

激光干扰和损伤CMOS图像传感器研究进展（特邀）

温佳起 卞进田 李欣 孔辉 郭磊 吕国瑞

Research progress of laser dazzle and damage CMOS image sensor (*invited*)

Wen Jiaqi, Bian Jintian, Li Xin, Kong Hui, Guo Lei, Lv Guorui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230269>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

光学薄膜激光损伤阈值测量不确定度

Measurement uncertainty of laser-induced damage threshold of the optical thin films

红外与激光工程. 2017, 46(8): 806007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0806007>

低照度CMOS图像传感器设计与实现

Design and realization of low-light-level CMOS image sensor

红外与激光工程. 2018, 47(7): 720002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0720002>

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>

包含交流耦合CTIA与数字CDS的CMOS图像传感器设计

CMOS image sensor design with AC-coupled CTIA and digital CDS

红外与激光工程. 2017, 46(1): 120002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0120002>

激光干扰和损伤 CMOS 图像传感器研究进展 (特邀)

温佳起^{1,2}, 卞进田^{1,2*}, 李欣^{1,2*}, 孔辉^{1,2}, 郭磊³, 吕国瑞^{1,2}

- (1. 国防科技大学 电子对抗学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 国防科技大学 电子对抗学院 先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;
3. 安徽理工大学 力学与光电物理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 高能激光是对抗光电成像系统的有效手段。随着互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 图像传感器性能和制作工艺的快速发展, 其市场占有率已逐步赶超电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD), 成为当前主流的图像传感器。CMOS 图像传感器的激光干扰和损伤也随之成为国内外相关领域的研究热点。文中首先根据 CMOS 图像传感器的发展历程, 对其结构和工作原理进行了介绍, 并在此基础上简要分析了 CMOS 图像传感器在激光辐照过程中的薄弱环节, 之后综述了 CMOS 在激光辐照下受到干扰及损伤现象的研究进展, 并对干扰的评价方法和损伤阈值的主要测量方法进行了总结归纳, 最后探讨了利用复合激光系统提升损伤 CMOS 图像传感器能力的发展现状和前景。

关键词: CMOS 图像传感器; 激光辐照; 干扰; 损伤

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230269

0 引言

CMOS 图像传感器是当前最主流的固态图像传感器, 具有功耗低、集成度高、成像速度快等特点, 最近十几年间不断在性能上取得突破性发展, 在市场占有率和产品迭代速度上都已超越了 CCD 图像探测器, 被广泛应用于数码相机、安防监控设备、手机、无人机、医疗检测和自动驾驶等领域。作为光电成像系统的核心元件, 图像传感器在其工作波长范围内强烈吸收激光能量, 相对于光电系统其他部件更容易被激光破坏, 因此, 图像探测器的激光干扰效应和破坏机理受到了国内外学者的广泛关注。

激光对 CMOS 图像传感器的辐照效应分为干扰和损伤^[1]。其中干扰通常是指瞬时的、可逆的器件功能变化, 如由于材料性质发生变化而引起的器件响应度降低、串扰增加以至器件功能暂时失效。实现干扰所需要的能量通常较低, 只需较小的激光能量密度作用于图像传感器即可实现饱和和干扰^[2]。常见的 CMOS

激光干扰现象包括饱和、过饱和干扰、串扰、全屏饱和等^[3-4]。损伤是指器件功能的永久的、不可逆的功能变化^[1]。通常以功能损伤的程度将其分类, 常见的 CMOS 图像传感器激光损伤包括点损伤、线损伤、交叉交叉损伤和完全失效损伤等^[3-5]。不同阶段的损伤与激光作用的深度有关, 其中, 完全失效损伤需要损坏芯片的电路结构, 所需的能量密度比干扰和点线损伤高得多。在 1064 nm 纳秒激光干扰损伤 CMOS 图像探测器的实验中^[2], 造成 CMOS 严重损坏的能量阈值比干扰阈值高四个数量级, 比点损伤阈值高三个数量级。

尽管国内外研究机构对图像传感器的辐照效应做了大量的研究, 但原有的研究普遍集中在激光对 CCD 和 CMOS 图像传感器的损伤阈值测量方面。在激光对图像传感器及其关键单质材料的辐照研究中发现, 不同类型的激光以及激光的参数和作用形式都对损伤阈值有影响。以脉冲激光为例, 包括激光的能

收稿日期: 2023-05-06; 修订日期: 2023-06-12

基金项目: 先进激光技术安徽省实验室主任基金项目 (KY20C603)

作者简介: 温佳起, 男, 硕士生, 主要从事光电对抗技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 卞进田, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电对抗技术方面的研究。

李欣, 男, 副研究员, 博士, 主要从事光电对抗方面的研究。

量和功率、脉宽、波长、脉冲数量、激光模式和激光的波形^[4-8]等都在一定程度上影响激光的损伤阈值(影响结果如图 1 所示)。从测量到阈值结果来看, CMOS 比 CCD 的抗干扰损伤能力更强, 这是因为 CMOS 的像元具有单独的放大和复位单元, 并具有独

立的行选通电路^[9], 因此像元之间更加独立, 更难发生串扰, 同时新型的 CMOS 更多采用背照式和堆栈式结构, 芯片中电路层较传统图像传感器位置更深^[10], 利用激光损伤电路结构进而完全损伤图像传感器的难度也更大^[11]。

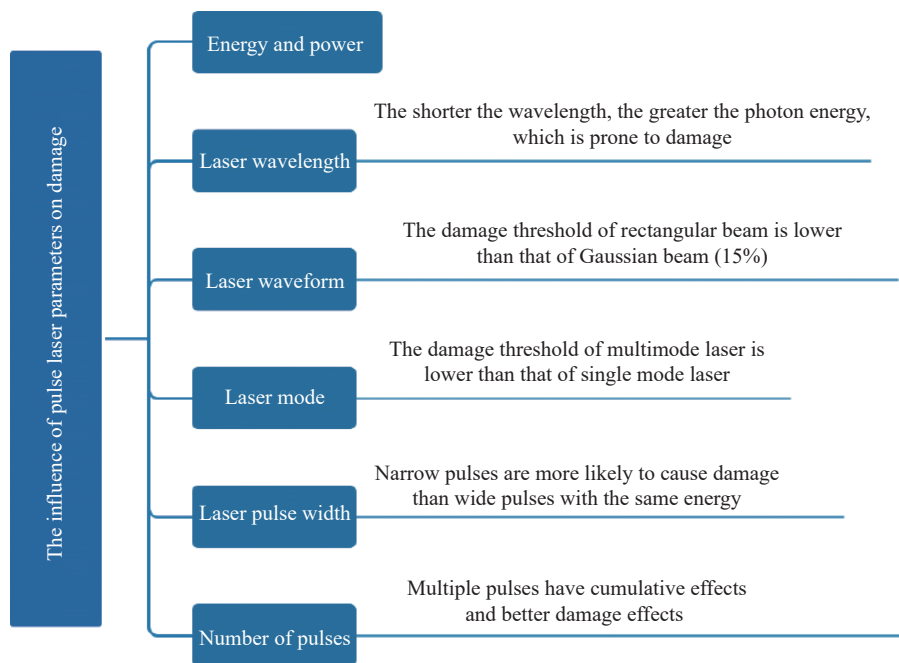


图 1 脉冲激光参数对损伤的影响

Fig.1 Effect of pulsed laser parameters on damage

针对激光干扰和损伤 CMOS 方面的应用需求, 文中对 CMOS 的结构和工作原理进行了简要介绍, 并对前照式、背照式和堆栈式 CMOS 芯片的发展现状进行阐述, 分析了 CMOS 图像传感器在激光辐照过程中的薄弱环节, 综述了 CMOS 在激光辐照下出现饱和及损伤现象的研究进展, 最后讨论了利用复合激光提高损伤效果的探索方向。

1 CMOS 像元结构

1.1 CMOS 像元结构的发展

1970 年, NASA 的喷气推进实验室成功发明了 CMOS 图像传感器^[12]。如图 2(a) 所示, 最初的 CMOS 图像传感器像元采用无源像素结构, 像元主要由光电二极管和选址开关构成。通过光电二极管接收入射光并进行光电转换, 由选址开关控制输出时序, 信号电荷读出后, 光电二极管两端的电压复位至列线电压水平。同时, 列线下端的积分放大器放大信号并转换

成电压信号输出。无源像素 CMOS 可以实现行选择, 但像素本身不能进行信号的放大, 只能通过像素阵列外的放大器进行放大。由于无源像素结构的 CMOS 存在读取速度慢、分辨率低和噪声高等缺点^[13], 1995 年, 有源像素 CMOS 器件在喷气推进实验室研制成功, 如图 2(b) 中上图所示, 早期的有源像素 CMOS 采用 3T 像元结构^[13], 每个像元包括重置晶体管 (Reset, RST)、用于隔离检测节点与列总线电容的源跟随放大晶体管 (Source Follower, SF) 和用于控制输出信号到达列输出总线的行选择晶体管 (Select, SEL)。源跟随放大器的组件由一系列像素共享。读取程序一次只执行一行, 每行像素通过行选晶体管和列放大器读出到列电容器, 之后被重置读取下一行信号。与无源像素结构相比, 有源结构在像素内部添加了放大器, 在像素内部可以放大并且缓冲光电转换产生的电信号, 然后通过金属配线输出, 像元之间绝缘分离, 读出速度加快并降低了噪声。同时, 有源像素结构仅仅在信

