中国光学 (中英文) Chinese Optics 核心期刊

**脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究**

钱方 彭佳琦 许永博

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

QIAN Fang, PENG Jia-qi, XU Yong-bo

引用本文:
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, 2025, 18(2): 256-265. doi: 10.37188/CO.2024-0139
QIAN Fang, PENG Jia-qi, XU Yong-bo. Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 256-265. doi: 10.37188/CO.2024-0139

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139

---

文章编号 2097-1842(2025)02-0256-10

# 脉冲激光辐照背照式 CMOS 图像传感器损伤机理研究

钱 方[1], 彭佳琦[2], 许永博[3*]
（1. 中国电子科学研究院, 北京 100041;
2. 陆军装备部, 吉林 长春 130033;
3. 苏州长光华芯光电技术股份有限公司, 江苏 苏州 215100）

**摘要:** CMOS 图像传感器是当今应用最广泛的传感器之一, 已应用在航空航天, 医学成像, 工业检测, 军事侦察等领域。然而, CMOS 图像传感器的激光干扰和损伤随之也成为国内外相关领域的研究热点。为了研究脉冲激光对背照式 CMOS 图像传感器的影响, 本文选用 Sony IMX178 背照式 CMOS 图像传感器作为靶材, 基于热传导方程, 利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对比计算了不同参数单脉冲激光辐照下 CMOS 图像传感器的温度分布。计算结果表明, 传感器在 532 nm (1 ns)、1 064 nm (1 ns)、532 nm (30 ps)、1 064 nm (30 ps) 单脉冲激光作用下的点损伤阈值分别为 61.12 mJ/cm$^2$、75.76 mJ/cm$^2$、31.83 mJ/cm$^2$、37.43 mJ/cm$^2$。同步开展了背照式 CMOS 图像传感器的激光辐照效应实验研究。结果表明: 相比于 1 064 nm 脉冲激光, 532 nm 脉冲激光作用下的图像传感器损伤阈值更低; 相比于纳秒脉冲激光, 皮秒脉冲激光有更高的峰值功率, 更容易造成点损伤。本文仿真计算得到的点损伤阈值和实验结果比较吻合。

**关 键 词:** 纳秒脉冲激光; 皮秒脉冲激光; 热力效应; 损伤阈值
**中图分类号:** TN977 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0139 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0139

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

QIAN Fang[1], PENG Jia-qi[2], XU Yong-bo[3*]
(1. *China Academy of Electronics and Information Technology*, *Beijing* 100041, *China*;
2. *Army Armaments Department*, *Changchun* 130033, *China*;
3. *Suzhou Everbright Photonics Co.*, *Ltd*, *Suzhou* 215100, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *xyb*12172022@163.*com*

**Abstract**: The CMOS image sensor is widely used in aerospace, medical imaging, industrial detection, military reconnaissance, and other fields. The laser interference and damage to CMOS image sensors have also become a research hotspot in related fields at home and abroad. To investigate the impact of pulsed laser on back-illuminated CMOS image sensors, we select the Sony IMX178 back-illuminated CMOS image sensor as the target. Based on the heat conduction equation, the finite element simulation software COMSOL Multiphysics is used to compare and calculate the temperature distribution of the CMOS image sensor under the irradiation of single-pulse lasers with different parameters. The calculation results indicate that the point dam-

收稿日期: 2024-08-01; 修订日期: 2024-09-12

age thresholds of the sensor under the effects of single-pulse lasers at 532 nm (1 ns), 1064 nm (1 ns), 532 nm (30 ps), and 1064 nm (30 ps) are respectively 61.12 mJ/cm$^2$, 75.76 mJ/cm$^2$, 31.83 mJ/cm$^2$, and 37.43 mJ/cm$^2$. Subsequently, an experimental study is conducted on the laser irradiation effects of back-illuminated CMOS image sensors. The experimental results demonstrate that the image sensor exhibits a lower damage threshold under the influence of 532 nm pulsed lasers compared to 1064 nm pulsed lasers; picosecond pulsed lasers, with higher peak power compared to nanosecond pulsed lasers, are more prone to causing point damage. The calculated point damage thresholds are highly consistent with the experimental results.

**Key words**: nanosecond pulse laser; picosecond pulse laser; thermal effect; damage threshold

## 1 引 言

互补金属氧化物半导体图像传感器 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS), 具有功耗低、集成度高、成像速度快等特点, 已经成为应用广泛的重要传感器之一。其主要采用感光单元阵列和辅助控制电路获取对象景物的亮度和色彩信号, 并通过复杂的信号处理和图像处理技术输出数字化的图像信息。根据感光元件的安装位置, CMOS 图像传感器可分为前照式结构 (FSI) 和背照式结构 (BSI)。在背照式结构的基础上, 进一步改良成堆栈式结构 (Stacked)。随着背照式和堆栈式等新型 CMOS 芯片的广泛应用, 如何提高 CMOS 的抗干扰和损伤能力已成为亟待解决的问题。然而 CMOS 图像传感器高度封装在探测器内部, 激光作用探测器时, 很难对内部传感器变化进行实时观测, 因此有必要对其开展相应的仿真计算研究。

国外方面, 2016 年, Yoon S 利用近红外连续波激光对 CMOS EOIS( electro-optical imaging system) 和图像传感器进行了激光毁伤实验研究。发现塑料制成的透镜和透镜模组熔化会导致图像模糊、黑屏等永久性损伤现象[1]。2017 年, Schwarz B 等人利用脉冲激光和连续激光对 CMOS 和 CCD 相机进行了激光损伤对比研究。实验发现 CCD 相机的损伤阈值要低于 CMOS 相机[2]。2018 年, Santos C N 等人利用可见光和近红外激光干扰 CMOS 相机, 研究了激光波长、辐照度、入射角度等参数对干扰效果的影响[3]。2021 年, Schwarz B 对数字微镜器件 (DMD) 在可见光范围内的激光诱导损伤效应进行了评估, 并与 CMOS 和 CCD 器件进行了比较[4]。2022 年, Théberge F 测量了带内和带外激光波长下硅基相机对连续波激光辐射的损伤阈值[5]。

