

猫眼回波图像随 CMOS 器件激光损伤变化的实验研究

雷 鹏 孙 可 李 化 聂劲松 孙晓泉

中国人民解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 成像系统中的 CMOS 探测器被激光损伤后,其猫眼回波会发生变化。对猫眼回波图像的变化进行了实验研究,发现随着用于损伤的激光功率增加,CMOS 器件的微透镜发生分解,直至最终消失,并使器件表面形成由遮光铝膜和光敏区构成的二维光栅,猫眼回波图像内的阵列光斑也经历了逐步消失又恢复的过程。以高斯随机表面模拟微透镜表面形貌,建模计算了猫眼回波图像随微透镜损伤程度的变化,计算结果与实验现象相符。

关键词 衍射;猫眼回波;探测器表面;二维光栅;激光损伤

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601001

Experimental Study on the Change of Cat Eye Echo Pattern with Laser Damage of CMOS Detector

Lei Peng Sun Ke Li Hua Nie Jinsong Sun Xiaoquan

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute of Chinese People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract After the CMOS detector in imaging system is damaged by laser, the corresponding cat eye echo will change. The changes of the cat eye echo are researched experimentally. With the increase of laser power for damage, the microlens of the CMOS detector decomposes gradually, and disappears at last. The surface of the detector turns into a two-dimensional grating composed of aluminum film and sensitive area in the end. The array spots in the cat eye echo-wave pattern goes through messy and then turns back arrays. The surface morphology of the damaged microlens is modeled by a Gaussian random surface in simulation, and the changes of the echo-wave pattern are calculated with the damage of the microlens. The theoretical results are consistent with the experimental phenomena.

Key words diffraction; cat eye echo; detector surface; two-dimensional grating; laser damage

OCIS codes 050.1950; 070.6120; 100.2960; 140.3490

1 引 言

光电成像系统广泛地应用于航空、航天、侦察与微光夜视等领域,然而其光电探测器又非常容易受到激光的干扰与损伤,严重影响其正常工作。因此,研究激光对探测器的辐照效应具有重要意义,相关领域的研究成果也非常丰富^[1-8]。激光辐照探测器使微透镜、遮光铝膜和基底出现损伤,引起探测器输出图像呈现损伤点、串线以及完全失效等现象^[1-5]。研究手段主要是利用光学显微镜或电镜扫描等获取微观损伤形貌,并结合损伤现象分析激光对探测器的辐照效应。已有的研究表明,被损伤探测器的输出图像与器件的损伤形貌具有一定的对应关系^[1-2]。而光电成像系统是典型的猫眼光学系统,其回波图像对焦平面反射物的变化非常敏感,如将探测器的损伤简化为不同形状的近点光阑孔径,回波图像就已经出现了明显地变化^[9]。因此,如果在实验研

收稿日期: 2015-12-21; **收到修改稿日期:** 2016-01-19

基金项目: 国家重点实验室基金(SKL2014ZR06)

作者简介: 雷 鹏(1987—),男,博士研究生,主要从事激光应用技术方面的研究。E-mail: leipeng0214@sina.com

导师简介: 孙晓泉(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光应用技术方面的研究。

E-mail: sun_xq@vip.163.com(通信联系人)

究激光损伤光电成像系统焦平面探测器的过程中,利用猫眼回波图像的变化分辨出器件微观结构损伤的状况,这将有利于控制实验的进程,便于更为细致地研究激光对探测器的作用机理。同时,研究建立回波图像的变化与焦平面器件表面激光损伤状态之间的对应关系,也为猫眼效应的其他应用提供了可能。

本文建立了利用 532 nm 激光的猫眼回波探测 1.06 μm 激光对焦平面器件损伤的实验系统,研究了探测器的损伤与回波图像变化的对应关系。随着激光功率的增加,回波图像中的光斑经历规则到散乱再回到规则的变化过程。建立了焦平面器件的猫眼回波理论模型,利用高斯随机表面表示微透镜在激光辐照下的形貌损伤,理论计算结果与实验现象具有较好的一致性。