号读出时才工作,因此功耗比较低。由于传统光电二极管存在暗电流影响图像质量,钳位二极管 (Pinned Photodiode, PPD) 被用于 CMOS 图像传感器的像元当中,进而发展成图 2(b)中下图所示的 4T 像元结构。与较早应用的 3T 像元结构相比,4T 像元结构利用钳位光电二极管代替普通光电二极管,有效降低了表面暗电流。此外,4T 像元结构还增添了一个传输管 (Transfer Gate, TG) 和一个浮置扩散器 (Floating Diffusion, FD),使像元可以采用相关双采样 (Correlated Double Sampling, CDS) 的方式输出信号。基本原理是由图像传感器引出两路输出,通过两路信号差分去掉相同或相关的干扰信号,从而达到降噪的目的^[9]。因此,每个单独的 CMOS 有源像素结构都可以完成信号的采集、放大和输出,像元结构较无源像素 CMOS 更加独立。

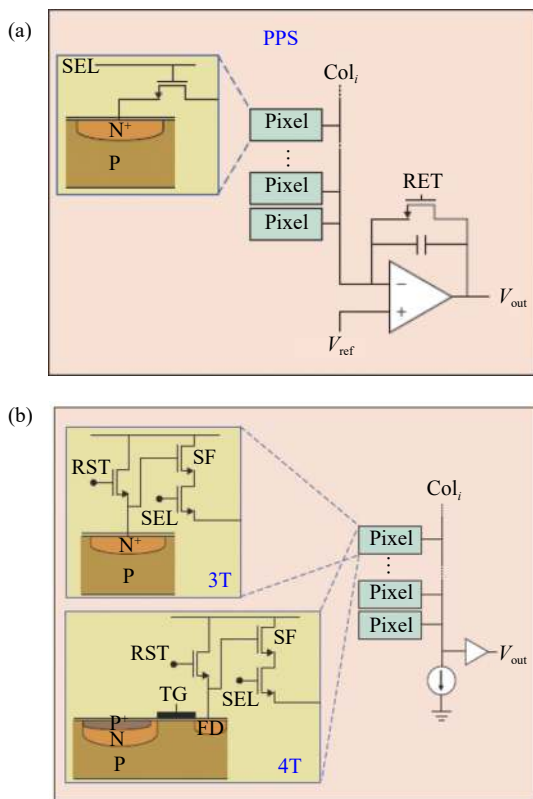


图 2 (a) 无源像素 CMOS 和 (b) 有源像素 CMOS 的像元结构^[13]

Fig.2 (a) Pixel structures of passive pixel CMOS and (b) active pixel CMOS^[13]

1.2 CMOS 图像传感器串扰抑制结构

像素间的串扰是指相邻像素间互相干扰的现象^[14]。CMOS 图像传感器中像素间的串扰主要来源于两个

方面:光学串扰和电学串扰^[15]。其中,光学串扰是指像素单元上方的入射光,如果入射角度过大,会造成光子直接射入邻近像素发生的串扰^[9];电学串扰是指在光子进入像元之后,在外延层中产生光电子空穴对,这部分光生载流子在浓度梯度的作用下发生横向扩散,最终被相邻像元中的 PPD 结构所收集^[16]。

随着图像传感器分辨率的提高,必然需要像元尺寸和间距不断缩小。像元尺寸的缩小限制了 PPD 的尺寸,电子更容易从 PPD 中溢出进入相邻的像元,间距的缩小使外延层中的光电子更容易进入相邻像元中的 PPD 结构,即电学串扰的发生概率大大增加,导致 CMOS 图像传感器的分辨率降低等问题。为降低像元之间的串扰,CMOS 像素单元普遍采用了 SiO₂ 深沟槽隔离 (Deep Trench Isolation, DTI) 结构包裹像元感光材料,这种结构一方面利用了 SiO₂ 具有优异的绝缘隔离效果,阻碍了 P 型外延层中电子的横向扩散,抑制了暗电流在像元之间的传递;另一方面利用 SiO₂ 与 Si 的折射率差,使光在像元之间传播时发生全反射,阻碍了入射光子进入相邻像元,因此 DTI 结构可以有效地抑制 CMOS 像元之间的电串扰和光串扰。如图 3 所示^[15]。

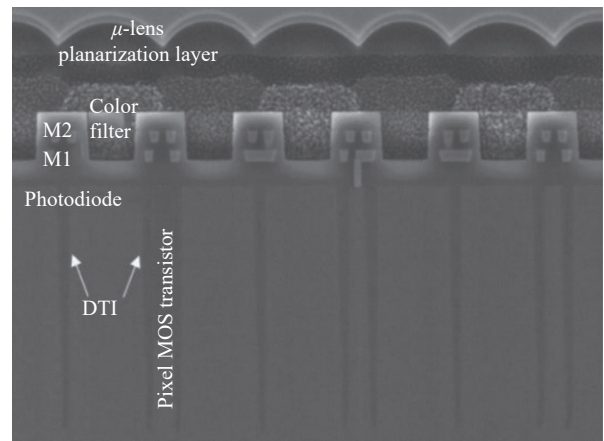


图 3 CMOS 像元间的深沟槽隔离^[15]

Fig.3 DTI between CMOS pixels^[15]

2 CMOS 图像传感器的芯片结构

2.1 前照式 CMOS 图像传感器

CMOS 图像传感器在 20 世纪初迅速发展,并超越 CCD 成为市场主流的图像传感器,一个重要的转折点是背照式 (Back Side Illumination, BSI) 图像传感

器芯片结构的成功开发^[17],这使得堆栈式结构得以发展^[18],如图 4 所示。在传统的前照式 (Front Side Illumination, FSI) 结构中,图像传感器的芯片布局为平面式结构,由于 CMOS 像元结构较 CCD 更为复杂,造成 CMOS 传感器的开口率远低于 CCD (开口率:有效感光面积与整个元件感光面面积的比值);且随着像素密度提高,像元尺寸还会进一步减小,在晶体管构造基本不变的情况下,CMOS 的开口率还会进一步减小。这样,在接受同等光照及元件大小相同的情况下,CMOS 感光元件所能捕捉到的光信号就明显小于 CCD 元件,灵敏度较低。对于 FSI 结构而言,高清晰度和高灵敏度不可能同时满足,因而早期 CMOS 产品主要针对低端市场。

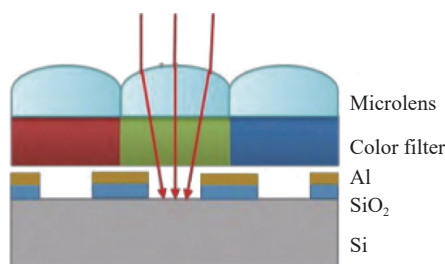


图 4 前照式 CMOS 图像传感器结构示意图^[5]

Fig.4 Schematic of the structure of the Front Side Illuminated CMOS image sensor^[5]

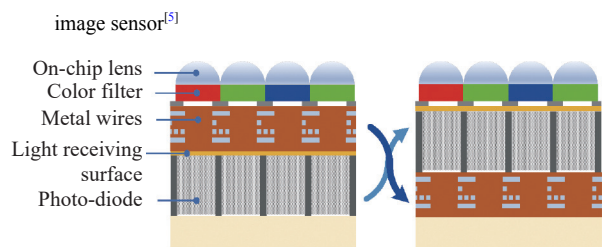


图 5 前照式与背照式 CMOS 像素结构对比。(a) 前照式结构;(b) 背照式结构

Fig.5 Comparison of pixel structures between the FSI-CMOS and BSI-CMOS. (a) Front lighting structure; (b) Back lighting structure

2.2 背照式 CMOS 图像传感器

BSI-CMOS 图像传感器是在像素尺寸不断缩小的需求下,基于传统 FSI-CMOS 图像传感器改进的新像素结构^[10],其结构与 FSI 的区别如图 5 所示。在背照式图像传感器中,将原本设置于滤光片与感光层之间的金属布线层与 SiO₂ 绝缘层移至感光层的后侧,入射光线进入 PPD 时不再被金属布线层所干扰,量子效率会得到显著提升。所以 BSI 技术不仅有助于消除 FSI-CMOS 传感器存在的噪声问题,获得更好的