国内方面, 2018 年, 王雪发现, 相比于 1064 nm 的激光辐照, 532 nm 的激光更容易引起 CMOS 探测器损伤[6]。向洪刚通过研究发现, 百皮秒激光以热熔损伤为主[7]。2021 年, Zhu R ZH 对 532 nm 激光辐照 CMOS 图像传感器的点阵现象及机理进行分析[8]。2022 年, 朱孟真等人采用 1064 nm 和 532 nm 双波长复合激光, 以及波长为 1064 nm、0.4 ms 和 10 ns 双脉宽复合激光对 CMOS 图像传感器的损伤效能展开实验研究[9]。

纵观目前研究可看到, 鲜有通过数值仿真计算方法来解释 CMOS 图像传感器损伤机理的。基于此, 本文采用多物理场有限元计算方法, 基于热传导方程、热应力基本方程, 开展了对不同参数激光损伤 CMOS 图像传感器的热力学仿真计算, 包括不同波长及不同脉宽单脉冲激光热力仿真。针对背照式 CMOS 图像传感器, 开展了单脉冲激光对传感器的损伤实验, 对比研究了不同激光参数下损伤效应和机理的差异。

## 2 激光辐照 CMOS 效应理论建模

### 2.1 数值模拟分析

当激光束照射到材料表面时, 一部分激光能量被反射, 另一部分被材料吸收, 吸收的激光能量被材料表面转换为热能。这些能量在材料的表面区域将产生局部高温区域, 温度迅速升高。当材料表面温度升高到足够高时, 可能会导致材料局部熔化或汽化。在上述过程中, 激光束可等效为一个具有一定时间和空间分布的热源[10-14]:

$$Q(z)=I_0\times a_1\times a_2\times a_3\times(1-R)\times\alpha\quad,\qquad(1)$$

式中，$Q(z)$为模型深度$z$处所吸收的能量，$R$为材料的反射率，$\alpha$为材料的吸收率，$I_0$为激光的初始峰值能量密度：

$$I_0=\frac{E}{\pi\omega^2\tau}\quad,\qquad(2)$$

其中$E$为激光功率，$\omega$为光斑半径，$\tau$为脉冲宽度。

$a_1$和$a_2$表示激光在空间上的分布：

$$a_1(x,y)=\exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right)\quad,\qquad(3)$$

$$a_2(z)=\exp(-\alpha\times z)\quad,\qquad(4)$$

$a_3$表示激光在时间上的分布：

$$a_3(t)=\left(-2\times\frac{t^2}{\tau^2}\right)\quad.\qquad(5)$$

CMOS 图像传感器的激光损伤过程中热量传递包括热传导、热对流、热辐射 3 部分，它们的机理各不相同。总的传热方程如下：

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_p\boldsymbol{u}\cdot\nabla T+\nabla\cdot\boldsymbol{q}=Q\quad,\qquad(6)$$

$$\boldsymbol{q}=-k\nabla T\quad.\qquad(7)$$

忽略热辐射和热对流的损失，仅考虑顶部与空气自然对流：

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q\quad,\qquad(8)$$

式中，$\rho$是材料密度，$C_p$是材料比热容，$T$是绝对温度，$t$是时间，$k$是材料的热导率，$\nabla$是温度梯度的梯度算子，$Q$是单位体积的热源项。式(8)中$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}$描述了温度随时间的变化情况，即热惯性导致的温度变化，$\nabla\cdot(k\nabla T)$描述了热量在空间中的传导，即热量沿着温度梯度从高温区向低温区传导，$Q$表示外部施加在材料中的热源。

在激光作用时，模型内外的初始温度可以表示为：

$$T_0|_{t=0}=300K\quad,\qquad(9)$$

$$T_1|_{x,y,z=\infty}=300K\quad.\qquad(10)$$

其中，$T_0$表示激光作用在初始位置初始时刻的温度，$T_1$表示距离传感器表面无穷远处的温度，同样都设置为 300 K。

边界条件：

$$-k\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial r}\bigg|_{(x,y)=(0,0)}=0\quad.\qquad(11)$$

### 2.2 几何结构模型构建

激光以热源的形式由下向上加载，依次经过微透镜层、感光层、金属线路层。微透镜的材料主要为聚酰亚胺 (PI)，聚酰亚胺具有高度的透过性，因此计算时将激光直接加载到感光层上。感光层材料为感光二极管硅材料，金属线路层的主要材料为金属铝，具体结构及划分见图 1。

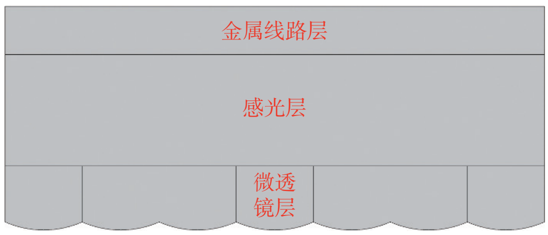



图 1 背照式 CMOS 图像传感器二维结构

Fig. 1 The two-dimensional structure of the back-illuminated CMOS image sensor

传感器各层材料的热力学参数如表 1 所示。

**表 1 材料的热力学参数**

**Tab. 1 Thermodynamic parameters of materials**

| | PI | Si | Al |
|---|---|---|---|
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 1 190 | 2 329 | 2 700 |
| 导热系数/(W·m$^{-1}$K$^{-1}$) | 0.3 | 27 | 238 |
| 热膨胀系数(1/K) | $2\times10^{-5}$ | $2.6\times10^{-6}$ | $23\times10^{-6}$ |
| 恒压热容/(J·kg$^{-1}$·K$^{-2}$) | 1 510 | 700 | 900 |
| 杨氏模量(Pa) | $3.2\times10^{9}$ | $170\times10^{9}$ | $70\times10^{9}$ |
| 泊松比 | 0.35 | 0.28 | 0.33 |
| 熔点(K) | 710 | 1 685 | 932 |

