

文章编号: 1001-3806(2025)04-0507-06

532 nm 纳秒脉冲激光对 CCD/CMOS 的干扰效果对比研究

赵 泽, 王春锐, 王 锐, 郭 劲, 郑长彬*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033, 中国)

摘要: 为了研究电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS)两种典型图像传感器在 532 nm 纳秒脉冲激光作用下的干扰效果, 基于 ISO-21254 的测试方法, 分别在大气和真空环境下开展了 532 nm 纳秒脉冲激光干扰 CCD 和 CMOS 的实验研究; 对比分析了 50 ms 的曝光时间内, 不同作用脉冲数对干扰效果的影响, 并对比了大气与真空条件下的干扰效果。结果表明, 532 nm 纳秒激光对 CCD 和 CMOS 具有明显的干扰效应, 均出现了光学饱和现象, 且 CCD 存在“反饱和”与“饱和串音”现象; 随着作用脉冲数的增加, 饱和像素数随激光能量密度线性增长, 且作用脉冲数越多, 增长速度越快; CCD 在真空中的干扰效果优于大气中的, 而 CMOS 在大气中的干扰效果更为明显, 且 CMOS 比 CCD 具有更好的抗 532 nm 纳秒脉冲激光干扰的能力。此研究结果为实际应用环境中探测器的选择提供了参考依据。

关键词: 激光技术; 激光干扰; 脉冲累积效应; 电荷耦合器件

中图分类号: TN977

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2025.04.005

Comparative study on the interference effect of 532 nm nanosecond pulse laser on CCD and CMOS

ZHAO Ze, WANG Chunrui, WANG Rui, GUO Jin, ZHENG Changbin*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To examine the interference effects of a 532 nm nanosecond pulse laser on two representative image sensors, namely charge-couple device (CCD) and complementary metal-oxide semiconductor (CMOS), experimental studies were conducted in accordance with the testing methodology outlined in ISO-21254, under both atmospheric and vacuum conditions. The impact of varying pulse numbers within a 50 ms exposure duration was systematically compared and analyzed alongside the interference effects observed in different environments. The findings indicate that both CCD and CMOS are significantly influenced by the 532 nm nanosecond laser, resulting in optical saturation phenomena. Additionally, CCD demonstrates “reverse saturation” and “saturation crosstalk”. As the number of applied pulses increases, the quantity of saturated pixels exhibits a linear growth relative to laser energy density, with an accelerated growth rate corresponding to an increase in pulse count. Notably, CCD displays superior performance against interference effects in vacuum compared to atmospheric conditions; conversely, CMOS shows more pronounced interference effects when tested under atmospheric conditions but possesses greater resilience against 532 nm nanosecond pulse laser disturbances than its CCD counterpart. These research outcomes provide valuable insights for selecting detectors suitable for practical application environments.

Key words: laser technique; laser interference; pulse accumulation effect; charge-couple device

0 引 言

近些年, 随着激光技术的飞速发展, 激光对于成像器件的干扰损伤问题得到了广泛关注。电荷耦合器件(charge-couple device, CCD)传感器和互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide semiconductor, CMOS)传感器是目前两种普遍应用的图像传感器, 广泛应用于遥感成像^[1-3]、卫星侦察^[4]、图像跟踪^[5]、空间探测^[6]等科研领域^[7-10]。因此, 开展激光对 CCD 和

CMOS 两种光电探测器的干扰效果研究, 对于光电对抗与激光防御具有重要意义。

目前, 关于激光对 CCD 和 CMOS 的干扰和损伤问题, 科学家们虽然已经展开了大量的研究工作, 但 CCD 和 CMOS 的激光干扰研究大多集中于近红外连续^[11-13]、脉冲激光^[14-15]的作用, 缺少可见光波段纳秒激光对 CCD 和 CMOS 图像传感器的干扰数据。已有的研究表明, 激光对 CCD 和 CMOS 图像传感器的干扰效果主要由探测器光电效应产生的光生载流子决定, 激光波长^[16]、能量密度、频率^[17]、辐照时间以及器件本身材料结构^[18]等因素也均会对干扰效果产生影响, 然而对于不同激光脉冲数对于 CCD 和 CMOS 干扰

