并会产生热应力。应力场与温度场的关系如式(3)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r(r, z) = \frac{\beta E}{1 - \gamma} \left[\frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} Tr dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r Tr dr \right] \\ \sigma_\theta(r, z) = \frac{\beta E}{1 - \gamma} \left[\frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} Tr dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r Tr dr - T \right] \\ \sigma_z(r, z) = \frac{\beta E}{1 - \gamma} \left[\frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} Tr dr - T \right] \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 和 σ_z 为材料的径向、环向和轴向热应力; β 为材料的热膨胀系数; E 为材料的杨氏模量; γ 为材料的泊松比; R_0 为圆柱坐标系的半径; T 为材料的温度; r 为所求位置半径。通过求解式(1)~式(3), 可以得到 CMOS 模型的温度和应力。对于多晶硅等材料, 一般认为, 当辐照时间大于 10^{-7} s 时, 损伤形式主要是热现象, 如熔化、气化、裂纹和热应力引起的热解。由于硅基材料的电光耦合时间较短, 在激光的作用下材料表面温度会迅速上升, 直到材料的某一局部温度超过熔点, 从而形成材料热熔损伤。

2 实验研究

2.1 实验设备及原理

图 1(a) 为 CMOS 图像传感器的正照式结构, 在此基础上将金属线路层与硅基底调转方向得到图 1(b) 背照式结构。背照式 CMOS 图像传感器将感光层调转方向, 让光能从背面直射进去, 这样就避免了传统正照式图像传感器结构中, 光线会受到微透镜和光电二极管之间的金属线路层的影

响,这样的结构创新,使得 CMOS 图像传感器具有更高的灵敏度和更优秀的低光照性能。

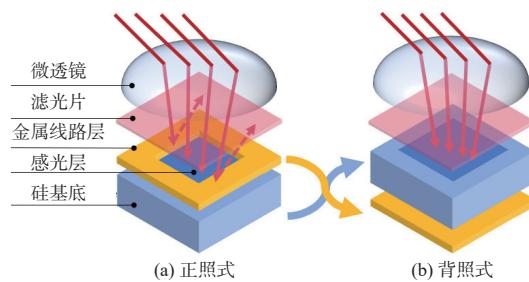


图 1 CMOS 图像传感器结构

Fig. 1 Structure diagram of CMOS image sensor

受试设备采用面阵工业探测器,其中采用的传感器为背照式 CMOS,具体参数见表 1。

表 1 背照式 CMOS 探测器参数表

Table 1 Parameters table of back-illuminated CMOS detector

指标	参数
传感器型号	Sony IMX178
像元尺寸	2.4 $\mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$
靶面尺寸	1/1.8"
分辨率	3 072 \times 2 048 像素
黑白/彩色	黑白

实验原理如图 2 所示。采用 1 064 nm 连续光纤激光器作为光源,最大功率 3 000 W,功率不稳定小 2%,光束质量 M^2 小于 1.3。激光出射后,经楔形镜进行分束,反射光到达功率计实现激光功率的实时监测,透射光经过衰减片组进行激光功率的调节,衰减片和初始系统的透过率提前标定,用于到靶功率的计算。最终激光到达受试探测器,计算机对干扰和损伤图像进行采集。