## 3 仿真实验结果与分析

### 3.1 仿真分析

#### 3.1.1 纳秒单脉冲激光仿真结果

波长为 532 nm，脉宽为 1 ns，光斑半径大小

为 5 μm 的单脉冲激光透过微透镜层辐照到感光层上，传感器温度分布见图 2(彩图见期刊电子版)。在能量密度为 61.12 mJ/cm² 的单脉冲激光辐照过程中，传感器最高温度达到了 1 690.7 K，已经超过了硅材料的熔点 1 685 K，此时传感器感光二极管将发生熔融，不能正常感光，该状态下的激光能量密度定义为传感器的点损伤阈值。在激光辐照过程中，传感器各层材料最高温度均随时间呈上升趋势，激光作用后，温度开始下降；三维模型里，PI 层和感光层相接触，因此上升趋势相同。金属线路层受温度影响较小，变化不明显，如图 2(b)所示。

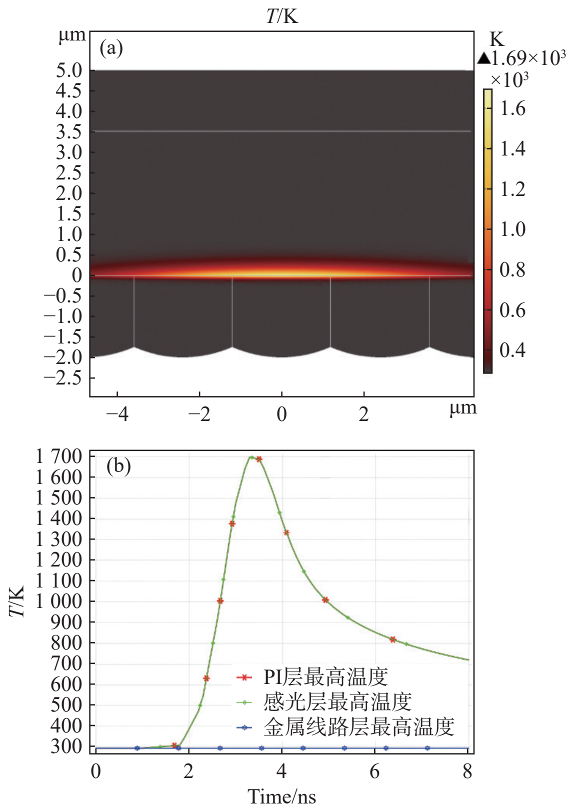



图 2　532 nm 纳秒单脉冲激光辐照结果。(a) 温度分布；(b) 各层最大温度变化

Fig. 2　Radiation results of 532 nm nanosecond single pulse laser. (a) Temperature distribution; (b) maximum temperature change in each layer

当波长为 1 064 nm 的单脉冲激光辐照模型时，仿真结果如图 3(彩图见期刊电子版)所示。该激光作用下，温度上升趋势和应力上升趋势与 532 nm 激光辐照的仿真结果差别不大。此时，要使硅材料的温度达到 1 685 K，所需的激光能量密度为 75.76 mJ/cm²，相比 532 nm 激光辐照，1 064 nm 纳秒脉冲激光辐照下，传感器的点损伤阈值更高。图 3(b)曲线变化趋势与图 2(b)近似。

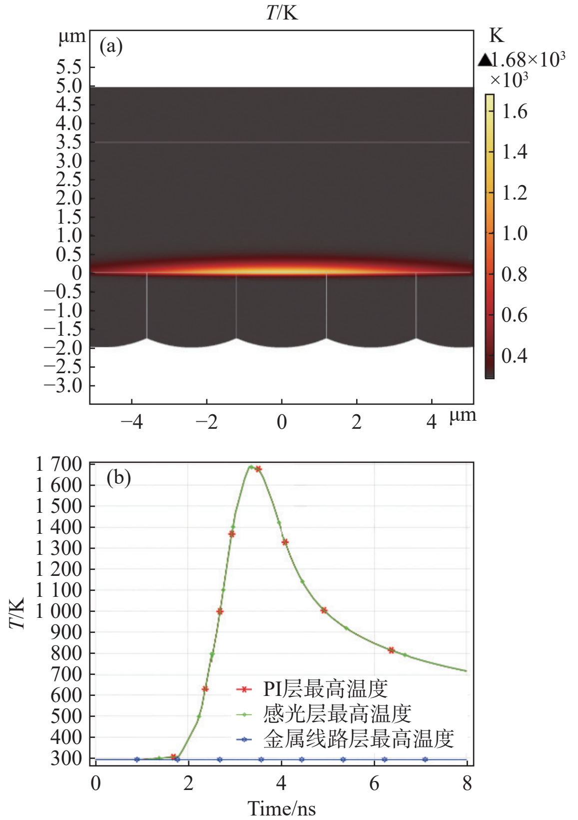



图 3　1 064 nm 纳秒单脉冲激光辐照结果。(a) 温度分布；(b) 各层最大温度变化

Fig. 3　Radiation results of 1 064 nm nanosecond single pulse laser. (a) Temperature distribution; (b) maximum temperature change in each layer

### 3.1.2　皮秒单脉冲激光仿真结果

在 532 nm, 30 ps, 光斑半径大小为 5 μm 单脉冲激光作用下，微透镜层、感光层、金属层各层温度均随辐照时间增加而上升。如图 4(彩图见期刊电子版)所示，感光层和微透镜温度上升趋势相同。在皮秒激光作用下，能量密度为 31.83 mJ/cm² 时，硅材料最高温度就能达到为 1 685.1 K，达到了材料的熔点，造成点损伤。图 4(b)曲线变化趋势与图 2(b)近似。