图像质量,而且彻底解决了小尺寸 CMOS 图像传感器感光能力弱的先天不足^[19]。2006 年,SONY 公司的 Shin Iwabuchi 等人宣布了一种可实用的背照式高灵敏度小像素彩色 CMOS 设计,并在 2008 年 6 月发售了该背照式 CMOS 芯片,获得了传统 CMOS 图像传感器两倍的敏感度,这一技术的出现改变了 CMOS 只面向低端市场的产品定位,高端 CMOS 在图像分辨率、帧率、低光照敏感度等关键参数上逐步赶上并超过 CCD,并凭借其低功耗、成本低、易集成的优势快速占领市场^[20]。2011 年,美光公司的 Jansz Paul 等人研究了背照式图像传感器的量子效率优化问题,论证了背照式 CMOS 阵列可以在得到高速高画质的同时,显著增强灵敏度并抑制串扰^[21]。以背照式结构为基础,可以在芯片底部集成驱动脉冲、控制系统、AD 转换^[22]、信号处理^[23]等功能电路,制成堆栈式结构。目前背照式和堆栈式结构的 CMOS 图像传感器已经在工业检测、天文摄影、无人机等领域广泛使用。但针对背照式和堆栈式 CMOS 的激光干扰损伤研究仍然较少。

3 CMOS 图像传感器在激光辐照中的薄弱环节

实验表明,CMOS 图像传感器的抗激光干扰损伤能力要强于 CCD 图像传感器^[2, 24]。在从像元结构的发展来看,CMOS 的像元结构更加独立,且 DTI 结构使其具有更好的抗串扰能力。因此,CMOS 像元饱和后很少会溢出的电子会对周围的其他像元造成串扰。从芯片结构的变化来看,虽然量子效率和填充因子的不断升高使 CMOS 图像传感器的低光灵敏度有了较大提升,可能造成 CMOS 对强激光的干扰更加敏感,但随着像元的逐渐缩小,单像元的进光量有所减少,且背照式和堆栈式结构将电路层深埋,则使破坏性损伤的难度增加。因此,要想用激光造成 CMOS 图像传感器大面积的干扰和损伤,就需要对干扰和损伤的机理加深认识,找到 CMOS 图像传感器在功能和结构上的薄弱环节,并针对性地使用激光辐照。因此,文中在介绍 CMOS 结构和功能的基础上,简要分析 CMOS 图像传感器在激光辐照中可以造成大面积干扰和损伤的薄弱环节。

3.1 造成大面积干扰的薄弱环节

CMOS 图像传感器集成了相关双采样输出电路,

该电路是造成 CMOS 图像传感器过饱和现象和大量串扰关键。其工作原理如下。

信号输出过程可以分为四个阶段^[16]：

(1) PPD 复位阶段。通过打开 SEL 管、RST 管和 TG 管将 PDD 与 FD 的电位排空，像元处于待工作状态，如图 6(a) 所示；

(2) PPD 曝光阶段。SEL 管、RST 管和 TG 管关闭，PPD 采集光照累积电势，形成 V_{sig} 信号存储，如图 6(b) 所示；

(3) 对 FD 进行复位阶段。TG 管关闭，SEL 管和 RST 管打开，在 RST 管下方产生电子沟道，将 FD 中的电子引入电势较高的 RST 管源/漏，如图 6(c) 所示。

复位完成后记录 FD 的电压 V_{res} 信号；

(4) 电荷转移阶段。SEL 管和 TG 管打开，RST 管关闭，将 PPD 中收集到的光电子引入 FD 节点，转移完成后记录 FD 的电压 V_{sig} ，如图 6(d) 所示。此时，通过 FD 节点输出光电子，同时将电荷信号转换为电压信号 $V=|V_{sig}-V_{res}|$ 。

相关双采样的输出方式可以消除复位噪声的干扰，对低频噪声也有抑制作用，可以显著改善信噪比，提高信号检测精度^[16]。但是，该电路采用两个信号差值的方式输出，同时干扰两个信号就可以造成像元过饱和；由于一系列像元的 V_{res} 信号使用同一根列线传输，为大面积串扰提供了可能性。

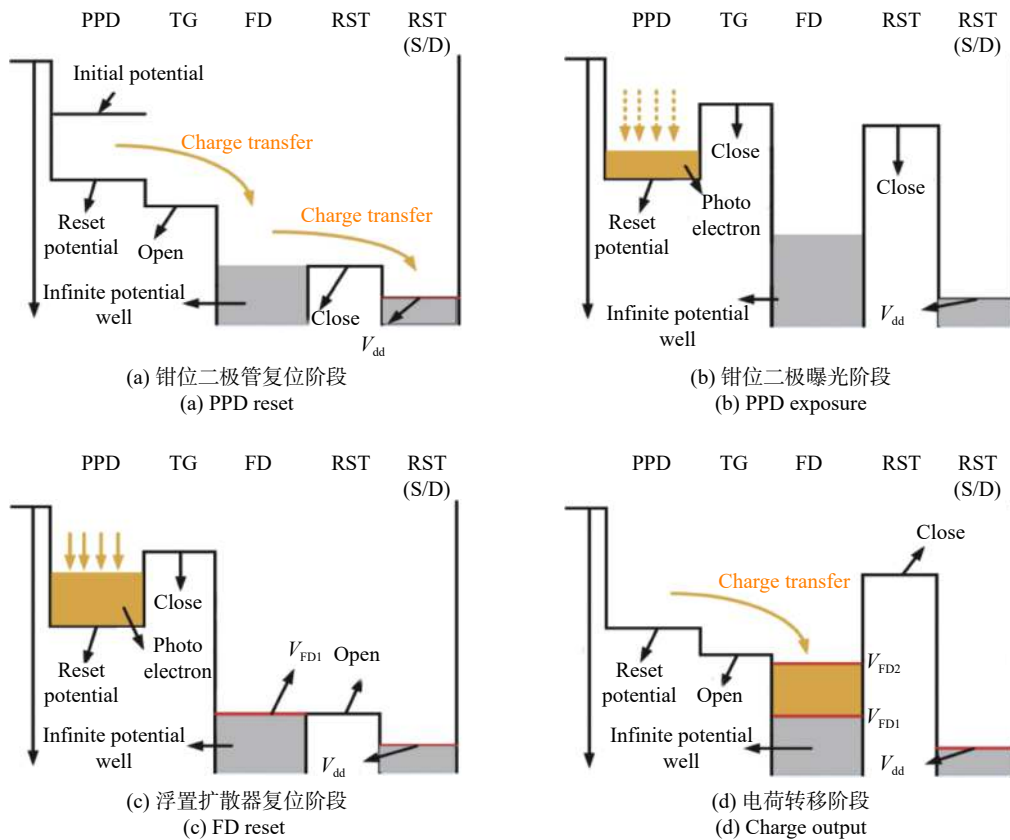


图 6 CMOS 像元的相关双采样工作过程^[16]

Fig.6 Correlated double sampling working process of CMOS pixels^[16]

3.2 造成大面积损伤的薄弱环节

常见的 CMOS 图像传感器激光损伤包括点损伤、线损伤、十字交叉损伤和完全失效损伤等。目前对 CMOS 图像传感器损伤机理的研究还不深入，结构损伤和功能损伤之间还没有完全建立起映射关系。但可以结合 CMOS 图像传感器失效分析研究^[25]和结

构相近的 CCD 图像传感器损伤进程仿真研究^[26]进行初步的分析：不同阶段的损伤与激光作用的深度有关，其中点损伤主要是由于微透镜和滤光片受损，伴随着部分金属遮光层剥落融化，部分单元像素失效造成的^[27]；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；CMOS 出现十字交叉损伤并造

成大面积失效,则需要激光能量深入 CMOS 芯片内部,造成晶体硅融化,二氧化硅由于热应力作用发生变形和断裂,金属线路严重损坏^[4,27]。由此可以判断,造成 CMOS 图像传感器大面积损伤的关键是造成内部电路层的严重损伤。

4 激光对 CMOS 图像传感器的干扰

在低功率激光辐照下,CMOS 图像传感器吸收的热量不足以影响破坏器件的物理结构和材料造成损伤,但可能会造成传感器图像饱和,影响电路信号的采集和传递,加重串扰,进而使图像质量下降直至图像完全不能识别,当激光撤去后仍可正常成像,这种瞬时的、可恢复性的器件功能变化被称为激光对图像传感器的干扰。相比于器件的损伤,干扰非常容易实现,常见的 CMOS 激光干扰现象包括饱和、过饱和干扰、串扰、全屏饱和等。不同干扰现象对 CMOS 成像功能的影响区别较大,难以用统一的评价指标来进行定量描述,所以此节首先对 CMOS 成像干扰效果的评估方法进行总结,然后通过对整体 CMOS 器件激光干扰特性相关研究的分析阐述,进一步阐明影响不同激光参数下 CMOS 干扰的可能的光学和电路因素。