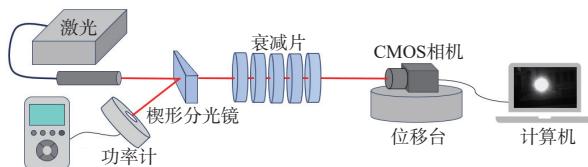


图 2 激光照射 CMOS 图像传感器实验原理图

Fig. 2 Experimental schematic diagram of laser illumination on CMOS image sensor

激光端由光源、分光及衰减系统组成,探测器端由受试相机及计算机组成,具体实验现场如图 3 所示。

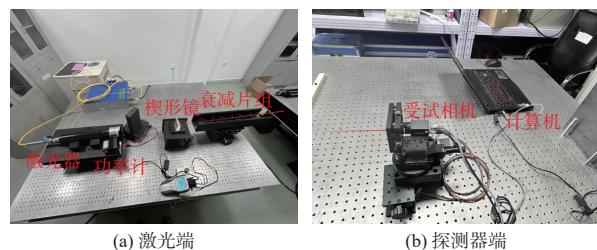


图 3 激光照射 CMOS 图像传感器实验现场图

Fig. 3 Experimental site of laser illumination on CMOS image sensor

2.2 到靶光斑计算

根据能量密度公式,阈值与光斑半径的平方成反比关系。光斑直径试验采用受试对象和光学系统直接测量的方法进行,统计方法是基于激光传输特性的二阶矩理论^[18]。根据二阶矩定义,在 4σ 直径范围内的光斑能量为总激光能量的 86.5%。因此,光斑直径定义为能量分布标准偏差的 4 倍(在 X 和 Y 方向独立计算)。

$$\begin{cases} d_{\sigma_x} = 4\sigma_x \\ d_{\sigma_y} = 4\sigma_y \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_{σ} 为光斑直径尺寸; $\sigma_i (i = x, y)$ 分别为 x, y 方向光斑能量分布的标准差。激光能量分布标准差计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{\sum_x \sum_y (x - \bar{x})^2 \cdot Z(x, y)}{\sum_x \sum_y Z(x, y)} \\ \sigma_y^2 = \frac{\sum_x \sum_y (y - \bar{y})^2 \cdot Z(x, y)}{\sum_x \sum_y Z(x, y)} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $Z(x, y)$ 为像元尺寸。而 x, y 是光斑中心坐标,其计算公式为

$$\begin{cases} x_{\text{centroid}} = \frac{\sum (X \times Z)}{\sum Z} \\ y_{\text{centroid}} = \frac{\sum (Y \times Z)}{\sum Z} \end{cases} \quad (6)$$

根据以上原理,通过计算得到激光到靶光斑大小。

3 实验结果

3.1 干扰实验

在像元未达到饱和状态下,利用成像软件获得到靶光斑图(见图 4),用于激光功率密度计算。根据 1.2 原理,通过计算得到第 1 次干扰实验的激光到靶光斑半径大小为 14.4 μm 。

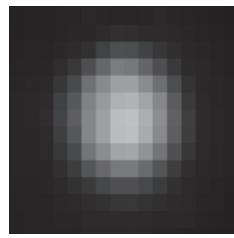


图 4 第 1 次干扰实验激光到靶光斑

Fig. 4 Light spot of the first interference experiment

通过调节激光器功率和衰减片的组合来调节到靶功率, 激光功率由小到大进行干扰实验, 辐照时间为 1 s, 计算机监测探测器不同激光功率密度下的干扰效果并进行图像采集, 计算实验不同阶段的到靶激光功率密度, 实验现象如图 5 所示, 激光功率密度单位为 W/cm^2 。

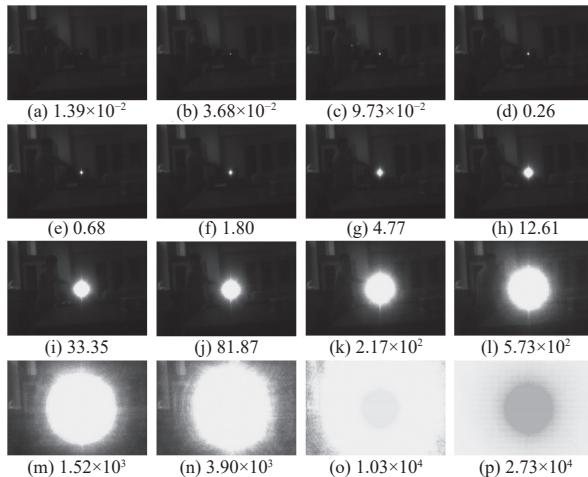


图 5 干扰实验 1

Fig. 5 Interference experiment 1

为确保实验准确性, 开展第 2 次干扰实验。到靶材光斑半径大小为 $12.0 \mu\text{m}$, 如图 6 所示。实验现象及对应的激光功率密度大小如图 7 所示, 激光功率密度单位为 W/cm^2 。