如图 5(彩图见期刊电子版)所示，1 064 nm 皮秒单脉冲激光辐照时，各层温度上升趋势与 532 nm 皮秒激光相似，在激光能量密度为 37.43 mJ/cm²，最高温度达到 1 695.4 K，最大应力为 689 MPa。与 532 nm 皮秒脉冲激光相比，此时的点损伤阈值更高，由此可知 532 nm 激光更容易

引起传感器的点损伤。图 5(b)曲线变化趋势与图 2(b)近似。

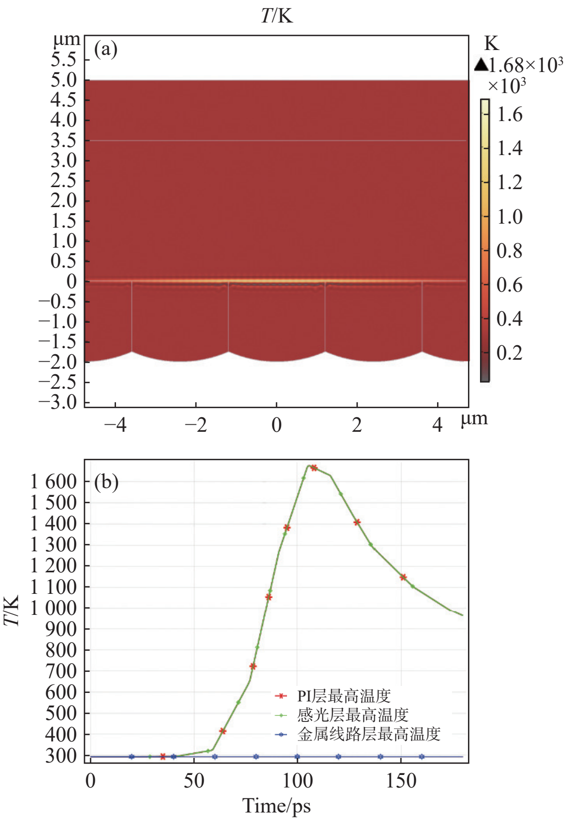
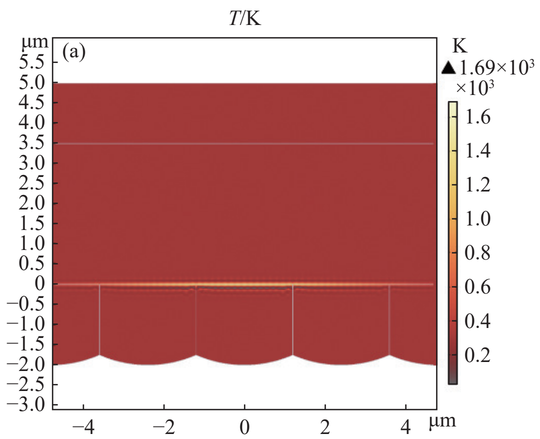



图 4 532 nm 皮秒单脉冲激光辐照结果。(a) 温度分布；(b) 各层最大温度变化

Fig. 4 Radiation results of 532 nm picosecond single pulse laser. (a) Temperature distribution; (b) maximum temperature change in each layer

各激光参数下的点损伤阈值见表 2。由表 2 可知：相同脉宽下，探测器在 532 nm 脉冲激光时的点损伤阈值较 1064 nm 脉冲激光更低；相同波长情况下，探测器在皮秒脉冲激光下的点损伤阈值较纳秒脉冲激光更低。



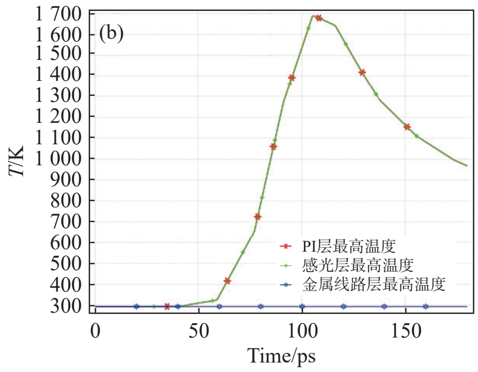




图 5 1064 nm 皮秒单脉冲激光辐照结果。(a) 温度分布；(b) 各层最大温度变化

Fig. 5 Radiation results of 1064 nm picosecond single pulse laser. (a) Temperature distribution; (b) maximum temperature change in each layer

**表 2 各激光参数下的点损伤阈值**

**Tab. 2 Point damage thresholds under various laser parameters**

| 单脉冲激光 | 点损伤阈值/(mJ·cm⁻²) |
|---|---|
| 532 nm, 1 ns | 61.12 |
| 1064 nm, 1 ns | 75.76 |
| 532 nm, 30 ps | 31.83 |
| 1064 nm, 30 ps | 37.43 |

## 3.2 激光辐照 CMOS 图像传感器实验研究

为对比不同波长和不同脉冲宽度激光对 CMOS 图像传感器的损伤效应，开展了 532 nm/1064 nm 纳秒单脉冲激光损伤 CMOS 器件实验以及 532 nm/1064 nm 皮秒单脉冲激光损伤实验，对不同波长、不同脉宽激光作用下的实验结果进行了对比分析。

### 3.2.1 纳秒脉冲激光损伤实验

#### 3.2.1.1 532 nm 纳秒单脉冲激光损伤实验

实验原理如图 6 所示。激光经过半波片和格兰棱镜组成的衰减器实现激光能量的调节，利用电压源和信号发生器对声光调制器进行调制，获得特定频率、特定脉冲数的激光，经过声光调制器的激光经分光镜进行分束，反射光束到达功率计实现激光能量的实时监测，透射光束经过衰减片使激光能量衰减，再经过扩束系统使光斑覆盖光电探测器的整个靶面。计算机控制三维转台并对 CMOS 相机的损伤图像进行采集，图 7 为实际搭建的光路。