* 通信作者: zhengchangbin@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2024-08-28; 修回日期: 2024-10-28

效果的影响是尚待研究的。此外,在实际应用过程中,真空环境对激光干扰效果的影响也是值得关注的,在真空和大气两种环境下激光对 CCD 和 CMOS 的干扰效果差异需要进一步明确。同时,CCD 与 CMOS 对 532 nm 激光的抗干扰能力的差异有待进一步探讨。

本文中基于 ISO-21254 测试标准,在真空和大气条件下,采用 532 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 和 CMOS 进行了损伤干扰实验,并揭示了其干扰机制,测试了不同能量密度的激光的干扰效果,重点研究了激光脉冲数对干扰效果的影响,并对比分析了真空及大气环境对干扰效果的影响差异。

1 实验装置

本文中所用激光为 532 nm 的脉冲激光,单脉冲能量为 550.8 μ J,重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 960 ps,激光光束发散角在 x 方向及 y 方向分别为 2.9 mrad 和 0.6 mrad。基于 ISO-21254,搭建了 532 nm 纳秒脉冲激光干扰 CCD 和 CMOS 的实验装置,如图 1 所示。其中 532 nm 纳秒脉冲千赫兹激光经过半波片和偏振片组成的衰减器实现对激光能量的调节,利用电压源和信号发生器对声光调制器进行调制,获得特定频率的激光;激光经分光镜进行分光,反射光束到达能量计以实现激光能量的实时监测,透射光束经过衰减片进行激光能量的衰减,再经过扩束器使光斑覆盖真空罐内光电探测器的整个靶面,通过控制光电探测器的曝光时间,结合脉冲信号发生器的控制频率,实现在曝光时间内特定脉冲数对光电探测器的干扰作用;利用光电探测器图像采集软件对干扰图像进行采集,经过后期数据处理,获得激光对光电探测器干扰效果的参数。实验中采用 CCD 及 CMOS 两种光电探测器,其对应的具体参数如表 1 所示。

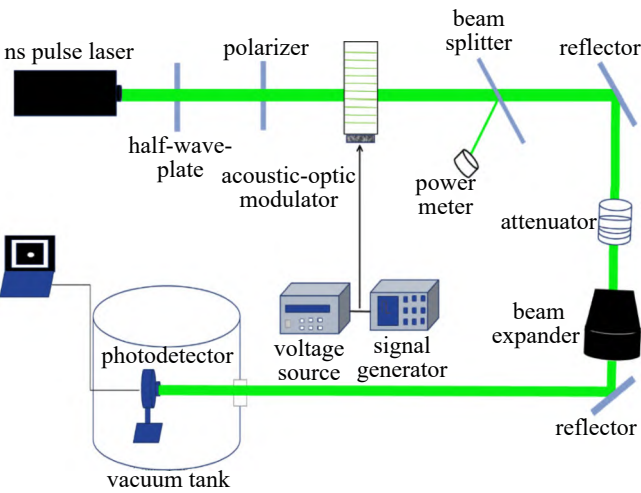


图 1 模拟空间条件激光干扰损伤实验装置图
Fig. 1 Experimental setup for simulating laser interference damage under spatial conditions

表 1 CMOS 和 CCD 图像传感器参数

Table 1 Parameter of CMOS and CCD image sensor

chip	CMOS aptina: Sony IMX174	CCD aptina: Sony ICX618
mono or color	mono	mono
resolution	2.3×10^9 pixel	video graphic array
frame frequency	50/s	120/s
shutter	global	global
sensitive area	11.3 mm $\times$ 7.1 mm	3.7 mm $\times$ 2.8 mm
pixel size	5.86 μ m $\times$ 5.86 μ m	5.6 μ m $\times$ 5.6 μ m

利用计算机采集激光作用下 CCD 和 CMOS 的图像,调节光电探测器镜头使其聚焦,获得未发生像素饱和且稳定的光斑。CCD 和 CMOS 的光斑测试如图 2 所示。由于在光斑图像中,单个像元的灰度值对整个光斑灰度值的占比表征了激光能量的分布,灰度值最大的像元也是最容易发生干扰和损伤的位置,因此计算出灰度值最大的像元的能量占比,并用该像元的能量密度代表整个激光作用的能量密度,测得 CCD 和 CMOS 中心像元的能量占比分别为 0.66 和 0.4。

