

CCD 损伤进程中光学成像系统猫眼回波特性的研究

陈世杰, 牛春晖, 李晓英, 吕 勇

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 建立了 CCD 损伤进程中光学成像系统猫眼回波探测系统, 记录了 CCD 损伤进程中光学成像系统猫眼回波功率与猫眼回波偏振度数据并绘制了变化曲线, 分析了猫眼回波特性的变化机理、CCD 损伤状态与猫眼回波功率、偏振度变化之间的联系, 研究得出: 光学成像系统 CCD 探测器件受脉冲激光辐照产生点损伤、线损伤至全靶面损伤进程中, 猫眼回波功率、偏振度变化与 CCD 损伤状态变化没有良好的相关性, 提高损伤激光能量使 CCD 受到首个脉冲辐照时完全损伤, 在 0~8 个脉冲损伤进程中, 猫眼回波功率与偏振度先增大后减小, 再增大最后不断减小, 可以此规律对 CCD 是否完全损伤进行判断。

关键词: 猫眼回波; 功率; 偏振度; 粗糙度

中图分类号: TN201; O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200425

Cat eye echo characteristics of optical imaging system in CCD damage process

Chen Shijie, Niu Chunhui, Li Xiaoying, Lv Yong

(School of Instrument Science and Opto Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The cat eye echo detection system of optical imaging system in the process of CCD damage was established. The data of cat eye echo power and degree of polarization of optical imaging system during CCD damage process were recorded and the curve of change was drawn. The change mechanism of cat eye echo characteristics, the relationship between CCD damage state and the change of cat eye echo power and degree of polarization were analyzed. The results show that there is no good correlation between the change of cat eye echo power and degree of polarization and the change of CCD damage state during the process of point damage, line damage and full target damage of CCD detector in optical imaging system by pulsed laser irradiation. The CCD is completely damaged when the first pulse is irradiated by increasing the damage laser energy. In the 0-8 pulse damage process, the cat eye echo power and degree of polarization increase first, then decrease, then increase and finally decrease, which can be used to judge whether CCD is completely damaged.

Key words: cat eye echo; power; degree of polarization; roughness

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2021-02-19

作者简介: 陈世杰, 男, 硕士生, 主要研究方向为光电对抗技术。

导师简介: 牛春晖, 男, 教授, 博士, 主演研究方向为光电对抗及光电功能材料。

0 引言

利用光电目标的“猫眼效应”进行主动光电探测已在光电对抗领域得到广泛应用^[1]。当激光照射光电系统时,由于“猫眼效应”的存在使得猫眼目标反射的回波强度要明显高于普通漫反射物体,因此,可以利用该效应对光电目标进行扫描侦察和识别,以获得目标的位置、速度等信息^[2]。张明鑫等人在 2019 年研究得出使用连续激光对 CCD 进行损伤,光学成像系统猫眼回波峰值功率随 CCD 损伤程度的加深呈现先显著上升再迅速下降的规律^[3]。随着 CCD 技术和探测技术的发展,针对目标与背景的光学散射特性的研究被广泛地应用到目标识别和计算机图形学等领域^[4]。偏振是光的固有属性,当光与物质发生相互作用后,通过解构偏振态变化,可以获取材料组成和结构的重要信息^[5],而激光具有良好的偏振性,由于探测器损伤前后材料表面粗糙度不同引起猫眼回波偏振度变化,因此,可通过被探测目标回波信号偏振度判断其探测器表面的损伤程度。

文中通过建立 CCD 损伤进程中光学成像系统猫眼回波探测实验系统,通过电脑端输出的 CCD 接收的图像判断 CCD 损伤状态;记录 CCD 损伤进程中光学成像系统猫眼回波功率、偏振度等数据并绘制分析数据变化曲线;采集 CCD 不同损伤状态下损伤处表面形貌的显微图像与轮廓图,以光学成像系统猫眼回波功率表达式与偏振双向反射分布函数为理论基础分析猫眼回波特性的变化机理,验证了实验结果与理论分析一致;通过电脑端输出图像与光学成像系统猫眼回波功率与偏振度数据分析了 CCD 损伤状态与猫眼回波功率、偏振度变化之间的联系。

1 实验系统

实验使用 1064 nm 脉冲激光器为损伤光源,设置脉冲激光脉宽为 10 ns,频率为 1 Hz,实验时激光通过各透镜后对 CCD 进行损伤,使用电脑连接 CCD 观察成像情况,判断 CCD 的损伤状态;然后使用 CNI 公司型号为 MRL-III-671 的连续激光器输出探测激光,其最大输出功率为 200 mW,光束发散角小于 1.5 mrad,其出射激光的偏振度为 0.996,可视为线偏

振光,探测激光经各透镜后辐照至 CCD 损伤处(为使探测激光和损伤激光能够落在猫眼目标表面同一点,搭建光路时通过调节近处与远处损伤激光与探测激光光斑中心位置重合的方法使两光束共轴),基于猫眼效应,辐照至 CCD 损伤处的部分探测激光会发生反射产生猫眼回波,猫眼回波经过各透镜后入射至光电探头,通过光功率计测得猫眼回波功率的数值,采用旋转波片法测量偏振度,详细步骤参考文献 [6]。探测光信号强度使用的光电探头采用 Thorlabs 公司的 S121C 型号探头,可探测波长范围 400~1100 nm,功率计选择 PM100D 系列功率计,功率范围从皮瓦到几百瓦。

实验采用型号为 ICX633BKAA 的 CCD 芯片,结构分为微透镜层、遮光铝膜层、多晶硅电极、SiO₂ 绝缘层与硅基底等。当 1064 nm 脉冲激光损伤 CCD 时,CCD 结构的损伤顺序依次为微透镜层、遮光铝膜层、SiO₂ 绝缘层、硅基底层。为了达到更好的实验效果,实验时去除了 CCD 芯片的封装玻璃。