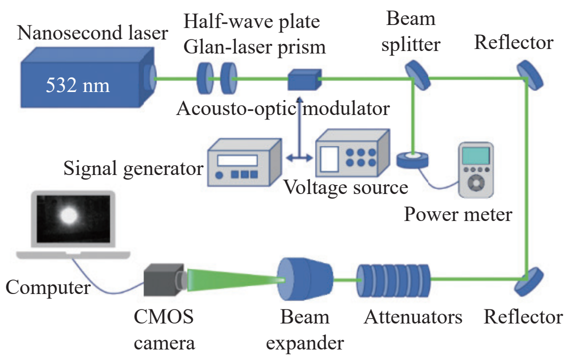



图 6　532 nm 纳秒单脉冲激光辐照 CMOS 图像传感器实验框图

Fig. 6　Experimental block of CMOS image sensor irradiated with 532 nm nanosecond single pulse laser

图 8 为 532 nm 纳秒激光辐照时 CMOS 的损伤情况。当激光能量密度为 28.95 mJ/cm$^2$ 时，激光停止照射后出现了不可恢复的白点，使用显微镜观察损伤形貌时发现，该能量密度激光作用下，仅有少量像素表面受损，并不影响其他像素的正常成像。当能量密度为 69.91 mJ/cm$^2$ 时，激光停止照射后探测器图像横纵向出现线损伤情况，损伤点横纵向区域整条线的像素失效，但不影响其他区域正常成像。随着能量密度继续提高，当达到 167.6 mJ/cm$^2$ 时，出现整个图像线损伤现象，此状态下，相机虽然还可以成像，但是线损伤密度比较大，画面变得模糊，成像质量严重下降。通过显微镜观察形貌发现，激光烧蚀面积进一步扩大，损伤区域内出现严重的深坑，严重影响到感光层后的金属电路层，影响了信号传输。当激光能量密度大于 519.3 mJ/cm$^2$ 时，探测器已经无法成像。

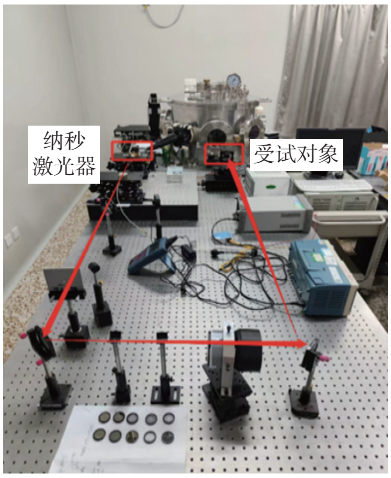
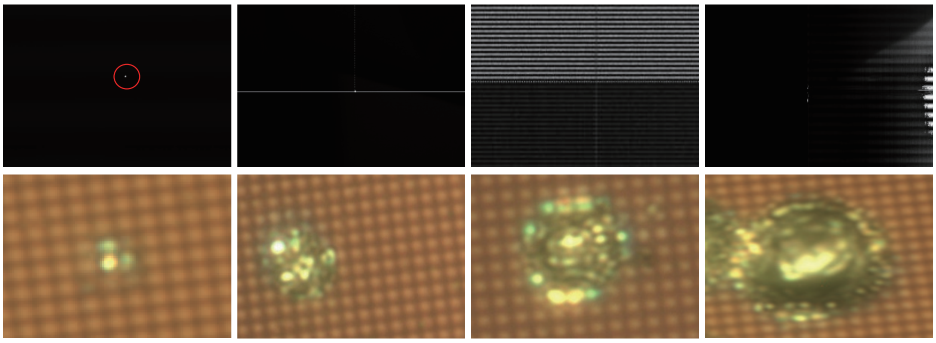



图 7　532 nm 纳秒单脉冲激光辐照 CMOS 图像传感器实验光路

Fig. 7　Light path of CMOS image sensors irradiated by 532 nm nanosecond single pulse laser



(a) 点损伤 (a) Point damage　(b) 线损伤 (b) Line damage　(c) 功能性损伤 (c) Functional damage　(d) 致盲 (d) Blindness

图 8　532 nm 纳秒激光辐照时，CMOS 图像传感器的损伤情况，从左到右激光能量密度分别为 28.95 mJ/cm$^2$、69.91 mJ/cm$^2$、167.6 mJ/cm$^2$ 和 519.3 mJ/cm$^2$

Fig. 8　Damage condition of CMOS image sensors irradiated by 532 nm nanosecond single pulse laser. From left to right, the laser energy densities are 28.95 mJ/cm$^2$, 69.91 mJ/cm$^2$, 167.6 mJ/cm$^2$, 519.3 mJ/cm$^2$, respectively

#### 3.2.1.2　1 064 nm 纳秒单脉冲激光损伤实验

1 064 nm 脉冲激光重复频率可调，可实现单脉冲触发，其辐照 CMOS 图像传感器的实验原理图如图 9 所示，相应的实验光路如图 10 所示。

图 11 给出了 1 064 nm 纳秒单脉冲激光辐照 CMOS 时的激光损伤情况。可见，随着激光能量的增加，CMOS 图像传感器在 1 064 nm 激光作用下也相继出现点损伤、线损伤、功能性损伤以及致盲现象，相应的激光能量密度分别为 40.79 mJ/cm$^2$、100.6 mJ/cm$^2$、132.4 mJ/cm$^2$、1.24 J/cm$^2$。从损伤阈值上来看，与 532 nm 纳秒脉冲激光结果相比，整体损伤阈值相对较高。1 064 nm 纳秒脉冲激光若使传感器达到致盲需要更高的能量。从损伤形貌来看，在该参数下也出现明显的热烧伤现象。分析

认为：532 nm 波段的激光波长处于可见光范围，其光子能量较高，1 064 nm 处于近红外波段，响应度相对较低，因为 532 nm 激光作用时，能量和热量是直接相关的，更高能的光子更容易引起材料的吸收并产生热效应。因此 532 nm 的激光损伤阈值更低，相比 1 064 nm 激光，更容易造成传感器损伤。