4.1 干扰效果的评价方法

器件的激光饱和干扰阈值是分析激光对光电系统干扰效应的重要参数,定义为使器件像元饱和的最小能量密度(或功率密度),其值与器件的物理结构、具体材料和积分时间等因素相关^[4]。最直接的干扰阈值测量方法是用光斑直径较大的均匀激光束直接覆盖器件表面,并从未发生干扰的较低功率开始逐渐增大激光功率,使得器件像元刚好饱和。显然,这种方法要求入射激光束具有较好的稳定性和均匀性,且功率可以精确控制,对激光器和实验环境的要求很高。对于入射光的能量密度,张震^[28]总结出一套方便的测量方法,被广为使用^[3-4,24,29]。Christopher Westgate^[30]对该测量方法进行了系统地总结。这种方法利用像元未饱和时其灰度值随入射光强的增加线性增大的特点,且传感器输出图像中未饱和像素(即灰度值都低于 255)灰度值的相对大小代表着辐照光在这些像素上分配能量的相对大小。如果测得了入射光在这些像素上分配的总能量,则可以求得其中每个像素上的能量大小。实验中,如果采集到的激光光斑中无饱

和像素,则可以根据去除背景后的灰度分布及激光功率求得每个像素上分配的激光能量值,然后再结合像素的面积,得到每个像素上的激光能量密度。由于一个相机的像素尺寸是统一的,灰度相对分布就代表着像素激光能量密度的相对分布。这种方法的测量和计算过程清晰、易操作,可以较快地计算出各像素点的入射能量密度。

干扰损伤阈值以像元作为研究对象,无法描述 CMOS 成像整体被干扰的效果,同时由于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。因此,可以用激光干扰饱和面积或饱和像元数来描述 CMOS 成像整体受到干扰的程度。2014 年,王昂^[4]对激光辐照 CMOS 成像系统饱和干扰面积扩展规律进行了研究,建立了综合考虑衍射和散射效应的理论模型:CMOS 光学表面的饱和面积与平均入瞳能量密度(功率密度)在双对数坐标下成分段线性关系(如图 7 所示)。

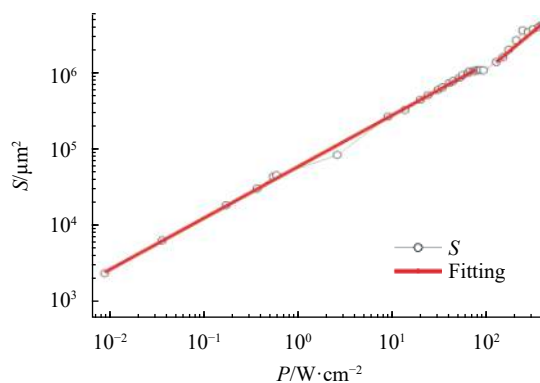


图 7 干扰面积随入射激光能量密度变化曲线^[4]

Fig.7 Curve of interference area with incident laser energy density^[4]

低功率阶段的饱和面积扩展以衍射效应为主,饱和像元数随入射光平均功率的变化关系为:

$$\lg S_d = \frac{2}{3} \lg P + \frac{2}{3} \lg (\lambda f R) - \frac{2}{3} \lg I_{th} + 1.92 \quad (1)$$

式中: S_d 为饱和面积; P 为入射光平均功率密度; f 为光学系统焦距; R 为入瞳半径; I_{th} 表示衍射产生的艾里斑光场函数的包络。

$$I_{th} = \frac{\lambda f R E^2}{\pi^2 r^3} \quad (2)$$

可以看出,饱和干扰面积随入射激光功率密度增大而增大,在双对数坐标系中的斜率为 2/3;在高功率密度下的饱和面积扩展以散射效应为主,在双对数坐

标系中也近似成线性关系,斜率的具体数值由感光表面反射率和器件结构决定。

由于当激光功率超过饱和和干扰阈值之后可能产生过饱和和反转现象,即光斑中心点灰度值随能量密度增加而下降,饱和面积反而会因此减小。用饱和面积无法正确反映过饱和和干扰的效果,这时可以采用图像评价函数来定量描述干扰效果。图像评价是指用未被干扰的图像作为参考,图像相关度、结构相似性(SSIM)都是较为常用的干扰评价指标,可以较好地评价 CMOS 成像受激光干扰的程度^[31-32]。前者定义为干扰后图像与参考图像之间的各个灰度值的协方差系数,其计算公式为:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right)\left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right)}} \quad (3)$$

式中: A_{mn} 、 B_{mn} 分别表示参考图像和干扰后图像中 m 行 n 列的灰度值; \bar{A} 、 \bar{B} 分别表示参考图像和干扰后图像的平均灰度值。相关度越小,表示受到干扰的程度越严重^[33]。

SSIM 从图片的亮度、对比度和结构三个方面衡量相似性,因此 SSIM 的计算可以表示为 $S(x, y) = l(x, y) \times c(x, y) \times s(x, y)$, 其中 x 、 y 分别代表两张图片。 $l(x, y)$ 、 $c(x, y)$ 、 $s(x, y)$ 分别表示亮度相似性、结构相似性、对比度相似性,其中 $l(x, y)$ 表示为:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (4)$$

式中: μ_x 、 μ_y 分别表示两幅图像的平均亮度。加入常数 C_1 是为了防止分母为零。 $c(x, y)$ 表示为:

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (5)$$

式中: σ_x 、 σ_y 分别表示两幅图像像素灰度的标准差。加入常数 C_2 也是为了防止分母为零。 $s(x, y)$ 表示为:

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (6)$$

式中: σ_{xy} 表示两幅图像像素灰度的协方差。

图像相关度计算简单,在相机与目标完全固定且实验条件稳定的情况下可以很好地描述 CMOS 成像受激光干扰的程度。SSIM 衡量图像的维度更全面,对拍摄稳定性要求不高,适用于更广泛的实验条件。

可用于 CMOS 干扰效果评价的图像评价函数还有很多,例如颜色直方图、余弦相似度(Cosine Similarity, COSINE)、均方误差(Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)等^[31-32]。可以根据图像场景的不同选用合适的函数,或综合使用多个函数来避免单一指标出现偏差。

4.2 激光对 CMOS 图像传感器干扰的研究现状

目前, CMOS 图像传感器已经成为科研、生产和安全等领域重要的硬件设备,在民事以及军事等领域得到越来越广泛的应用。CMOS 为了提高高光灵敏度,在可见光范围内吸收光子并转化为电信号的效率极高,在强光辐照下易受到干扰,而要使 CMOS 图像传感器产生大面积损伤以致失去成像功能是相对比较困难的^[4, 11, 34],因此研究激光对 CMOS 的干扰有很重要的实际意义。国内外研究者已经开展了多种模式激光对 CMOS 图像传感器的干扰实验研究。部分测得的干扰阈值统计在表 1 中。

在入射激光能量密度持续增强的过程中,首先可以观察到采集图样饱和面积逐渐扩大,继续增加激光能量,有一些实验中观察到了过饱和现象,即光斑中心点灰度值开始下降,甚至减小至零值。当光强降低或者撤销激光后该现象消失, CMOS 图像传感器功能完全恢复而不会受到损伤。在能量继续增加的过程中,有一些实验中观察到了串扰现象,有的实验中可以观察到图像全屏饱和。下面针对四种典型干扰现象的形成机理进行分析。

饱和、过饱和、串扰、全屏饱和等四种干扰现象,并不是在所有实验中都可以观察到,甚至在不同激光对相同型号 CMOS 或相似的激光对不同型号 CMOS 的干扰实验中也表现出差异。其中,饱和是由于入射光强超过 CMOS 图像传感器正常工作区间,使像元输出的电压对应的灰度值到达或超过灰度值 255 对应的电压,不同形式的激光虽然由于量子效率的不同在饱和干扰阈值上有差异,但只要光强足够,都可以造成 CMOS 图像传感器的像元饱和。

2014 年,王昂^[4]对过饱和现象进行了研究,发现该现象与 CMOS 图像传感器采用的相关双采样输出方式有关:当辐照激光功率密度远大于饱和阈值时,采集影响相关双采样中的两个信号, V_{sig} 与 V_{res} 都趋于饱和,两次输出的电压差值输出减小,从而导致强

表 1 CMOS 图像传感器激光干扰阈值对比

Tab.1 Comparison of laser interference thresholds for CMOS image sensors

Laser source	CMOS model	Saturation	Over saturation	Crosstalk	Full screen saturation
1.06 mm, 64 kHz, 10 ns	SONY IMX035LQZ-C	35.8 W/cm ²	-	-	4.3×10 ³ W/cm ²
1.06 mm, 10 Hz, 5 ns	DH HV1300FM	7.70×10 ⁻² J/cm ²	-	-	-
1.06 mm, 10 Hz, 5 ns (vacuum)	DH HV1300FM	7.70×10 ⁻² J/cm ²	-	-	-
532 nm CW	Micron MT9V022	4.32×10 ⁻⁴ W/cm ²	8.7×10 ² W/cm ²	-	-
1 064 nm CW	Micron MT9V022	5.87×10 ⁻³ W/cm ²	6.0×10 ² W/cm ²	2.0×10 ³ W/cm ²	2.0×10 ³ W/cm ²
632 nm CW	DHHV-U	1×10 ⁻¹ mW	-	-	-
632 nm CW	Micron MT9V032	4.2×10 ⁻⁵ W/cm ²	4.1 W/cm ²	-	11.6-24.3 W/cm ²
1 031 nm, 226.5 ps, 9.6 MHz	MicronMT9V034	-	2.3 mW	630 mW	-
1 031 nm, 226.5 ps, 2.4 MHz	MicronMT9V034	-	1.3 mW	28.5 mW	-
1 064 nm, 5 Hz, 10 ns	MicronMT9V032	-	-	-	0.76 mJ/cm