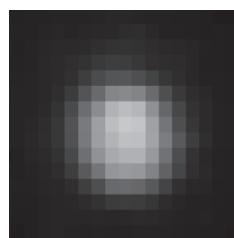


图 6 第 2 次干扰试验激光到靶光斑

Fig. 6 Light spot of the second interference experiment

提取 2 次干扰实验图像饱和像元数, 将饱和像元数与入瞳功率进行拟合, 激光到靶功率密度与有效干扰像元数的拟合关系式为

$$\begin{cases} \lg N_1 = 0.8261 \times \lg P + 3.39 \\ \lg N_2 = 0.8391 \times \lg P + 3.26 \end{cases} \quad (7)$$

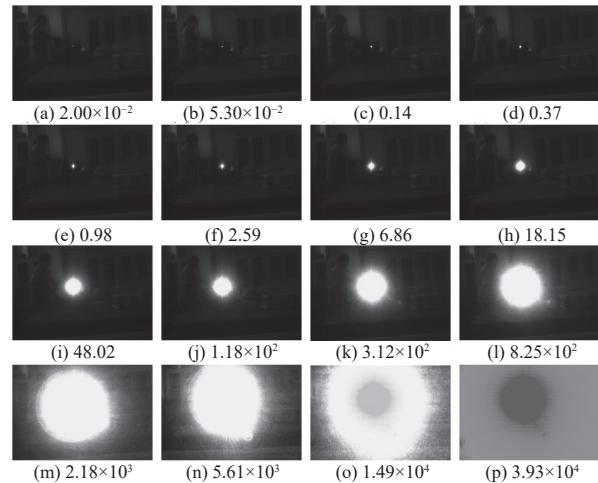


图 7 干扰实验 2

Fig. 7 Interference experiment 2

图 8 为 2 次实验得到的功率密度和饱和像元数的拟合曲线。

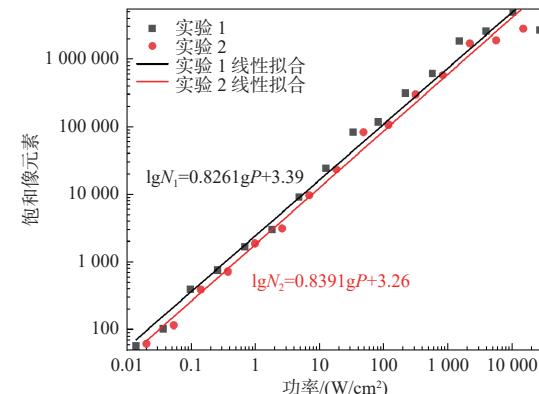


图 8 功率密度和饱和像元数的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of power density and saturated pixel number

观察发现, 2 组实验得到的干扰拟合数据较为吻合, 由于光源的衍射效应和散射效应, 随着入射激光功率密度增大, 器件饱和干扰面积也随之增大。在激光到靶功率密度为 $10^{-2} \text{ W}/\text{cm}^2$ 量级时, 探测器成像开始出现饱和; 随着激光到靶功率密度的提高, 饱和像元数增加, 干扰面积变大, 当功率密度达到 $10^3 \text{ W}/\text{cm}^2$ 量级时, 图像大面积饱和, 此时严重影响探测器成像效果; 功率密度为 $10^4 \text{ W}/\text{cm}^2$ 量级时开始出现反饱和现象, 这是因为 CMOS 图像传感器读取电路中采用相关双采样 (correlated double sample, CDS) 输出电路, 入射到传感器的功

率过大导致相关双采样的采样信号受到了影响,参考电压和信号电压之间的差值发生变化,最终产生反饱和现象,且随着激光功率的增大,反饱和面积也增大,激光停止后,画面恢复正常。

文献 [19] 开展了 1 064 nm 连续激光干扰前照式 CMOS 图像传感器实验,表 2 为文献 [19] 和本实验的结果,对比发现,在 1 064 nm 连续激光作用下,背照式 CMOS 图像传感器的激光饱和阈值及过饱和阈值均比前照式结构高。从阈值对比上看出,背照式结构有更好的抗干扰能力。本实验未出现饱和串扰现象,目前的研究结果表明,通过修改背照式 CMOS 成像阵列结构,可以显著提高串扰抑制能力,并且随着像元的逐渐缩小,单像元的进光量有所减少,同样可以提高器件的串扰抑制能力。