2 实验结构

实验总体布局如图 1 所示。Nd:YAG 激光器输出 1.06 μm 连续激光作为主光束对猫眼光学系统焦平面上的 CMOS 进行损伤,CMOS 固定于五维移动平台上,便于调整器件的状态,激光器距离猫眼光学镜头 4 m。辅助照明光束采用 532 nm 激光便于观察回波图像,激光器距离猫眼光学镜头 20 m。主光束与辅助光束通过半透半反镜合束在同一光路上。观察回波图像的靶面同样距离猫眼光学镜头 20 m。主光束作用探测器时间由快门控制,时间为 1 s,作用停止后再采集辅助照明光束的回波图像。实验中,1.06 μm 激光的光束发散角大于 532 nm 激光,且 1.06 μm 激光的激光器到猫眼光学镜头的距离小于 532 nm 激光,因此,1.06 μm 激光在焦平面上的聚焦光斑大于 532 nm 激光。在前期实验准备中利用 1.06 μm 激光对硅片进行损伤,并通过水平、竖直方向移动硅片的位置,观察 532 nm 激光回波图像的变化,确定硅片的损伤区域并对 532 nm 激光进行调整,确保 532 nm 激光光斑处于 1.06 μm 激光光斑中心,方便后续研究回波图像与损伤形貌的对应关系。

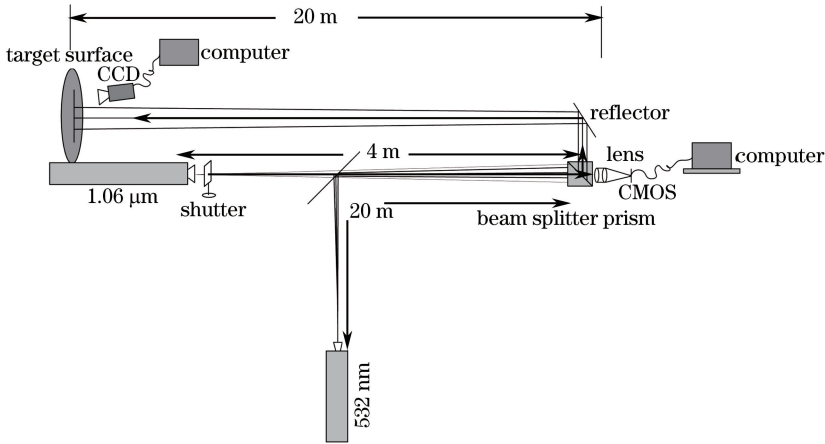


图 1 实验结构图

Fig. 1 Experimental structure

3 实验现象

图 2 中 A~D 所属位置表示在入瞳激光功率分别为 2.1, 2.2, 2.8, 3.4 W 条件下,探测器输出图像中出现的损伤现象。实验过程中 CMOS 器件位于镜头的焦平面上,对无穷远成像,因而在实验室条件下对近距离物体成像模糊。

CMOS 器件在不同功率激光辐照后的回波图像如图 3 所示。未受损伤的 CMOS 器件,其回波图像由像元阵列调制形成的阵列光斑和受封装玻璃影响形成的外围圆环组成。对于功率为 2.1 W 的激光产生的器件损伤,回波图像与器件未受损伤时相比并没有明显地变化。随着激光功率的增加,回波图像阵列光斑消失又重新恢复,但亮度增加。

探测器在光学显微镜下的微观形貌如图 4 所示。当激光功率为 2.1 W 时,器件形貌没有出现损伤,而随着激光功率的增加,微透镜覆盖面积逐渐减小,最终完全消失,形成由遮光铝膜和光敏区构成的二维光栅。同时,