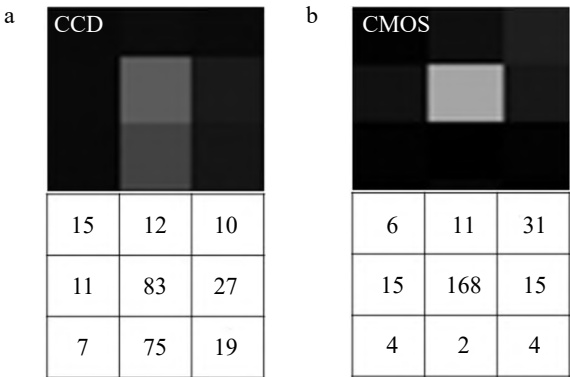


图 2 CCD 和 CMOS 光斑能量占比
Fig. 2 CCD and CMOS spot energy proportion

实验开始前对光路的能量衰减进行标定。在图 1 所示的实验装置基础上,在靶面位置处仅保留光电探测器的镜头,并在镜头的正后方放置功率计,开始到靶能量的标定。首先,不加衰减片,用两个功率计分别对光路的能量衰减进行标定,用到靶功率除以分光测得的功率再除以激光频率,得到光路的衰减比例关系 R_1 ;随后分别放入不同衰减片,测得经过单个衰减片光路的新的衰减比例关系 R_2 。 R_2/R_1 即为单个衰减片的衰减倍率。在实验过程中,加入不同的衰减片组合,分光镜测得的激光功率为 P , P 除以 R_1 再乘以衰减片的衰减倍率即为激光损伤探测器的实际到靶能量,实际到靶能量乘以中心像元的能量占比再除以单个像元面积即为激光能量密度。实验测得 CCD 和 CMOS 两种光电探测器的初始透过率分别为 0.000462 和 0.000522。

2 实验结果分析

本文中基于 CCD 和 CMOS 图像传感器的结构和

数据采集处理过程,对不同的干扰现象进行机理分析。提取干扰图像的饱和干扰像素数、有效干扰面积等信息,计算干扰前后图像的相关度,来研究激光作用脉冲数、作用环境对干扰效果的影响。

2.1 干扰机理分析

在激光干扰 CCD 和 CMOS 的过程中,出现了几种

典型的干扰现象,以大气环境中激光干扰 CCD 和 CMOS 探测器的干扰图像为例进行说明,其中曝光时间设置为 50 ms, CCD 和 CMOS 的干扰图像随激光能量密度的变化分别如图 3a 和图 3b 所示,每一横行分别代表激光脉冲数为 1、3 和 8 的干扰图像。可见 CCD 和 CMOS 的干扰面积随着激光能量密度的增大而增大。