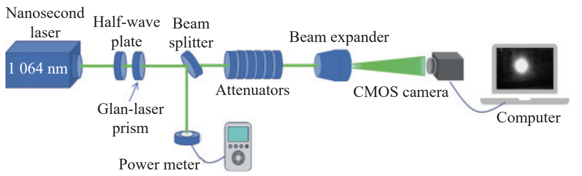



图 9　1 064 nm 纳秒单脉冲激光辐照 CMOS 图像传感器实验原理

Fig. 9　Experimental principle of CMOS image sensor irradiated with 1 064 nm nanosecond single pulse laser

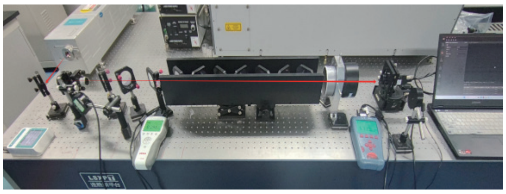
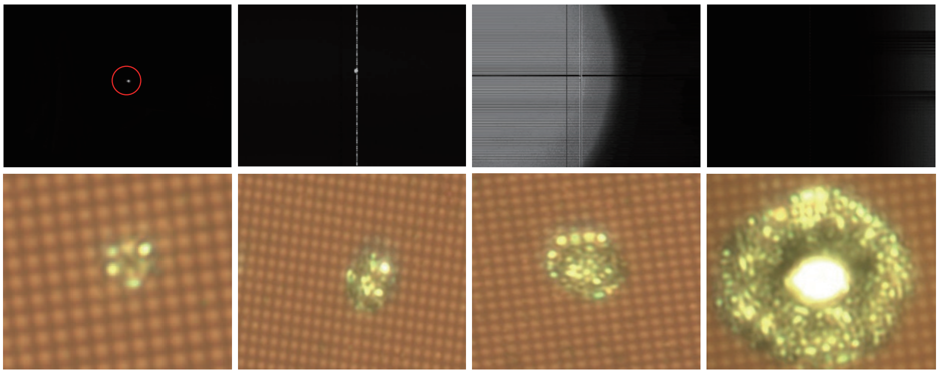


图 10　1 064 nm 单脉冲激光辐照 CMOS 图像传感器实验光路

Fig. 10　Light path of CMOS image sensor irradiated with 1 064 nm nanosecondsingle pulse laser



(a) 点损伤　(b) 线损伤　(c) 功能性损伤　(d) 致盲
(a) Point damage　(b) Line damage　(c) Functional damage　(d) Blindness

图 11　1 064 nm 纳秒单脉冲激光辐照 CMOS 传感器时的激光损伤情况，从左到右的激光能量密度分别为 40.79 mJ/cm$^2$, 100.6 mJ/cm$^2$, 132.4 mJ/cm$^2$ 和 1.24 J/cm$^2$

Fig. 11　Damage condition of CMOS image sensors irradiated by 1 064 nm nanosecond single pulse laser. From left to right, the laser energy densities are 40.79 mJ/cm$^2$, 100.6 mJ/cm$^2$, 132.4 mJ/cm$^2$, 1.24 J/cm$^2$, respectively

### 3.2.2　皮秒脉冲激光损伤实验

#### 3.2.2.1　532 nm 皮秒单脉冲激光损伤实验

实验原理如图 12 所示，皮秒激光器可切换波段，出射光依次经过半波片、格兰棱镜、分光镜、衰减片、扩束镜，最终到达靶材。具体的实验光路如图 13 所示。实验原理与前文相似，就不再详细介绍。

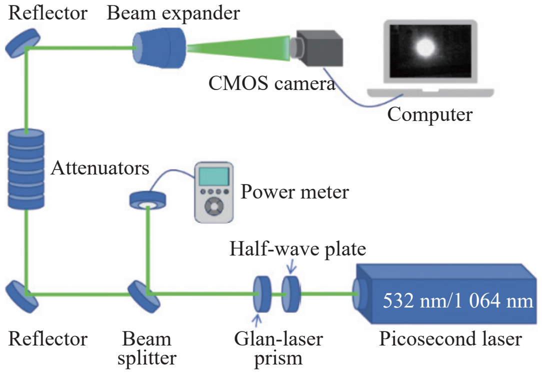



图 12　皮秒单脉冲激光辐照 CMOS 图像传感器实验原理

Fig. 12　Experimental principle of CMOS image sensor irradiated with picosecond single pulse laser

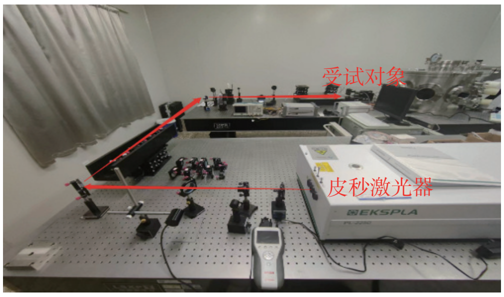
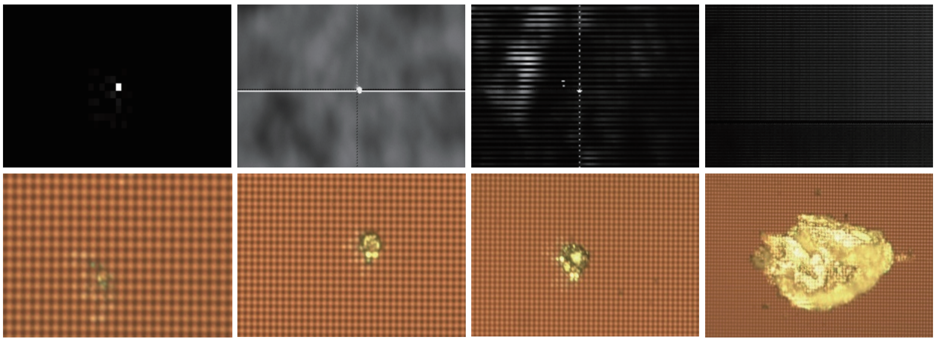