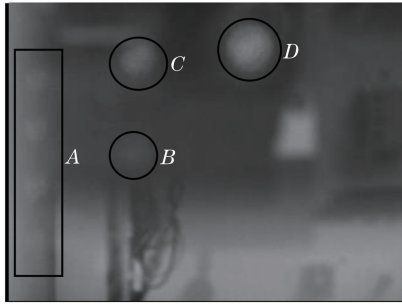


图 2 CMOS 不同激光功率辐照下输出图像中白斑损伤

Fig. 2 Damage spots of CMOS output image under different laser power irradiations

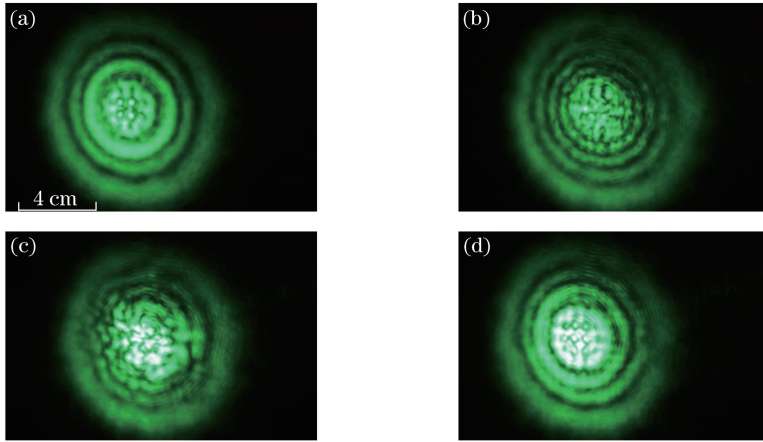


图 3 CMOS 在不同激光功率辐照下的猫眼回波。(a) 0 W; (b) 2.2 W; (c) 2.8 W; (d) 3.4 W

Fig. 3 Cat eye echo images of CMOS detector under different laser power irradiations.

(a) 0 W; (b) 2.2 W; (c) 2.8 W; (d) 3.4 W

对于图 4(b)~(c),将显微镜聚焦面在光轴方向上下轻微移动的过程中,遮光铝膜的形貌会发生微小的变化。

微透镜的作用是将器件表面的光尽可能会聚到光敏区,而光敏区对光的吸收较强。随着激光功率的增加,遮光铝膜的暴露面积逐渐增大,即更多的光照射到遮光铝膜上,而其对光的反射较强,因而图 3 中回波图像亮度增加。

激光辐照过后,探测器输出图像中被辐照区域出现白色亮斑,在有无外界光照条件下白色亮斑均没有明显变化,认为探测器的成像受到损伤。而根据图 4(d)中在微透镜完全消失的情况下光敏区表面没有明显损伤,认为是像元内部受到损伤产生了暗电流。激光无法对内部损伤进行探测,因此,在表面形貌没有改变时,图 2 中 2.1 W 激光辐照区的回波图像没有明显地变化。

微透镜材料为聚酰亚胺(PI),而激光对焦平面器件的辐照会使器件温度迅速升高,导致 PI 出现玻璃化消融以及化学分解^[10],此时遮光铝膜没有受到损伤。对于图 4(b)~(c)中,在光轴方向上下稍微移动聚焦平面,微透镜缝隙之间的遮光铝膜轮廓会出现变化,证明其表面还有 PI 物质残留并且由于微透镜的消融与分