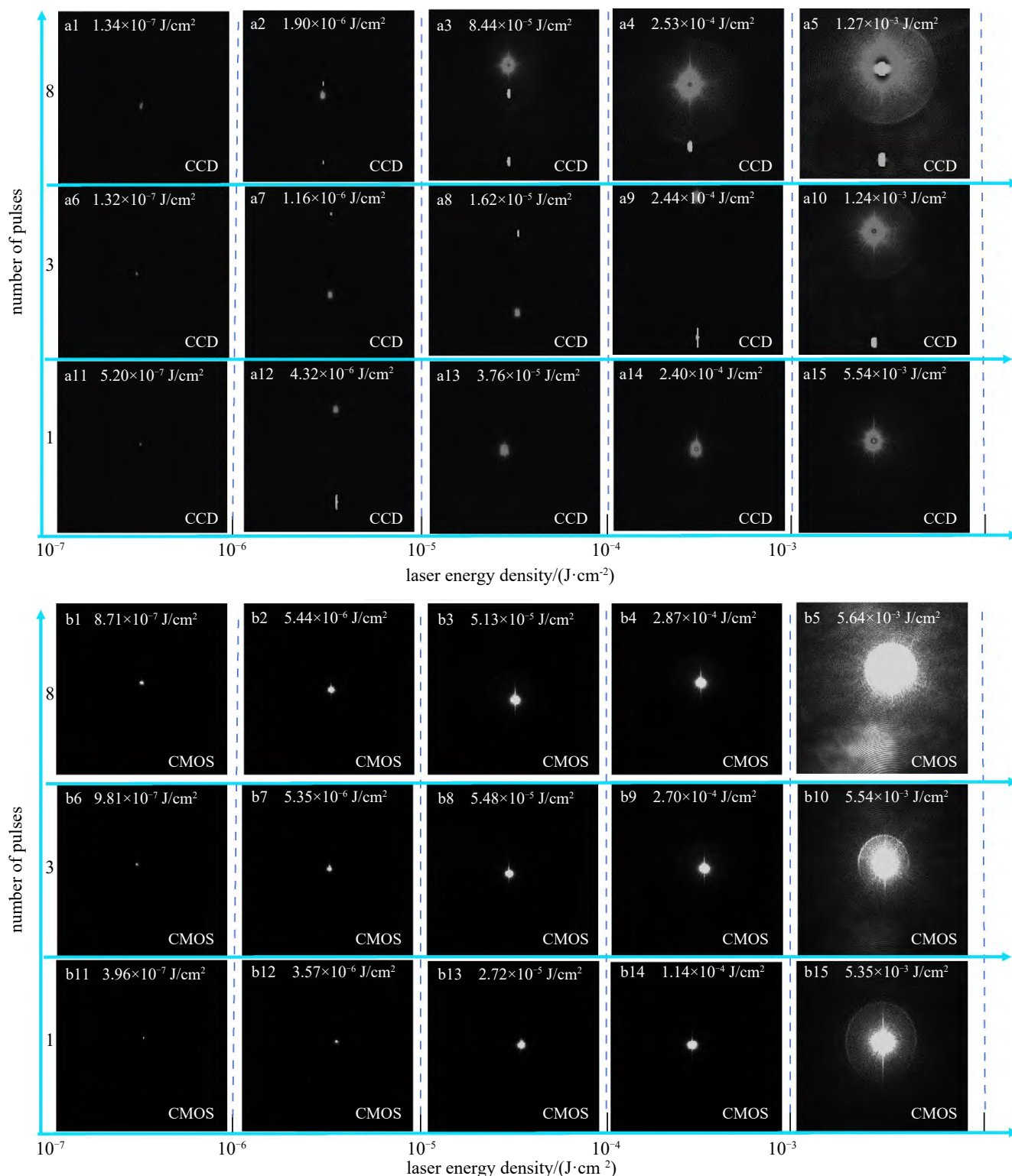


图 3 CCD 和 CMOS 的干扰图像

Fig. 3 Interference images of CCD and CMOS

由图3可以发现,在 10^{-7} J/cm²量级时,如图3a1、图3a6、图3a11及图3b1、图3b6、图3b11所示,CCD和CMOS均有几个像素发生饱和,呈现出白色亮斑;当继续增大激光能量密度至 10^{-6} J/cm²量级时,如图3a2、图3a7及图3a12所示,CCD中与激光光斑位于同一列中的像素也开始发生饱和,出现“饱和串音”现象,且激光作用的脉冲数越多,“饱和串音”现象越明显。CCD传感器的每个像元可以视作一个电容,其存储和处理电荷的能力有限。在强激光辐照下,光积分时间范围在几微秒到几百微秒,而光生载流子的生成时间极短,仅为 10^{-12} s量级,可能导致电子溢出,从而出现“饱和串音”现象。

而CMOS则没有出现“饱和串音”现象,这主要是因为其设计与CCD不同。CMOS传感器的每个像元集成了放大器和模拟数字转换(analog-to-digital, A/D)电路。当感光二极管接受激光时,产生的模拟电信号被放大并转换为数字信号,然后输出。这种集成结构减少了像元间的串扰,因此避免了“饱和串音”现象^[14]。