光辐照下器件出现过饱和现象。进一步研究发现,当用连续激光或长脉冲激光辐照 CMOS 探测器时可以观察到过饱和现象,而当用较短脉冲辐照 CMOS 时则观察不到过饱和现象,这是因为在 CDS 信号采集过程中, res 信号与 sig 信号的采集并不是同时进行的。以 1080P、30 帧工作的芯片为例,每帧的扫描时间约为 33.3 ms,每帧逐行扫描 1080 列,每一列的扫描时间约为 30.8 μs,而 res 信号与 sig 信号采集的时间间隔略短于这个时间,约为 20~30 μs。当激光脉宽小于两者采样间隔时,只能对其中一个信号产生影响,输出电压 $V=|V_{sig}-V_{res}|$ 同样为饱和信号。因此,在用皮秒、纳秒的单脉冲激光辐照 CMOS 实验中^[16,35]均观察不到过饱和现象。而对于重频工作的激光,能否产生过饱和现象除了与脉宽相关外,还与重复频率有关。Wang 等人^[36]用 2.4 MHz 百皮秒辐照 CMOS 时观察到过饱和现象:虽然他们使用的脉冲宽度远小于 res 信号与 sig 信号的采样间隔,但由于激光处于高重频工作模式下,对两个信号都产生影响,因此两者差分信号都出现反转;而邵铭等人^[33]用 64 kHz 的纳秒激光辐照 CMOS 时则没有观察到过饱和现象。

串扰出现的原因同样与 CMOS 图像传感器的相关双采样(CDS)的工作方式有关。CMOS 图像传感器中的每个像素都是集成的信号处理电路和放大,并且有 DTI 技术等隔离技术保护,使像素之间相互绝缘。但在 CMOS 图像传感器的输出电路中同一列像素使用同一根列线,而 CDS 采样的 V_{res} 电压也在这根列线上传输,正常情况下一个像素成像周期完成后,在 PPD 曝光阶段,该像素中的各效应管保持关断状

态。当激光能量密度过大时,会导致像素单元的 MOS 管无法绝对关断,有漏电流输出到 V_{res} 传输的列线上,在同一列的其他像素读取时,输出的信号会受到影响,从而产生列串扰现象。在一些可见光尤其是绿色辐照 CMOS 图像传感器的实验研究中,串扰现象并没有发生^[29,37-38],这可能是由于在出现串扰之前,所在列像素已经全部饱和甚至全屏饱和,因此干扰了串扰线的观察,但有的研究在全屏饱和后继续提高激光能量时得到了过饱和串扰线^[39]。因此,从干扰机理和实验结果分析,激光辐照 CMOS 图像传感器普遍会出现串扰现象,但当脉宽较短时难以被观察。CMOS 图像传感器虽然会出现串扰,但与 CCD 相比更难达到,同时,CMOS 的串扰只沿列线方向展开,不会造成全屏串扰。全屏饱和对于大画幅的 CMOS 图像传感器同样很难达到。这是由于在聚焦状态下工作的激光能量非常集中,CMOS 图像传感器像元又相对独立,无法造成大面积的串扰,干扰光斑的面积扩展随入射能量增长较慢,因此在部分实验中,全屏干扰阈值甚至高于损伤阈值。

对图像传感器的干扰虽然可以造成光电成像系统功能的衰减和损失,但在时间上是可恢复的,在空间上又难以造成全屏干扰,使得在光电对抗过程中的作用有限,但在激光能量有限的条件下也是一种探测器致盲的手段。

5 激光对 CMOS 图像传感器的损伤

在强激光辐照下,CMOS 图像传感器吸收激光能量后温度逐渐升高,会产生熔融和汽化现象,甚至能

产生高温高压的等离子体,材料和结构遭到破坏,造成传感器上部分或全部像元的功能衰退甚至失效,这种永久性的不可逆的器件功能性变化被称为损伤。光电图像传感器的损伤效应一直以来都是研究的热点,常见的 CMOS 激光损伤现象包括点损伤、黑线损伤、十字交叉损伤和完全失效等。国际标准化组织对激光损伤及其阈值的测量有明确的定义和方法规范,研究者结合光电传感器的特性对这些定义和方法进行了细化和改进,此节将首先介绍这些规范和方法,然后综述 CMOS 激光损伤的研究进展。

5.1 损伤阈值的定义和测量

在 2011 年发布的国际激光损伤阈值检测标准文件 ISO-21254-1^[40]中规定:采用 100 倍或者 150 倍的 Nomarski 相衬显微镜所观察到的由激光导致材料发生的任何永久的形貌变化,定义为激光诱导损伤。而激光诱导损伤阈值 (Laser Induced Damage Threshold, LIDT) 定义为“光学器件损伤概率为零的最高激光辐照量”。我国在 2017 年发布了相应的行业标准文件 GB 16601.1^[41]中沿用了这一定义。用这种方法定义的激光损伤阈值是指器件或材料在损伤发生前能够承受的最大激光能量密度 (脉冲激光器,通常以 J/cm^2 为单位) 或最大激光功率密度 (连续波激光器,通常以 W/cm^2 为单位)。激光损伤试验具有统计性质, LIDT 不能被视为低于该值则绝对不会发生损伤的能量密度,而是低于该值则损伤概率小于临界风险水平的能量密度。在 ISO-21254-3^[42]中给出了光学元件对功率密度 (能量密度) 承受能力置信水平的检验和计算方法。影响置信水平取决于几个因素,包括激光的能量和时间空间稳定性、以及测试样品 (或采样点) 的数量。总体来说,激光参数越稳定,测试的样品和采样点越多,置信水平越高。

借助显微镜图像形貌变化判定损伤时需要操作人员对样品形貌的变化判断有一定经验,不同实验人员操作时可能存在偏差。图像传感器本身具备成像功能,其损伤的判定和测量可以不借助显微镜,而是通过自身的功能变化进行判定,由输出图像进行的损伤判定更为直观,也更方便定量测量。因此,在图像传感器的损伤阈值测量过程中,通常按照功能损伤的程度区划分损伤类型, CMOS 图像传感器的常见损伤类型包括点损伤、(半边) 黑线损伤、黑线交叉损伤

以及完全失效损伤^[2-4, 24]。再按照“造成该损伤类型概率为零的最高激光辐照量”来测量阈值。在部分测量中,也有研究者采用了不同的阈值定义方法,如 Francis Theberge 等^[27]在测量彩色 CCD 和 CMOS 的损伤阈值时发现,传感器上最早受到损伤的部分是用于颜色选择的拜耳滤光片,而拜耳滤光片的受热分解会影响图像传感器对颜色的响应,虽然对成像能力影响较小,但也是由材料损伤引起的不可逆的功能变化,符合损伤的定义。因此,他们将单个像素上的某个颜色通道 (红、绿或蓝) 响应永久性变化 50% (正或负) 定义为第一级损伤。对于不同的研究目标,有的研究者采用了更为灵活的定义方式。朱孟真等^[5]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,来达到对比不同制式激光损伤效果的目的。而 Bastian Schwarz 等^[43]则是将损伤面积和入射能量密度联系起来,便于对比不同图像传感器的抗损伤能力。综上所述,在符合国际标准测试规定的前提下,测量者可以根据实验设备、靶材和实验目标的差异选择最为合适的阈值定义形式。

入射光的能量密度可以使用 4.1 节所述的方法进行测量和计算。在能量密度可测的基础上,国际激光损伤阈值检测标准文件 ISO-21254-2^[44]中规范了两种 LIDT 的测量方法: 1-on-1 法和 S-on-1 法。其中 1-on-1 法是指使用相同的激光脉冲能量辐照多个不同的测试点,测量出不同激光能量密度下的损伤几率,然后再利用直线拟合包含 0~100% 的损伤几率,求出损伤阈值。由于 1-on-1 法不对同一个点进行多次辐照,不会产生累积效应而影响损伤阈值,可以得到比较准确的损伤阈值,是最为常用的测量手段,主要适用于单脉冲的实验测量,固定脉冲个数的重频激光也可使用该方法^[36]。S-on-1 法适用于有恒定能量密度的多脉冲测试,是指用 S 个相同脉冲辐照靶材的过程中,使用在线损伤探测样品观察样品的损伤,记录引起损伤的最小脉冲数,并选择合适的损伤几率绘制不同脉冲数下损伤能量密度变化的特征损伤曲线,以此标注损伤区域和非损伤区域。S-on-1 法重复测试的次数和所需的样品数远远多于 1-on-1 法,而且需要对损伤实时监测,对设备的要求较高,这种测试方法的优点是可以较为准确地预测脉冲数 N 较大时的损伤阈值。