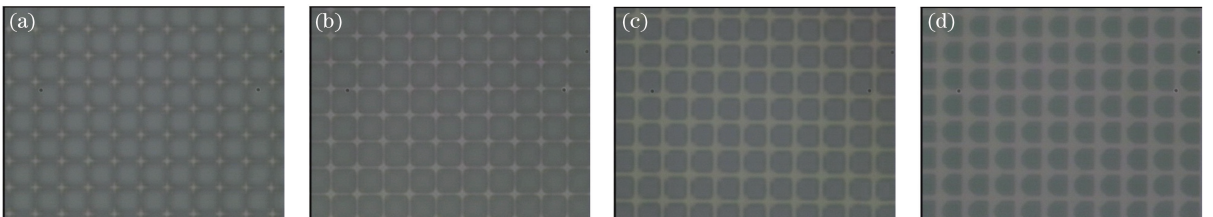


图 4 CMOS 在不同激光功率辐照下的微观形貌(放大 100 倍)。(a) 0 W; (b) 2.2 W; (c) 2.8 W; (d) 3.4 W

Fig. 4 Micro morphology of CMOS detector under different laser power irradiations (magnified 100 times).

(a) 0 W; (b) 2.2 W; (c) 2.8 W; (d) 3.4 W

解使其表面形貌不再平滑,不同位置到达遮光铝膜表面的光程差不一样。

4 理论建模与计算

将高斯光束通过猫眼系统的光学传输过程展开为 $4f$ 系统,如图 5 所示,系统前的光场 $u(x_0, y_0)$ 经过透镜后到达焦平面上为 $u_p(\xi, \eta)$,表示为

$$u_p(\xi, \eta) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \exp\left[\frac{ik}{2f}(\xi^2 + \eta^2)\right] \iint_{-\infty}^{+\infty} u(x_0, y_0) p(x_0, y_0) \exp\left[\frac{-i2\pi}{\lambda f}(\xi x_0 + \eta y_0)\right] dx_0 dy_0, \quad (1)$$

式中 λ 为入射波长(波数 $k = 2\pi/\lambda$), f 为透镜焦距, $p(x_0, y_0)$ 为透镜的孔径函数。

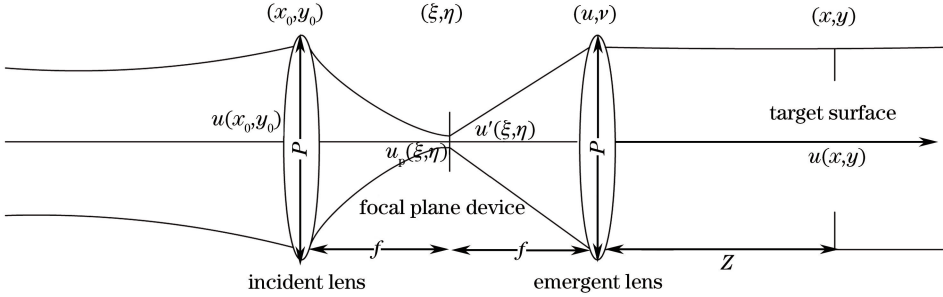


图 5 猫眼系统的光学传输等效图

Fig. 5 Optical equivalent picture of cat eye system

焦平面上的器件相当于光调制器,其透射率函数为 $t(\xi, \eta)$,光场透过焦平面后,经由一次菲涅耳衍射到达出射透镜表面,经过透镜变换后,再经过菲涅耳衍射到达观察平面,因此观察平面上的光场复振幅分布为

$$u(x, y) = -\frac{\exp[jk(z+f)]}{\lambda^2 z f} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right] \iint u_p(\xi, \eta) t(\xi, \eta) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda f}(\xi^2 + \eta^2)\right] d\xi d\eta \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-j2\pi\left[\left(\frac{x}{\lambda z} + \frac{\xi}{\lambda f}\right)u + \left(\frac{y}{\lambda z} + \frac{\eta}{\lambda f}\right)v\right]\right\} du dv, \quad (2)$$

式中 z 是观察平面到透镜的距离。令

$$h(x, y; \xi, \eta) = -\frac{\exp[jk(z+f)]}{\lambda^2 z f} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right] \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-j2\pi\left[\left(\frac{x}{\lambda z} + \frac{\xi}{\lambda f}\right)u + \left(\frac{y}{\lambda z} + \frac{\eta}{\lambda f}\right)v\right]\right\} du dv, \quad (3)$$