表 2 干扰阈值对比

Table 2 Interference threshold comparison W/cm²

型号	结构	饱和阈值	过饱和阈值	饱和串扰
Micron MT9V022	前照式	5.87×10^{-3}	6.0×10^2	2.0×10^3
Sony IMX178	背照式	1.39×10^{-2}	1.49×10^4	—

3.2 损伤实验

在干扰实验 1 的基础上继续增加激光功率开展损伤实验,研究背照式 CMOS 图像传感器抗损伤能力。辐照时间为 1 s,记录损伤视频和图像数据,确定传感器点、线、面损伤阈值,各阶段实验现象如图 9 所示。



图 9 实验 1

Fig. 9 Experiment 1

随着激光功率密度的增加,逐渐出现点损伤、十字线损伤、面损伤以及致盲现象。当激光功率密度大于 $1.35 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时开始出点损伤,当功率密度大于 $1.74 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,传感器出现十字线损伤,随着功率密度的提高,相机画面变得模糊,成像质量逐渐降低。当功率密度为 $2.27 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,传感器完全失效。

表 3 为文献 [8] 和本实验的损伤实验结果。文献 [8] 中 1080 nm 连续激光辐照 1 s 的点损伤阈值

为 $1.12 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$,与本实验相比,低了一个数量级。辐照时间 400 ms 的点损伤阈值及十字线损伤阈值也同样低了一个数量级,背照式结构探测器需要更大的功率才能对其造成损伤。

表 3 损伤阈值对比

Table 3 Damage threshold comparison W/cm²

型号	结构	辐照时间	点损伤	十字线损伤	面损伤	致盲
Micron MT9V022	前照式	1 s	1.12×10^5	—	—	—
		400 ms	1.62×10^5	1.93×10^5	—	—
Sony IMX178	背照式	1 s	1.35×10^6	1.74×10^6	1.65×10^7	2.27×10^7

结合图 10 损伤形貌,当 CMOS 图像传感器表面被破坏的深度达到一定大小时,才完全失去成像的能力,否则,破坏只能发生在局部,造成点损伤,而整体上还具有成像功能。随着激光功率提高,感光层被击穿,局部电路短路或断路导致的信号传输中断,出现十字线损伤。造成 CMOS 图像传感器大面积损伤的关键是内部电路层的严重损伤,但随着单像元的进光量有所减少,且背照式结构将电路层深埋,则需要更大功率的激光才能使其失效。

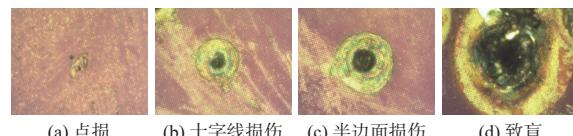


图 10 各阶段损伤形貌

Fig. 10 Damage morphology of different stages

4 结论

本研究开展了 1 064 nm 连续激光干扰和损伤背照式 CMOS 图像传感器实验研究。干扰实验中分别观察到了饱和与反饱和现象,在激光功率密度为 10^{-2} W/cm^2 量级时达到饱和, 10^4 W/cm^2 量级时出现反饱和现象。对比前照式 CMOS 图像传感器干扰阈值,背照式结构的干扰阈值更高,激光更难对其造成干扰。损伤实验中观察到典型的点损伤、十字线损伤、面损伤和致盲现象。激光功率密度为 10^6 W/cm^2 量级时开始出点损伤,随着功率密度的提高,传感器出现十字线损伤,相机画面变得模糊,成像质量逐渐降低。当功率密度达到 10^7 W/cm^2 量级时,出现面损伤,进而造成探测器完全失效。对于背照式,电路层深埋在芯片深处,使损伤的难