5.2 激光对 CMOS 图像传感器损伤的研究现状

由于 CMOS 图像传感器在最近十几年逐步取代 CCD, 成为市场上主流的图像传感器, 因此对 CMOS 激光辐照效应的研究也越发受到关注。表 2 中统计了近十年来部分 CMOS 损伤阈值的测量结果。2011 年, Hiroshi 用较低功率的手持式连续激光辐照 CMOS 电路观察到了信号的翻转和电路的故障^[45]。2013 年, 郭锋^[24]进行了激光对 CMOS 和 CCD 的辐照效应对比研究, 实验中观察到单脉冲纳秒激光下前照式 CMOS 和 CCD 的不可逆损伤都可分为三个阶段, 如图 8 所示。其中 CMOS 依次出现点损伤、半边黑线损伤和十字交叉损伤三个阶段的损伤现象; CCD 依次出现点损伤、白线损伤和完全失效三个阶段的损伤现象。使用的前照式 CMOS 与 CCD 在不同阶段的损伤阈值都十分接近, 基本处于同一数量级。利用皮秒脉冲辐照 CMOS 可观察到类似的现象, 而飞秒脉冲进行的实验由于激光器能量限制只观察到点损伤。对

比三种激光的损伤阈值发现, 飞秒激光比纳秒和皮秒激光更容易造成点损伤, 损伤阈值小了一个数量级。为解释这一现象, 使用扫描电镜对点损伤形貌(如图 9 所示)进行观察对比, 发现点损伤时损伤区域内局部微透镜出现烧蚀, 相对于纳秒、皮秒作用下的微观形貌, 飞秒脉冲损伤并没有出现烧蚀比较严重的深坑, 损伤区域边缘较为清晰, 这主要是由于在单脉冲纳秒、皮秒激光的作用下, 热效应对器件的损伤影响很大, 而在飞秒激光的作用下, 热效应导致的间接损伤影响较小, 非线性效应引起的能量吸收占主要因素, 强烈的非线性吸收阻碍了激光能量向半导体深处传输, 仅上层材料被灼烧漏光。2014 年, 王昂^[4]对相同型号 CMOS 进行了多脉冲辐照的研究, 实验发现 32 ns 延迟到双纳秒脉冲比单脉冲的损伤阈值低, 10 Hz 的纳秒重频脉冲比 1 Hz 损伤效果更好, 作者认为该结果是由于纳秒脉冲热效应的累积使器件更容易损伤。

表 2 CMOS 图像传感器激光损伤阈值对比

Tab.2 Comparison of laser damage thresholds for CMOS image sensors

Laser source	CMOS model	Test method	Point damage	Black line damage	Cross damage
1 064 nm, 10 Hz, 5 ns	DH HV1300FM	1-on-1	0.5 J/cm ²	-	626 J/cm ²
1 064 nm, 10 Hz, 5 ns (vacuum)	DH HV1300FM	1-on-1	0.5 J/cm ²	-	273 J/cm ²
1 064 nm, 60 ns	Micron MT9V022	1-on-1	0.38 J/cm ²	0.64 J/cm ²	1.0 J/cm ²
1 064 nm, 25 ps	Micron MT9V022	1-on-1	19.1 mJ/cm ²	67.8 mJ/cm ²	130.1 mJ/cm ²
800 nm, 100 fs	Micron MT9V022	1-on-1	4.1 mJ/cm ²	-	-
1.06 mm, 10 ns double-pulses, interval 80 ns	Micron MT9V022	1-on-1	0.29 J/cm ² (double)	-	-
		1-on-1	0.67 J/cm ² (single)	-	-
1 031 nm, 226.5 ps, 9.6 MHz	Micron MT9 V034	S-on-1	-	1.06 W	2.5 W
1 031 nm, 226.5 ps, 2.4 MHz	Micron MT9V034	S-on-1	-	720 mW	800 mW
532 nm, CW	DCC1645C	S-on-1	150 kW/cm ²	1 400 kW/cm ²	>4 000 kW/cm ² (destroyed)
532 nm, CW	DCC1545M	S-on-1	800 kW/cm ²	1 100 kW/cm ²	>4 000 kW/cm ² (destroyed)
532 nm, 10 ns	MT9V024	1-on-1	0.035 J/cm ²	38.6 J/cm ²	-
526.5 nm, 8.2 ps	MT9V024	1-on-1	0.01 J/cm ²	18 J/cm ²	-

2019 年, Bastian Schwarz 等^[43]将 CMOS 和 CCD、数字微镜器件 (DMD) 的皮秒激光饱和与损伤阈值进行了对比研究, 测得 CMOS 的激光饱和与损伤阈值在 CCD 和 DMD 之间。2021 年, 他们利用多种脉冲激光进行了同样的对比实验, 得到了相似的结果^[34]。值得关注的是, 在测量的损伤阈值中, 不同脉冲的损伤阈值差异很大, 如皮秒激光脉冲照射的 CMOS 相机的损

伤阈值比纳秒激光脉冲的损伤阈值低一个数量级。作者记录了这一现象, 但并未从损伤机理上给出介绍。

2022 年, Christopher Westgate^[11]等区分前照式与背照式 CMOS, 测量了 95% 概率下的损伤阈值, 并与 CCD 进行了对比。如图 10 所示, 实验测得三种器件的点损伤阈值相近, 但背照式 CMOS 完全损毁的损伤阈值要比前照式 CMOS 和 CCD 至少高两个数量级。

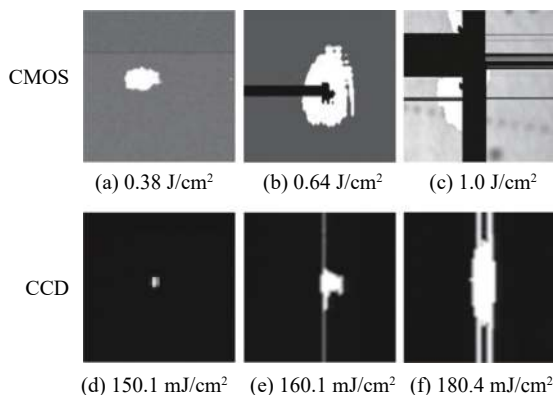


图 8 纳秒激光对 CMOS 和 CCD 不可逆损伤的对比^[24]

Fig.8 Comparison of irreversible damage to CMOS and CCD by nanosecond laser^[24]

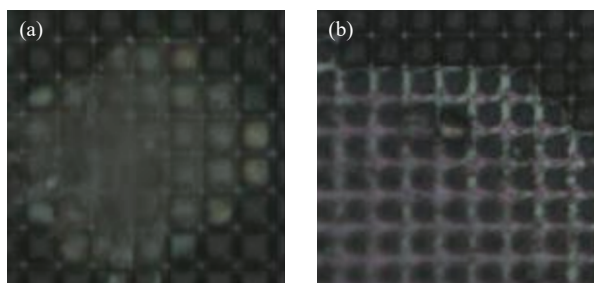


图 9 不同激光对 CMOS 表面损伤的形貌对比^[24]。(a) 皮秒激光损伤形貌; (b) 飞秒激光损伤形貌

Fig.9 Comparison of morphology of CMOS surface damage induced by different lasers^[24]. (a) Morphology of picosecond laser damage; (b) Morphology of femtosecond laser damage

作者认为这是由于背照式 CMOS 的放大器和读出电路位于光敏材料下方, 因此受到了一定程度的保护。

在 CMOS 图像传感器损伤的理论研究方面, 由于 CMOS 图像传感器的像元尺寸和功能层厚度都在微米甚至亚微米量级, CMOS 图像传感器的结构复杂、尺寸微小, 且包含多种材料组份, 加之激光对其的损伤是一个包含了传热、流体流动、相变材料的去除的复杂物理过程, 损伤发生的时间尺度也较为短暂, 因此, 理清激光能量在 CMOS 器件各层材料间沉积、传导、耦合的过程及特性是非常困难的。另一方面, 虽然对 CMOS 激光干扰损伤的机理已有初步的认识, 但并没有直接得到证据证明物理材料损伤和器件功能损伤之间的映射关系, 因此目前仍然没有成熟的 CMOS 图像传感器干扰损伤理论模型。与 CMOS 传感器结构相似的 CCD 图像传感器损伤研究在此方面有一些可借鉴的研究成果。2015 年, 李泽文^[46] 基于热弹塑