将积分前的常数项记为 C ,并记 $M = -\frac{z}{f}$, $\xi' = M\xi$ 和 $\eta' = M\eta$, 则

$$h(x, y; \xi, \eta) = C \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-\frac{j2\pi}{\lambda z}[(x - \xi')u + (y - \eta')v]\right\} du dv = h(x - \xi', y - \eta'). \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式,得到

$$u(x, y) = \frac{1}{M^2} \iint u_p\left(\frac{\xi'}{M}, \frac{\eta'}{M}\right) t\left(\frac{\eta'}{M}, \frac{\xi'}{M}\right) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}[(\xi')^2 + (\eta')^2]\right] h(x - \xi', y - \eta') d\xi' d\eta' = \left\{\frac{1}{M^2} u_p\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) t\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + (y)^2)\right]\right\} \otimes h(x, y), \quad (5)$$

(5)式即是光学镜头猫眼回波的解析传输公式。根据器件参数建立焦平面上的透射率函数模型,器件结构如图 6 所示。针对实验所用的 532 nm 探测激光,CMOS 器件的遮光铝膜网格具有高反射率(认为全反),而光敏层反射率较小,为 0.4^[11],二者构成了网格光栅,光栅周期在水平和垂直方向均为 6 μm,遮光铝膜宽度为 1 μm。微透镜距离光敏面 4 μm^[12],焦距为 8 μm,四周间隙为 0.4 μm。封装玻璃位于器件表面 1 mm 处,厚

为0.5 mm,从实验现象中得知回波图像具有外围圆环,可认为回波光束在封装玻璃处产生等倾干涉,因此,在计算中认为封装玻璃具有干涉性质。此外,实验中光学镜头焦距为 50 mm,对应 F 数为 4。

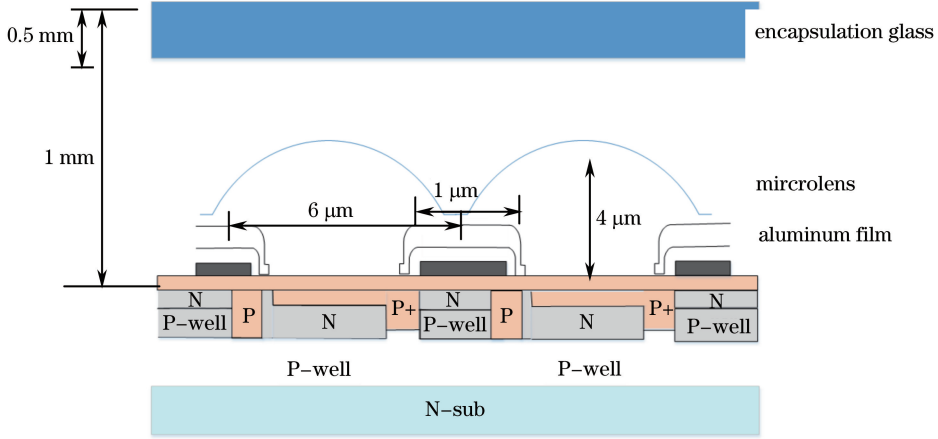


图 6 CMOS 器件结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of CMOS detector

通过对实验现象的认识与分析,实验过程可以描述为:随着激光功率的增加,微透镜表面出现形貌的起伏,同时其覆盖范围逐渐减小,最终微透镜完全消失。在此以高斯随机表面形貌模拟 PI 表面形貌的变化进行理论验证,即在微透镜表面附加随机相位的调制^[13],表示为

$$\phi(x, y) = \exp[-i4\pi h(x, y)/\lambda], \quad (6)$$

式中 $h(x, y)$ 即为随机表面的高度分布函数,具体描述为^[14]

$$h(x, y) = \frac{2\omega^2}{\xi\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(u_x, u_y) \exp\left[-2 \frac{(x - u_x)^2 + (y - u_y)^2}{\xi^2}\right] du_x du_y, \quad (7)$$