如图3a3所示,在 10^{-5} J/cm²量级时,8个脉冲作用下CCD的干扰图像中心出现“反饱和”现象。在1个和3个激光脉冲作用时,CCD图像(见图3a9和图3a14)则在 10^{-4} J/cm²量级时才出现“反饱和”现象。如图3b所示,CMOS的干扰图像在激光能量密度小于 10^{-3} J/cm²的范围内均未出现“反饱和”现象。在光斑覆盖的中心区域,灰度饱和后,像素的输出值会逐渐变小,最终稳定于一个固定小值,干扰图像呈现亮区中出现暗斑,随着激光能量密度增大,CCD反饱和像元面积增大。分析认为:强激光照射图像传感器时,过量的光生载流子会迅速释放光电二极管中的电荷,导致双采样中的两次信号逐渐相近,是形成像素“反饱和”的可能机制^[19]。

随着激光能量密度的增大,大量像元过度曝光使得图像中出现了白色亮斑,到 10^{-3} J/cm²量级时,光学系统对干扰效果产生了影响,如镜头的“光斑效应”,如图3a5、图3a10、图3a15及图3b5、图3b10、图3b15所示。复杂的光学结构引起激光在镜头内部多次反射、衍射和散射,以激光光斑为中心出现了多个同心圆环,更多的散斑出现在曝光区域周围,且在一定曝光时间内,激光作用脉冲数越多越容易出现散斑。分析认为:散斑应该是由杂散光所引起的,一部分的激光透过光学系统被偏转,其能量非常低,透过光学系统形成较为规则的散斑^[20]。

2.2 脉冲累积效应

基于CCD和CMOS的激光干扰图像,利用自编程序进行干扰图像的处理,提取干扰像素饱和数随激光能量密度的变化关系,来揭示脉冲数对干扰效果的

影响。绘制了大气环境中干扰饱和像素数随激光能量密度变化的双lg曲线,计算结果如图4所示。可见,在同样的曝光时间内,随着激光能量密度的增加,干扰饱和像素数的增长速率呈现随激光脉冲数的增加而增加的趋势,即在CCD和CMOS曝光时间一定的情况下,激光作用脉冲数的增加可以提升对CCD和CMOS的干扰效果。

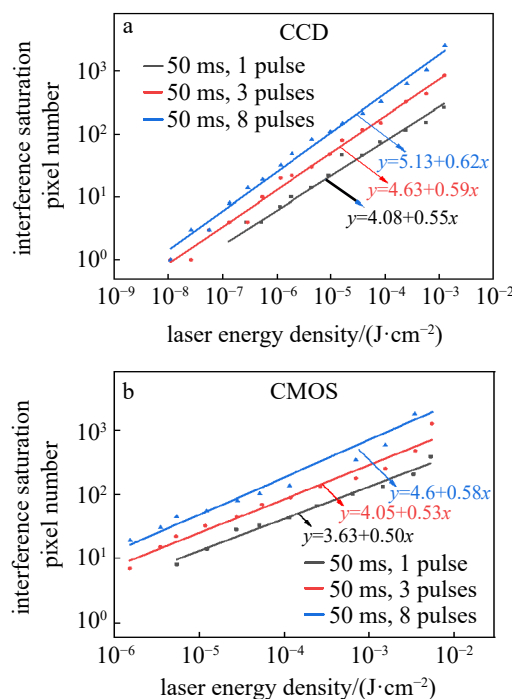


图4 不同曝光时间干扰饱和像素数随激光能量密度的关系

Fig. 4 Relationship between the number of saturated pixels affected by different exposure times and laser energy density

2.3 真空大气干扰效果对比

为了对比真空和大气环境下532 nm纳秒脉冲激光对CCD和CMOS的干扰效果差异,在两种环境下开展了对比实验研究。以单脉冲(脉冲数为1)激光干扰为例,设置CCD和CMOS曝光时间为50 ms,对干扰图像进行数据处理,计算干扰饱和像素数、有效干扰面积占比及图像相关度(structural similarity index measurement, SSIM)等指标,其中有效干扰面积为大于光斑灰度最大值 $1/e^2$ 的区域;图像相关度SSIM为干扰前后图像的相似性,越接近于1,代表图像越相似,干扰效果越不明显。为了更清晰地展示差异,横坐标使用激光能量密度以10为底的对数形式表示,计算结果如图5所示。