图 13　皮秒单脉冲激光辐照 CMOS 图像传感器实验光路

Fig. 13　Light path of CMOS image sensor irradiated with single pulse picosecond laser

532 nm 皮秒激光作用下，CMOS 图像传感器的损伤情形和纳秒激光作用下相似，依次出现点损伤、线损伤、功能性损伤、致盲，损伤阈值分别为 18.95 mJ/cm$^2$、78.93 mJ/cm$^2$、120.49 mJ/cm$^2$、501.33 mJ/cm$^2$，如图 14 所示。

与 532 nm 纳秒单脉冲结果相比，单脉冲皮秒激光作用下点损伤阈值、功能性损伤阈值和致盲阈值更低，但线损伤阈值增高。



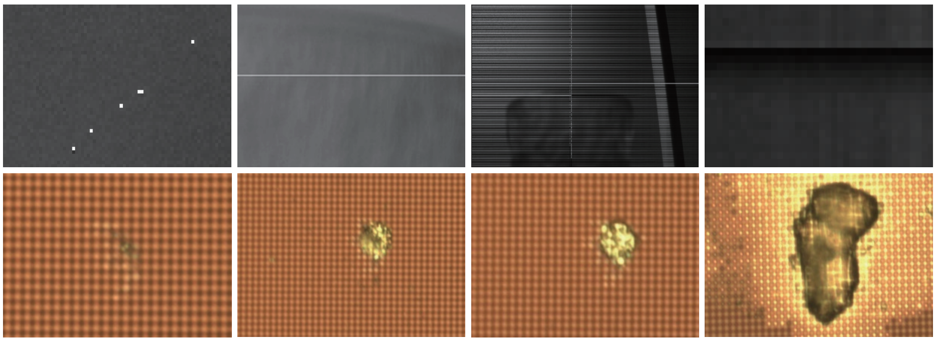
(a) 点损伤 (a) Point damage　(b) 线损伤 (b) Line damage　(c) 功能性损伤 (c) Functional damage　(d) 致盲 (d) Blindness

图 14　532 nm 皮秒激光作用下的 CMOS 图像传感器的损伤情形。从左到右的激光能量密度分别为 18.95 mJ/cm², 78.93 mJ/cm², 120.49 mJ/cm² 和 501.33 mJ/cm²

Fig. 14　Damage condition of CMOS image sensor irradiated by 532 nm picosecond pulse laser. From left to right, the laser energy densities are 18.95 mJ/cm², 78.93 mJ/cm², 120.49 mJ/cm², 501.33 mJ/cm², respectively

3.2.2.2　1 064 nm 皮秒单脉冲激光损伤实验

同样利用图 12 的光路, 将激光器波段调为 1 064 nm, 更换受测相机, 得到的 CMOS 图像传感器的损伤结果, 如图 15 所示。



(a) 点损伤 (a) Point damage　(b) 线损伤 (b) Line damage　(c) 功能性损伤 (c) Functional damage　(d) 致盲 (d) Blindness

图 15　1 064 nm 皮秒单脉冲激光作用下的 CMOS 图像传感器的损伤情形。从左到右的激光能量密度分别为 19.71 mJ/cm², 90.76 mJ/cm², 123.80 mJ/cm², 566.19 mJ/cm²

Fig. 15　Damage condition of CMOS image sensor irradicatd by 1 064 nm picosecond pulse laser. From left to right, the laser energy densities are 19.71 mJ/cm², 90.76 mJ/cm², 123.80 mJ/cm², 566.19 mJ/cm², respectirely

与 532 nm 皮秒脉冲激光相比, 1 064 nm 皮秒激光作用下, 各阶段损伤阈值更高; 与 1 064 nm 纳秒单脉冲激光相比, 则损伤阈值更低。整体来说皮秒激光更容易造成 CMOS 图像传感器的损伤。

上述实验得到的损伤阈值如表 3 所示。

**表 3　各阶段损伤阈值**

**Tab. 3　Damage thresholds for each stage**

| | | 点损伤 | 线损伤 | 功能性损伤 | 致盲 |
|---|---|---|---|---|---|
| 纳秒 | 532 nm | 28.95 | 69.91 | 167.6 | 519.3 |
| | 1 064 nm | 40.79 | 100.6 | 132.4 | $1.24\times10^3$ |
| 皮秒 | 532 nm | 18.95 | 78.93 | 120.49 | 501.33 |
| | 1 064 nm | 19.71 | 90.76 | 123.80 | 566.19 |

注: 激光能量密度单位为mJ/cm²

图 16 给出了点损失阈值的仿真结果和实验结果对比图。通过分析仿真结果可知, 激光波长由 532 nm 变为 1 064 nm 时, 点损伤阈值呈上升趋势; 激光脉宽由 1 ns 变为 30 ps 时, 点损伤阈值呈下降趋势。实验结果还显示, 改变相应参数, 点损伤阈值的变化趋势与仿真结果相同。激光与物质相互作用产生热效应的原因主要在于激光脉宽与物质内部能量传递和转换过程中时间尺度之间的关系。纳秒激光的脉宽通常在 $10^{-9}$ 秒量级, 这个时间尺度相对较长, 使得电子在被激发后有足够的时间与晶格进行能量交换, 可以迅速加热物质。皮秒激光的脉宽极窄, 通常在 $10^{-12}$ 秒量级, 这比纳秒激光的脉宽要短得多。由于脉宽极窄, 皮秒激光产生的能量释放时间也极短, 导致其在

物质内部产生的热量来不及扩散，就被局限在极小的区域内，这使得皮秒激光作用于物质时，对周围材料的热影响区域（即热效应范围）相对较小。相比之下，纳秒激光的脉宽较长，能量释放的时间也相对较长，因此其在物质内部产生的热量有足够的时间扩散到周围组织，导致热影响区域较大。