式中 $\eta(u_x, u_y)$ 是均值为 0 的白噪声; ω 是表面高度的均方差,表征随机表面的粗糙度; ξ 为表面的横向相关长度,表征颗粒的平均尺寸。高斯随机表面虽不能与微透镜表面形貌完全匹配,但是能说明表面形貌变化趋势与回波图像的改变这二者之间的关系。

激光功率增大,表面热梯度增大,PI 的分解越不均匀,形貌起伏也就越大,即 ω 增大而 ξ 减小。但微透镜的消融速度加快,在此认为微透镜表面整体轮廓呈等比例缩小。对应于图 4(a)~(d),设定相关数据如表 1 所示,以定性分析回波图像的变化规律。微透镜初始厚度为 4 μm ,半径为 8 μm ,认为未受损伤时表面光滑。计算结果如图 7 所示,与图 3 的实验现象具有较好的一致性。

表 1 微透镜形貌数据

Table 1 Morphology data of microlens

	Lens thickness / μm	ω / μm	ξ / μm
Data 1	4	0	∞
Data 2	3	0.05	6
Data 3	1	0.1	3
Data 4	0	0	∞

5 结 论

利用 532 nm 辅助激光的猫眼回波探测 1.06 μm 连续激光对 CMOS 探测器的损伤。在探测器出现白色亮斑由小到大变化的损伤过程中,1.06 μm 激光的辐照使微透镜发生玻璃化消融,产生化学分解并逐步向光敏区中心收缩,遮光铝膜暴露的面积逐渐增大。回波图像内阵列光斑逐渐消失,形成无序分布的光斑,外围圆环也受到影响,不再连续分布。当微透镜完全消失,在显微镜下能清晰看见遮光铝膜和光敏区的轮廓,回波图像也再次出现阵列光斑和外围圆环,且整体亮度增加。

建立了焦平面器件的猫眼回波理论模型,并以高斯随机表面模拟微透镜表面形貌的变化,计算了激光作

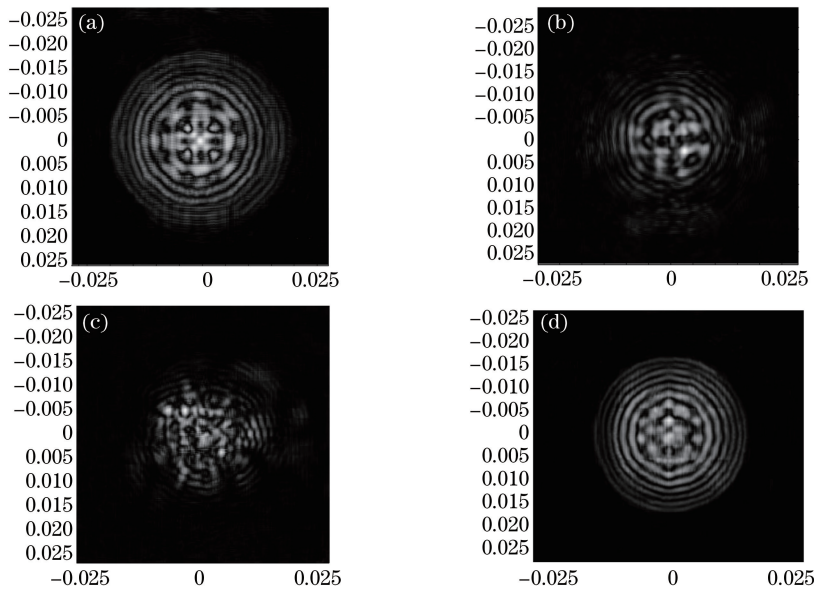


图 7 表 1 数据的回波仿真数值计算。(a) 数据 1; (b) 数据 2; (c) 数据 3; (d) 数据 4

Fig. 7 Numerical calculation of echo simulation based on table 1. (a) Data 1; (b) data 2; (c) data 3; (d) data 4