图5a~图5c和图5d~图5f分别为CCD和CMOS的真空及大气环境中的干扰效果对比图。在真空及大气环境中,干扰饱和像素数均随着激光能量密度的增加迅速上升,表示干扰效果增强;SSIM表示干扰前后图像的相似性,随着激光能量密度增大,SSIM呈下降趋势,激光能量密度越大,干扰前后图像差越大。由

图5可见,作用环境对于 CCD 和 CMOS 的 532 nm 纳秒脉冲激光干扰效果是不同的,CCD 在真空环境中的

干扰效果优于大气环境,而 CMOS 与之相反,大气环境中的干扰效果较真空环境更佳。

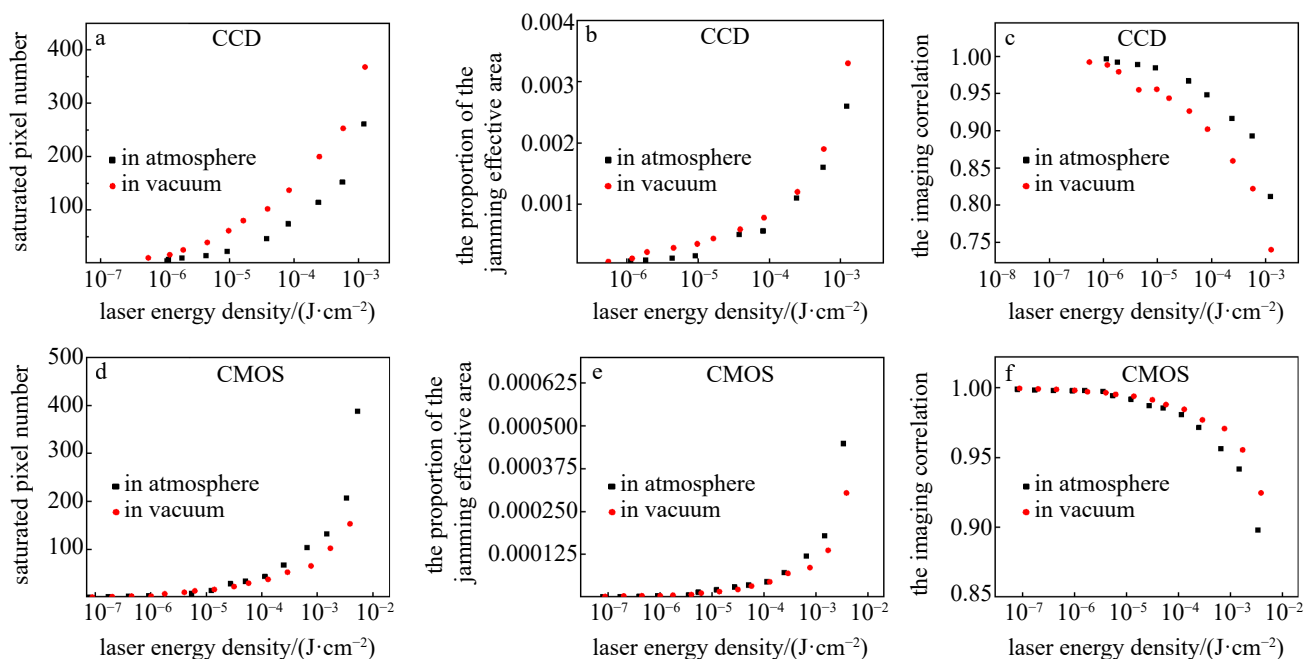


图5 真空大气环境下干扰效果对比

Fig. 5 Comparison of interference effects under vacuum and atmospheric environment

2.4 CCD 和 CMOS 对比

CCD 和 CMOS 作为比较常用的两种光电探测器,功能上有相似之处,有必要对 CCD 和 CMOS 的抗激光干扰能力进行对比,为实际应用过程中光电探测器的选择提供参考依据。因此,对比了曝光时间为 50 ms,在大气及真空条件下不同脉冲数激光干扰 CCD 和 CMOS 的干扰效果,CCD 和 CMOS 的