度增加,因此抗损伤能力更强,实验数据对后续的相关研究具有参考价值。

目前,众多 CMOS 图像传感器采用背照式和堆栈式相结合技术,以提高受光面积。因激光参数和照射结构不同造成的损伤机制差异仍不清晰,后续将继续开展不同参数光源对不同结构 CMOS 图像传感器实验,并进行对比研究。对于损伤实验过程中出现的左半部分失效现象,还需进一步对探测器电路进行深入分析研究。

参考文献:

- [1] 邵铭, 张雷雷, 赵威, 等. 高重频脉冲激光对 CMOS 相机饱和干扰效果研究[J]. *激光杂志*, 2013, 34(6): 16-17.
SHAO Ming, ZHANG Leilei, ZHAO Wei, et al. Experiment study on saturation effect of high-repetition-rate laser jamming CMOS camera[J]. *Laser Journal*, 2013, 34(6): 16-17.
- [2] 盛良, 张震, 张检民, 等. 632.8 nm 连续激光辐照可见光 CMOS 相机实验研究[J]. *现代应用物理*, 2015, 6(3): 181-185.
SHENG Liang, ZHANG Zhen, ZHANG Jianmin, et al. Experimental study on a visible light CMOS camera irradiated by 632.8 nm CW laser[J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(3): 181-185.
- [3] 王景楠, 聂劲松. 超连续谱光源辐照可见光 CMOS 图像传感器的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 0106004.
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.
- [4] 邵铭, 张乐, 张雷雷, 等. 1.06 μm 激光对 CCD、CMOS 相机饱和干扰效果对比研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 163-167.
SHAO Ming, ZHANG Le, ZHANG Leilei, et al. Comparative study on saturation effect of 1.06 μm laser jamming CCD and CMOS cameras[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 163-167.
- [5] 盛良, 张震, 张检民, 等. 连续激光辐照 CMOS 相机的像素翻转效应及机理[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0606004.
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.
- [6] 周旋风, 陈前荣, 王彦斌, 等. 脉冲激光辐照 CMOS 相机的图像间断现象及机理[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(3): 0306002.
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.
- [7] 林均仰, 舒嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 475-478.
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.
- [8] 郭锋. 激光对 CMOS 和 CCD 的辐照效应对比研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
GUO Feng. Comparative study on irradiation effect of laser on CMOS and CCD[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [9] 王昂, 郭锋, 朱志武, 等. 连续激光与单脉冲纳秒激光对 CMOS 的损伤效应[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 091007.
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): 091007.
- [10] 向洪刚. CMOS 面阵探测器强光辐照效应若干问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
XIANG Honggang. Study on some problems of strong light irradiation effect of CMOS area array detector[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.
- [11] 雷鹏, 孙可, 李化, 等. 猫眼回波图像随 CMOS 器件激光损伤变化的实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601001.
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.
- [12] 王雪. 光电传感器激光致盲与损毁技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
WANG Xue. Research on laser blinding and damage technology of photoelectric sensors[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

- [13] 朱孟真, 刘云, 米朝伟, 等. 复合激光损伤 CMOS 图像传感器实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 227-233.
ZHU Mengzhen, LIU Yun, MI Chaowei, et al. Experimental study on a CMOS image sensor damaged by a composite laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 227-233.
- [14] 温佳起, 卞进田, 李欣, 等. 激光干扰和损伤 CMOS 图像传感器研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 379-393.
WEN Jiaqi, BIAN Jintian, LI Xin, et al. Research progress of laser dazzle and damage CMOS image sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 379-393.
- [15] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, KRUER M, et al. Irreversible laser damage in ir detector materials[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(11): 2934-2937.
- [16] BARTOLI F, ESTEROWITZ L, ALLEN R, et al. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(7): 2875-2881.
- [17] BARTOLI F, KRUER M, ESTEROWITZ L, et al. Laser damage in triglycine sulfate: experimental results and thermal analysis[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(8): 3713-3720.
- [18] 邵俊峰. 短脉冲激光对硅及硅基光电器件的损伤效应与机理[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
SHAO Junfeng. Damage effect and mechanism of short pulse laser on silicon and silicon-based optoelectronic devices[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [19] 王昂. 可见光 CMOS 图像传感器的激光辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
WANG Ang. Study on laser irradiation effect of visible CMOS image sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.