用下焦平面器件的回波图像。随着激光功率的增加,微透镜化学分解的速度加快,在向光敏区中心收缩的过程中表面形貌起伏加剧,当微透镜完全消失,遮光铝膜和光敏区构成二维光栅。理论计算的回波图像变化趋势与实验结果具有较好的一致性。

参 考 文 献

- 1 Hao Xiangnan, Li Hua, Nie Jinsong, *et al.*. Experiment of visible CCD damaged by laser operating in different state[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(9): 113-118.
郝向南, 李 化, 聂劲松, 等. 不同工作状态激光对可见光 CCD 的损伤实验[J]. 光电工程, 2012, 39(9): 113-118.
- 2 Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui, *et al.*. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214006.
邱冬冬, 张 震, 王 睿, 等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214006.
- 3 Shen Hongbin, Shen Xueju, Zhou Bing, *et al.*. Experimental study of 532 nm pulsed laser irradiating CCD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1449-1454.
沈洪斌, 沈学举, 周 冰, 等. 532 nm 脉冲激光辐照 CCD 实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1449-1454.
- 4 Lei Peng, Li Hua, Bian Jintian, *et al.*. Experimental study of HgCdTe imaging sensor irradiated by TEA-CO₂ laser[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0214002.
雷 鹏, 李 化, 卞进田, 等. TEA-CO₂ 激光辐照 HgCdTe 图像传感器的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0214002.
- 5 Wang Dong, Zhang Hengwei, Qin Xiaohu, *et al.*. Experimental study on jamming and damage thresholds of polycrystalline silicon detector irradiated by CO₂ laser[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(3): 475-479.
王 东, 张恒伟, 覃小虎, 等. 连续波 CO₂ 激光对多晶硅探测器干扰损伤实验研究[J]. 应用光学, 2015, 36(3): 475-479.
- 6 Nie Jinsong, Wang Xi, Li Hua, *et al.*. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by 1.06 μm laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(s2): 380-386.
聂劲松, 王 玺, 李 化, 等. 1.06 μm 激光辐照 CCD 探测器的热力效应分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(s2): 380-386.
- 7 Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1057-1061.
段晓峰, 牛燕雄, 张 维. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1057-1061.
- 8 Zhang C, Blarre L, Walsler R M, *et al.*. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled

- imaging sensors[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(27): 5201-5210.
- 9 Zhao Y, Sun H, Gu S, *et al.*. Surface damage effect detection of sensor in optical lens based on cat-eye effect[C]. *SPIE*, 2010, 7544: 75444O.
- 10 Jiang Nan, Zhang Chu, Niu Yanxiong, *et al.*. Numerical simulation of pulsed laser induced damage on CCD arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1004-1007.
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.
- 11 Yang Hongdao. Micro/nano-structure on silicon surface by pulse laser[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2011: 50-51.
杨宏道. 脉冲激光在硅表面制备微纳结构的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2011: 50-51.
- 12 Ke Caijun. Research on design, fabrication of microlens array and integration between microlens arrays and CCD image sensors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005: 96-97.
柯才军. 微透镜阵列的设计、制作及与 CCD 的集成技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 96-97.
- 13 Cheng Chuanfu, Teng Shuyun, Song Hongsheng, *et al.*. Phase singularities of speckle field produced by the scattering from Gaussian correlation random surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(8): 5376-5384.
程传福, 滕树云, 宋洪胜, 等. 高斯相关随机表面光散射散斑场相位奇异及其特性的理论研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(8): 5376-5384.
- 14 Wang Bin. Study on theory and application of laser speckle field singularities[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 25.
王斌. 激光散斑场相位奇异理论及应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 25.