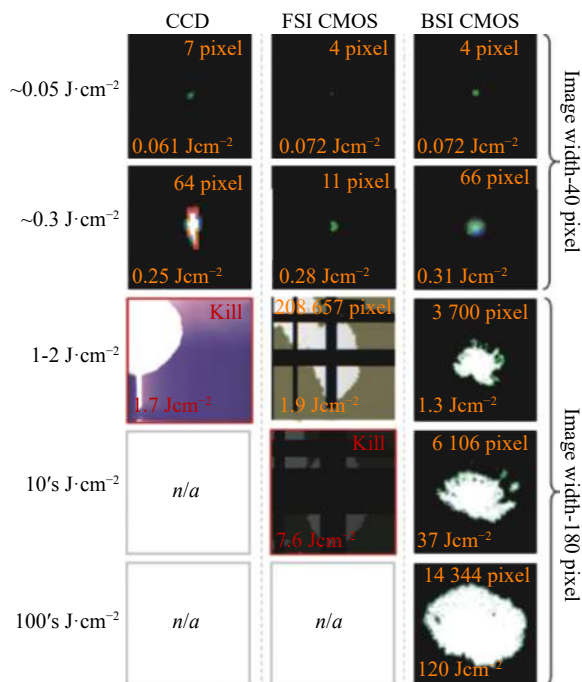


图 10 CCD、前照式 CMOS、背照式 CMOS 损伤对比^[11]

Fig.10 Comparison of damage to CCD, FSI-CMOS and BSI-CMOS^[11]

性理论, 考虑 CCD 的阵列结构和多层结构, 建立了毫秒激光辐照 CCD 的三维数值模型, 并计算得到了 CCD 瞬态温度场和热应力场。2019 年, 韩敏^[26] 以热传导方程和热弹性力学方程为基础, 建立了 $1.06 \mu\text{m}$ 连续激光辐照 CCD 六层结构的热力耦合数学物理模型, 分析了连续激光不同加载方式下 CCD 损伤特性的时间演化规律, 但对于 CMOS 图像传感器和短脉冲辐照多层结构的理论建模还没有成熟的研究结果可供参考。

由于 CMOS 和 CCD 都是以光电二极管为感光单元, 且人们对 CCD 的激光辐照损伤有广泛且深入的研究, 因此很多研究者将 CMOS 的激光辐照损伤与 CCD 进行对比研究。从上述研究可以看出, CMOS 较 CCD 有更好的抗损伤能力, 尤其是背照式 CMOS, 很难造成大面积损伤。这是由于背照式 CMOS 的电路层位置更深, 上方有一层较厚的硅基材料, 形成了一定的固有保护层。随着背照式和堆栈式等新型 CMOS 芯片的广泛应用, 如何提高激光对被照式 CMOS 的损伤效率是下一步研究中亟待解决的问题。

6 复合激光对损伤能力的提升

上述 CMOS 图像传感器激光损伤的相关研究表

明,要想提升 CMOS 器件的激光损伤效率,必须有效提高激光的热效应在 CMOS 上的累积。因此,有研究者将复合激光应用在 CMOS 图像传感器的损伤研究中,复合激光对单质靶材的烧蚀和损伤已有较为成熟的研究,如果激光参数配合得当,可以有效提升靶材对激光能量的吸收率^[8],从而提升加工和损伤效率^[46-50]。目前,利用复合体制形式的激光辐照 CMOS 已经有了初步的实验探索。2021 年,朱孟真^[5]等人将波长 1064 nm、脉宽 10 ns,波长 532 nm、脉宽 10 ns 以及波长 1064 nm、脉宽 0.4 ms 的三种激光按照波长相同和脉宽相同两两组合成复合激光,与单激光辐照前照式 CMOS 图像传感器的损伤效能进行对比,实验发现:10 ns 双波长复合激光的全器件损伤阈值(三分之二以上面积无法成像且永久性损伤)为 1064 nm 激光单独辐照时的 77.8%、532 nm 激光单独辐照时的 62.5%;1064 nm 双脉宽复合激光辐照时,使用单独 0.4 ms 激光全器件损伤阈值的 1.7% 和单独 10 ns 激光全器件损伤阈值的 76.4% 组合成复合激光,即可完全损毁 CMOS 器件。从上述研究结果来看,复合激光对 CMOS 损伤效果的提升不如单种靶材,损伤阈值的降低没有达到 50%,这可能是由于 CMOS 的多层结构影响了复合激光的功效发挥,仅凭两种激光很难达到最佳的能量配比和参数设置。若要进一步提升激光损伤效率,可以考虑进一步增加激光的可调参数,将三个或三个以上的脉冲组合成脉冲串的作用形式,其中每个脉冲的参数和任意两个激光脉冲之间的延迟时间都应独立可调。脉冲串激光有别于传统的重频激光器提高重频就要降低单脉冲能量的输出方式,同时也增加了复合激光的可调参数,更好地应对 CMOS 的多层结构。如果脉冲串激光组合方式合理,将有可能提高后续激光对前面若干层的透过率和透过深度,对后续电路层造成有效损伤,进而提升损伤效率。脉冲串激光损伤 CMOS 仍有以下三个方面的工作需要展开:首先,脉冲激光是对 CMOS 干扰和损伤大的机理,还须开展深入完善的理论研究;其次,当前复合激光参数影响干扰损伤的可参考数据较少,不足以支撑脉冲串激光的实施策略的建立;最后,需要搭建脉冲串实验系统开展脉冲串激光对 CMOS 图像传感器的实验研究,探索器件结构损伤与脉冲串参数之间的映射关系。

7 结 论

针对 CMOS 图像传感器及其激光辐照效应的研究,文中介绍了 CMOS 的像元结构和芯片结构,总结了 CMOS 图像传感器抗干扰损伤能力的结构基础。在此基础上,分析了 CMOS 图像传感器在激光辐照过程中的薄弱环节,并判断相关双采样电路受激光干扰后会产生过饱和及串扰现象,是造成大面积干扰的薄弱环节,而电路层的损伤是造成 CMOS 图像传感器大面积损伤的关键。总结了激光辐照 CMOS 的研究进展,目前对于 CMOS 图像传感器在激光辐照过程中出现的干扰损伤现象总结和阈值测量研究较为广泛,而对损伤进程和机理研究较为缺乏,尤其是对背照式和堆栈式 CMOS 在激光辐照下的干扰与损伤的研究不够深入,其损伤机理还需进一步分析。最后,介绍了复合激光干扰损伤 CMOS 图像传感器的研究进展,双脉冲复合作用对提升损伤效率起到了一定的帮助作用,并探讨了利用更多参数可调的脉冲组成脉冲串激光辐照新型 CMOS 以提高干扰和损伤效率的方案。

参考文献:

- [1] Ni Xiaowu, Shen Zhonghua, Lu Jian. Study of laser destruction for optoelectronic device and semiconductor material [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1997, 8(6): 487-490. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] Wang Xue. Study on laser blindness and damage technology of photoelectric sensors[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [4] Wang Ang. Research on the irradiation effects of CMOS image sensor under laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 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): 20210537. (in Chinese)
- [6] Shao Junfeng, Guo Jin, Wang Tingfeng, et al. Damage accumulation effects of multiple laser pulses irradiated on charged coupled device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1003002. (in Chinese)
- [7] Li Mingxin, Jin Guangyong, Tan Yong. Study on CCD detector irradiated by multi-pulse laser [C]//Proceedings of SPIE, 2016,