激光干扰饱和像素数随激光能量密度的变化关系如图6所示。可以发现,在相同条件下,黑色方点总在红色圆点上方,说明 532 nm 纳秒激光对 CCD 的干扰比对 CMOS 的干扰更强。因此,CMOS 相较于 CCD 对 532 nm 纳秒脉冲激光的抗干扰能力更强,这也与 SHAO 等人^[15]对 1.06 μm 激光干扰 CCD 和 CMOS 的研究结论一致。

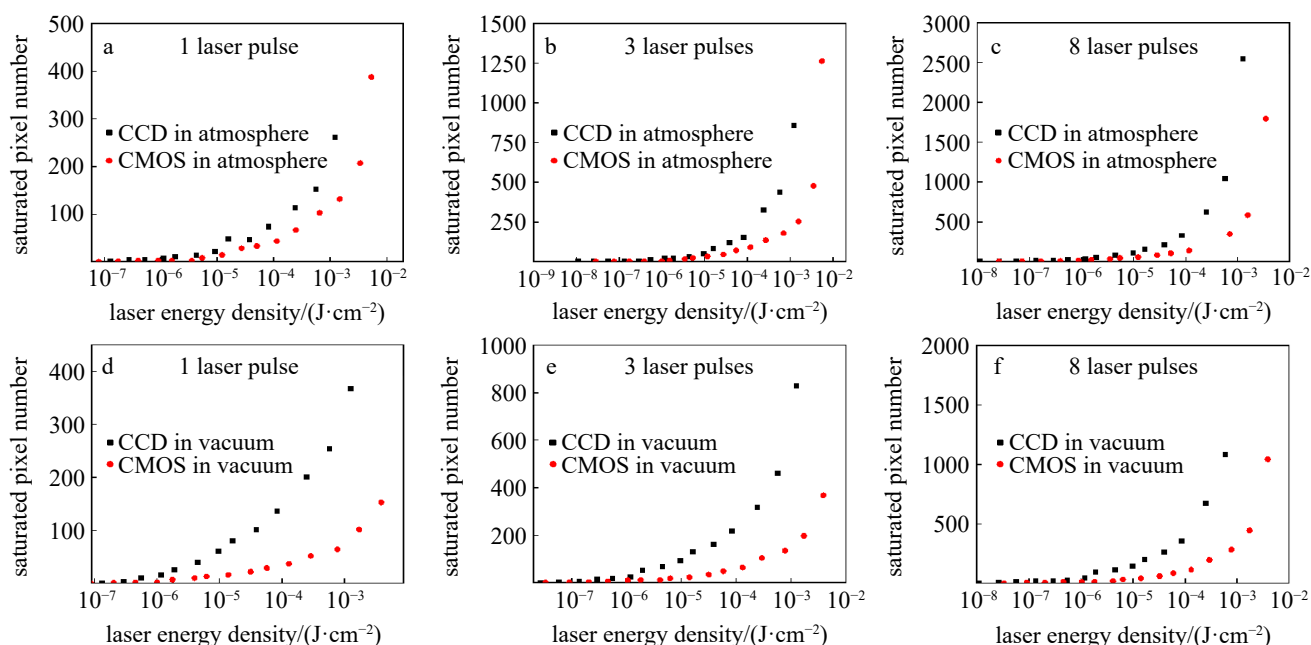


图6 CCD 和 CMOS 在真空及大气环境中的激光干扰效果对比

Fig. 6 Comparison of laser interference effects between CCD and CMOS in vacuum and atmosphere

3 结论

通过实验研究了在大气和真空环境下 532 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 和 CMOS 的辐照饱和效应,发现 CCD 和 CMOS 均发生了光学饱和现象,CCD 还出现了“反饱和”以及“饱和串音”现象,并对干扰现象的机理进行了分析。此外,通过处理干扰图像,计算激光能量密度与干扰饱和像素数、有效干扰面积占比及图像相关度的关系,对数据进行了对比,并确认了激光脉冲数对激光干扰效果的影响。