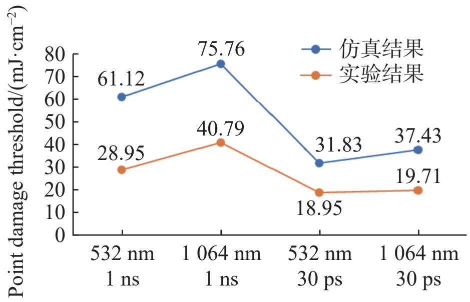



图 16 点损伤阈值仿真和实验结果对比

Fig. 16 Comparison between simulation results and experimental results of point damage threshold

## 4 结 论

本文通过数值模拟和仿真实验，对SonyIMX178 型背照式 CMOS 图像传感器的损伤机理进行了研究。基于热传导理论，利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 计算得到了 532 nm/1 064 nm 纳秒单脉冲激光和 532 nm/1 064 nm 皮秒单脉冲激光下的温度分布，并且得到了不同激光参数下 CMOS 图像传感器的点损伤阈值。结果表明，激光作用下，532 nm 纳秒单脉冲激光下的损伤阈值为 61.12 mJ/cm$^2$，1 064 nm 纳秒单脉冲激光下的损伤阈值为 75.76 mJ/cm$^2$，相比 532 nm 激光，感光材料对 1 064 nm 的吸收系数较低，产生的热效应少，因此损伤阈值更高。皮秒单脉冲激光作用下，532 nm 和 1 064 nm 激光的损伤阈值分别为 31.83 mJ/cm$^2$ 和 37.43 mJ/cm$^2$，皮秒脉宽激光由于能量密度极高，更容易导致传感器的结构破坏，因此所需要激光能量密度更低。

针对背照式 CMOS 图像传感器进行了一系列辐照实验研究，包括 532 nm/1 064 nm 纳秒单脉冲激光损伤实验、532 nm/1 064 nm 皮秒单脉冲激光损伤实验。激光作用下，点损伤只发生在传感器浅层面感光层。感光层在脉冲激光的作用下，硅结构发生变化从而造成不可恢复的损伤，点损伤面积为几个像素。发生线损伤时，感光层被击穿，局部电路短路或断路导致信号传输中断，从而无法对损伤像素的整个横向或纵向部分进行选通，这部分像素无信号输出，导致出现横向或纵向整条线的损伤情况。随着激光功率的提高，金属线路进一步损坏，相机出现整个图像线损伤现象，成像质量降低。最后，导致探测器完全失效。

激光对 CMOS 图像传感器造成的损伤机理涉及到复杂的物理和化学过程，损伤过程中损伤形变实时发生变化，对物理和化学变化也会造成不同影响，因此激光损伤建模是一个复杂的系统工程，需要不断改进和优化。

**参考文献:**


[1] YOON S, JHANG K Y, SHIN W S. Damage analysis of CMOS electro-optical imaging system by a continuous wave laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9983: 99831F.

[2] SCHWARZ B, RITT G, KOERBER M, *et al*.. Laser-induced damage threshold of camera sensors and micro-optoelectromechanical systems[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 034108.

[3] SANTOS C N, CHRÉTIEN S, MERELLA L, *et al*.. Visible and near-infrared laser dazzling of CCD and CMOS cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10797: 107970S.

[4] SCHWARZ B, RITT G, EBERLE B. 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.

[5] THÉBERGE F, AUCLAIR M, DAIGLE J F, *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.

[6] 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 X. *Study on laser blindness and damage technology of photoelectric sensors*[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese).

[7] 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 H G. *Research on the High-light irradiation effects of array CMOS detector*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. (in Chinese).

[8] ZHU R ZH, ZHANG H B, WANG ZH H, *et al*.. Lattice phenomenon and mechanism analysis of CMOS image sensor irradiated by 532 nm laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11763: 1176306.

[9] 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): 20210537.
ZHU M ZH, LIU Y, MI CH W, *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).

[10] 姜楠, 张雏, 牛燕雄, 等. 脉冲激光辐照 CCD 探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 1004-1007.
JIANG N, ZHANG CH, NIU Y X, *et al*.. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1004-1007. (in Chinese).

[11] 寇子龙. 短脉冲激光对 CCD 诱导击穿效应及机理研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
KOU Z L. *Study on the induced breakdown effect and mechanism of CCD by short pulse laser*[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022. (in Chinese).

[12] 袁磊, 王毕艺, 罗超, 等. 红外探测系统的激光辐照热效应仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(2): 021003.
YUAN L, WANG B Y, LUO CH, *et al*.. Simulation analysis of thermal effect of laser irradiation in infrared detection system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(2): 021003. (in Chinese).

[13] 张引, 邵俊峰, 汤伟. TEA $CO_2$ 长波红外激光对红外凝视成像系统探测器组件的损伤效应[J]. 光学 精密工程, 2021, 6(29): 1217-1224.
ZHANG Y, SHAO J F, TANG W. Damage effect of TEA $CO_2$ long wave infrared laser on detector assembly of infrared staring imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 6(29): 1217-1224. (in Chinese).

[14] 马彬, 侯志强, 焦宏飞, 等. 脉冲激光损伤阈值测量技术及光学元件损伤性能[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(21): 2805-2826.
MA B, HOU ZH Q, JIAO H F, *et al*.. Pulsed laser-induced damage threshold measurement and damage performance of optical components[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(21): 2805-2826. (in Chinese).

**作者简介:**

钱　方(1987—), 女, 吉林长春人, 博士, 高工, 2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事激光辐照效应研究。E-mail: qfmail@sina.cn

彭佳琦(1983—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 工程师, 2009 年于石家庄军械工程学院获得硕士学位, 主要从事信号处理研究。E-mail: pengjiaqi613@163.com

许永博(1998—), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 2024 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事激光辐照效应研究。E-mail: xyb12172022@163.com