- 10152: 1015207.
- [8] 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)
- [9] Sun Yu. Study of pixel structure in small size backside illuminated CMOS image sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [10] Kagawa Y, Fujii N, Aoyagi K. et al. Novel stacked CMOS image sensor with advanced Cu2Cu hybrid bonding [C]//2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2016.
- [11] Christopher W, David J. Visible-band nanosecond pulsed laser damage thresholds of silicon 2D imaging arrays [J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2526.
- [12] Chen Huimin, Li Ping, Zhang Yingwen, et al. Current developments of CMOS image sensors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, 27(6): 664-668. (in Chinese)
- [13] Panneerselvam A. A review on pixel performance in CMOS image sensors [J]. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2017(5): 544-554.
- [14] 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)
- [15] Tournier A, Leverd F, Favennec L et al. Pixel-to-pixel isolation by deep trench technology: application to CMOS image sensor [C]//International Image Sensor Workshop (IISW), 2011.
- [16] Wang Hao. Design and optimization of CMOS image sensor pixel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] Shin Iwabuchi, Yasushi Maruyama, Yuko Ohgishi, et al. A back-illuminated high-sensitivity small-pixel color cmos image sensor with flexible layout of metal wiring [C]//IEEE International Solid State Circuits Conference - Digest of Technical Papers, 2006: 1171-1178.
- [18] Shunichi Sukegawa, Taku Umabayashi, Tsutomu Nakajima, et al. A 1/4-inch 8M pixel back-illuminated stacked CMOS image sensor [C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers, 2013, 22: 484-486.
- [19] Kagawa Y, Hashiguchi H, Kamibayashi T, et al. Impacts of misalignment on 1 μm pitch Cu-Cu hybrid bonding [C]//IEEE International Interconnect Technology Conference (IITC), 2020: 148-150.
- [20] Oike Yusuke. Evolution of image sensor architectures with stacked device technologies [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(6): 2757-2765.
- [21] Jansz P V, Hinckley S. Extrinsic Evolution of the Stacked Gradient Poly-homojunction Photodiode Genre [M]//Betta G F D. Advances in Photodiodes. London: IntechOpen, 2011.
- [22] Wang Xinyang, Bogaerts J, Vanhorebeek G, et al. A 2.2 M CMOS image sensor for high-speed machine vision applications [C]//Sensors, Cameras, and Systems for Industrial/Scientific Applications XI, SPIE, 2010, 7536: 75360M.
- [23] Okada C, Zeituni G, Uemura K, et al. A 50.1-M pixel 14-bit 250-frames/s back-illuminated stacked CMOS image sensor with column-parallel kT/C-Canceling S&H and ADC [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2021, 56(11): 3228-3235.
- [24] Guo Feng. Comparative study on the irradiation effect of the laser to CMOS and CCD[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [25] Liu Chuanjun. Failure analysis and process optimization of CMOS image sensor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [26] Han Min, Nie Jinsong, Sun Ke, et al. Experiment on the temporal evolution characteristics of a CCD multilayer structure irradiated by a 1.06 μm continuous laser [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4415-4420.
- [27] Théberge F, Auclair M, Daigie J, et al. Damage thresholds of silicon-based cameras for in-band and out-of-band laser expositions [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(10): 2473-2482.
- [28] Zhang Zhen. Laser-induced dazzling phenomena in visible light CCD and their mechanism[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [29] 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. (in Chinese)
- [30] Christopher W. How to Determine the Laser-induced Damage Threshold of 2D Imaging Arrays[M]. US: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2019.
- [31] Che Jinxi, Wang Dong, Zhang Hengwei, et al. Influence of laser parameters on jamming effectiveness of IR imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5): 992-997. (in Chinese)
- [32] Zhi Yueyan. Research on attack methods for UAV visual sensors[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [33] 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. (in Chinese)
- [34] Schwarz Bastian, Ritt Gunnar, Eberle Bernd. Impact of threshold assessment methods in laser-induced damage measurements using the examples of CCD, CMOS, and DMD [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(22): F39-F49.
- [35] Zhu Rongzhen, Wang Yanbin, Chen Qianrong, et al. Nanosecond-laser induced crosstalk of CMOS image sensor [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10697: 1069745.
- [36] Wang Kaixuan, Li Pingxue, Yu Xuyang, et al. Experimental study on CMOS and materials irradiated by hundred-picosecond

- pulse laser with high repetition rate [C]//High-Power Lasers and Applications XI, 2020, 11544: 1154407.
- [37] 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. (in Chinese)
- [38] 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)
- [39] Santos C N, Chretien S, Merella L, et al. Visible and near-infrared laser dazzling of CCD and CMOS cameras [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10797: 107970S.
- [40] International Organization for Standardization. ISO 21254-1 (2011). Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser-induced damage threshold—Part1: Definitions and general principles [S].Europe: IHS Global Insight, 2011.
- [41] 中国国家标准化管理委员会. GB 16601.1—2017. 激光器和激光相关设备 激光损伤阈值测试方法 第一部分: 定义和总则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [42] International Organization for Standardization. ISO 21254-3 (2011). Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser-induced damage threshold —Part3: Assurance of laser power (energy) handling capabilities [S]. Europe: IHS Global Insight, 2011.
- [43] Schwarz Bastian, Koerber Michael, Ritt Gunnar, et al. Further investigation on laser-induced damage thresholds of camera sensors and micro-optomechanical systems [C]//Technologies for Optical Countermeasures XVI, 2019.
- [44] International Organization for Standardization. ISO 21254-2 (2011). Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser-induced damage threshold —Part2: Threshold determination [S].Europe: IHS Global Insight, 2011.
- [45] Hatano Hiroshi. Novel test circuit structures using selectively metal-covered transistors for a laser irradiation upset analysis [C]//12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2011.
- [46] 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)
- [47] Zhong Facheng. Numerical calculation of thermal effects on single crystal silicon induced by combined pulse laser[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [48] Lv Xueming. Research on the damage mechanisms of silicon materials irradiated by combined millisecond and nanosecond laser[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)
- [49] Pan Yunxiang, Zhang Hongchao, Chen Jun, et al. Millisecond laser machining of transparent materials assisted by nanosecond laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 765-775.
- [50] Lv Xueming, Pan Yunxiangjia, Jia Zhichao, et al. Through-hole energy-density threshold of silicon induced by combined millisecond and nanosecond pulsed laser [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(5): 055025.

Research progress of laser dazzle and damage CMOS image sensor (*invited*)

Wen Jiaqi^{1,2}, Bian Jintian^{1,2*}, Li Xin^{1,2*}, Kong Hui^{1,2}, Guo Lei³, Lv Guorui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;

2. Anhui Laboratory of Advanced Laser Technology, Electronic Countermeasure Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;

3. School of Mechanics and Optoelectronic Physics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract:

Significance Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) image sensors are currently the most mainstream solid-state image sensors. They have the characteristics of low power consumption, high integration, and fast imaging. In the past decade, breakthroughs have been continuously made in their performance, surpassing Charge Coupled Device (CCD) image sensors in market share and product iteration speed. It is widely used in the fields such as digital cameras, security monitoring equipment, mobile phones, drones, medical detection, and

autonomous driving. As the core component of an optoelectronic imaging system, image sensors strongly absorb laser energy within their working wavelength, making them more susceptible to laser damage compared to other components of the optoelectronic system. However, the new back side illumination CMOS and stacked CMOS have significant structural differences from traditional front side illumination CMOS image sensors, and their ability to resist laser interference and damage has been greatly improved. Therefore, the laser interference effect and damage mechanism of CMOS image detectors have received widespread attention from scholars at home and abroad.

Progress Firstly, the structure and working principle of CMOS image sensor according to its development history are introduced. The pixel structure of CMOS has evolved from passive pixels to active pixels, where each pixel can independently collect, amplify, and output signals. SiO₂ deep trench isolation (DTI) structure (Fig.3(d)) is used between pixels for crosstalk suppression. The chip structure of CMOS has evolved from front illuminated to back illuminated and stacked, and the position of the metal wiring layer has buried deeper, making it more difficult to cause destructive damage. On this basis, the weaknesses of CMOS image sensor in the process of laser irradiation are briefly analyzed. CMOS uses a correlated double sampling (CDS) circuit to output signals, which uses the difference between two signals to output, and interfering with both signals causes pixel oversaturation; The use of the same column line to transmit the reference signal of a column of pixels provides the possibility of large-scale crosstalk. The damage at different stages is related to the depth of laser action. It can be concluded that the key to causing large-scale damage to CMOS image sensors is the severe damage to the internal circuit layer.

CMOS image sensor is used more and more widely. More attention has been paid to the experimental study of laser-induced dazzle and damage of CMOS. The evaluation methods of interference and the main measurement methods of damage threshold are summarized. The representative measurement results of interference and damage threshold are summarized (Tab.1-2). By comparing the results of interference, the conditions of oversaturation and crosstalk are summarized, and the conclusion is verified that the above-mentioned CDS circuit is susceptible to interference. Compared with CCD, CMOS has better anti-damage ability, especially the back-illuminated CMOS, which is difficult to cause large area damage. This is because the back-lit CMOS circuit layer is deeper, above a thicker layer of silicon-based material, forming a certain inherent protective layer. With the wide application of backlit and stack CMOS chips, how to improve the damage efficiency of laser-illuminated CMOS chips is an urgent problem to be solved in the next research.

Finally, the development status and prospects of using new laser systems to improve the damage ability of CMOS image sensors are discussed. The composite laser can be made up of two pulses with different parameters. The ablation and damage of the composite laser on the single material target has been well studied. If the laser parameters are matched properly, the absorption rate of laser energy can be improved effectively. It has been proved that the composite laser can improve the efficiency of damaged CMOS to some extent, but the effect is limited. To further improve the laser damage efficiency, we can consider to further increase the adjustable parameters of the laser, the combination of three or more pulses into the pulse string form.

Conclusions and Prospects CMOS image sensors are booming, which have become the most mainstream image sensors. As an important countermeasure, the research of laser jamming and damage CMOS image sensor needs to be further explored. The purpose of this paper is to provide some references for the future research of laser jamming and damage CMOS, and the idea of using the new laser system to improve the damage efficiency is proposed.

Key words: CMOS image sensor; laser irradiation; dazzle; damage

Funding projects: Director Foundation of Anhui Key Laboratory of Advanced Laser Technology (KY20C603)