(a)在作用环境、激光能量密度及曝光时间相同的情况下,CCD 在真空环境中的干扰效果优于大气环境,而 CMOS 与之相反,大气环境中的干扰效果较真空环境更佳。

(b)在脉冲数、激光能量密度及曝光时间一致的情况下,CCD 在真空中的激光干扰效果优于大气中的;CMOS 在大气中的激光干扰效果优于真空中的。

(c)同等条件下,532 nm 纳秒激光对 CCD 的干扰效果大于对 CMOS 的干扰效果,即 CMOS 比 CCD 具有更好的抗 532 nm 纳秒激光干扰的能力。

参考文献

- [1] KNEZ D, HANNINEN A M, PRINCE R C, *et al.* Infrared chemical imaging through non-degenerate two-photon absorption in silicon-based cameras[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 1-10.
- [2] MEI L, KONG Z, MA T, *et al.* Applications of the Scheimpflug lidar technique in atmospheric remote sensing[C]//2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring). New York, USA: IEEE Press, 2019: 2198-2203.
- [3] WANG Zh, HE Y F, CAO X T, *et al.* Design of large area array CMOS of high speed electronics camera system based on FPGA[J]. *Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2): 173-178(in Chinese). 王征, 何云丰, 曹小涛, 等. 基于 FPGA 的大面阵 CMOS 相机高速率电子学系统设计[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(2): 173-178.
- [4] CHENG A F, WEAVER H A, CONARD S J, *et al.* Long-range reconnaissance imager on new horizons[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 140: 189-215.
- [5] STANISLAS M, ABDELSALAM D G, COUDERT S. CCD camera response to diffraction patterns simulating particle images[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4715-4723.
- [6] MALIN M C, BELL J F, CANTOR B A, *et al.* Context camera investigation on board the mars reconnaissance orbiter[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2007, 112(E5): E05S04.
- [7] KOHLER D, SCHINDLER G, HAHN L, *et al.* Biophotonic sensors with integrated Si₃N₄-organic hybrid (SiNOH) lasers for point-of-care diagnostics[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-12.
- [8] CHOI J W, SAHIN E, SOHN B U, *et al.* High spectro-temporal compression on a nonlinear CMOS-chip[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-15.
- [9] CHEN H. Toward unlimited temporal resolution: femtosecond videography for atomic and molecular dynamics[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(11): e17123.
- [10] VANNAHME C, DUFVA M, KRISTENSEN A. High frame rate multi-resonance imaging refractometry with distributed feedback dye laser sensor[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(2): e269.
- [11] 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.
- [12] ZHAO C, ZHOU J, SUN M, *et al.* Study on the mechanism of continuous laser damage to silicon-based CCD imaging structure[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2021, 12060: 156-161.
- [13] HAN M, WANG X, NIE J S, *et al.* Temporal evolution characteristics and damage threshold of CCD detector irradiated by 1.06 μm continuous laser[J]. *Optik*, 2018, 157: 1282-1291.
- [14] SHAO M, ZHANG L, ZHANG L L, *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). 邵铭, 张乐, 张雷雷, 等. 1.06 μm 激光对 CCD、CMOS 相机饱和和干扰效果对比研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 163-167.
- [15] SHAO J F, GUO J, WANG T F, *et al.* Experimental research on femto-second laser damaging array CCD cameras[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2013, 8796: 87960D.
- [16] ZHANG Y, NIU C, ZHAO S, *et al.* Investigation of interference on photodetector CCD by lasers with different wavelengths[J]. *Optik*, 2020, 202: 163660.
- [17] WANG K, LI P, YU X, *et al.* Experimental study on CMOS and materials irradiated by hundred-picosecond pulse laser with high repetition rate[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2020, 11544: 15-23.
- [18] 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.
- [19] SHENG L, ZHANG Zh, ZHANG J M, *et al.* Pixel upset effect and mechanism of CW laser irradiated CMOS camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0606004 (in Chinese). 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.
- [20] TANG W, WANG R, WANG T, *et al.* Outfield experiment of semiconductor laser jamming on color CCD camera[J]. *Optik*, 2018, 173: 185-192.