2 实验现象与分析

2.1 CCD 未损伤至全靶面损伤进程实验及分析

2.1.1 实验数据整体分析

实验中通过调节 1064 nm 脉冲激光器电压与衰减片对损伤激光能量进行控制,使损伤激光能量密度为 41.355 mJ/cm²,通过电脑端输出的 CCD 接收的图像观察 CCD 成像情况,以 CCD 成像情况判断 CCD 损伤状态,CCD 点损伤、线损伤及全靶面损伤时成像图片如图 1 所示。

做了多组实验,对 CCD 不同损伤状态下光学成像系统猫眼回波功率与偏振度的数据进行记录,绘制变化曲线,如图 2 所示。

由图 2(a)、(b)可以看出四组实验对应 CCD 损伤状态变化规律相同,但相对应的猫眼回波功率与偏振度变化趋势有所差异,呈现不同的变化趋势,因此,猫眼回波功率、偏振度的变化趋势与 CCD 未损伤至全靶面损伤状态变化规律没有良好的相关性;由图 2 分析可得 CCD 受脉冲激光辐照未损伤至全靶面损伤进程中不能以猫眼回波功率与偏振度变化规律作为损伤状态的判断依据。

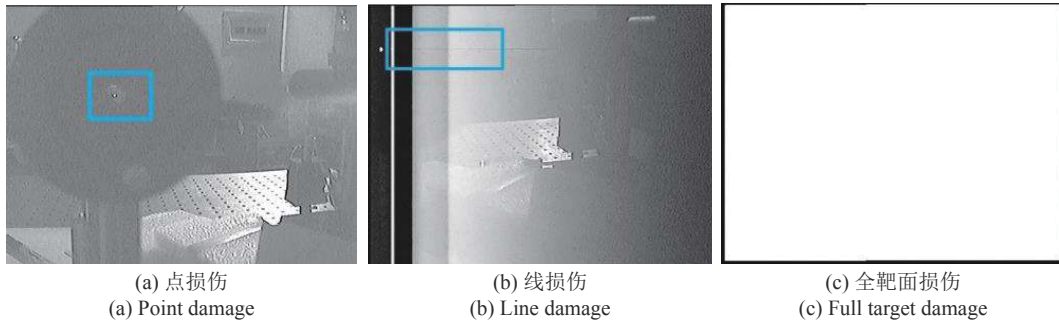


图 1 CCD 点损伤、线损伤及全靶面损伤成像图片

Fig.1 CCD point damage, line damage, full target damage imaging images

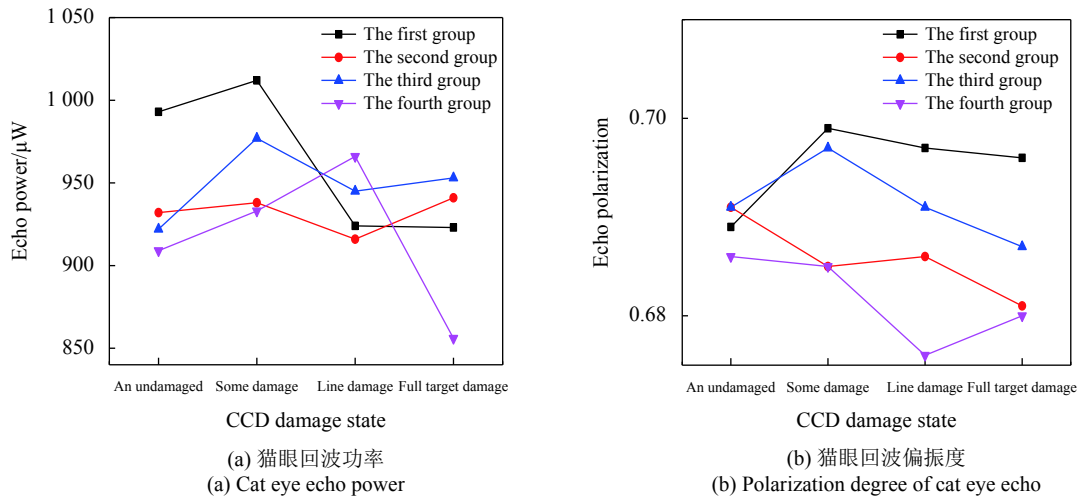


图 2 CCD 不同损伤状态下猫眼回波功率与偏振度变化曲线

Fig.2 Change curve of cat eye echo power and degree of polarization under different CCD damage states

2.1.2 猫眼回波功率分析

光线照射漫反射目标时反射光较弱,然而当光线照射目标发生“猫眼”效应时,反射光会按照原路返回^[7]。设激光器发射功率为 P_0 , 经过距离为 z 的大气传输后照射目标,只考虑大气衰减对激光传输的影响,“猫眼”回波由一个探测器接收,探测器所接收的光功率可表示为^[8]:

$$P = \frac{16A_m A_d \tau_m^2 \tau_a^2 P_0 \tau_d \rho}{\pi^2 \theta_i^2 \theta_r^2 z^4} \quad (1)$$

式中: A_m 为目标的接收面积; A_d 为接收系统的孔径面积; τ_m 为目标系统的透过率; τ_a 为空气透过率; τ_d 为探测系统的透过率; ρ 为光敏面反射率; θ_i 为激光发散角; θ_r 为反射光发散角; z 为激光器与猫眼目标间的距离。结合文中光学成像系统猫眼回波探测实验系统,实验过程中猫眼目标受激光辐照后损伤处材料与材

料表面形貌发生变化,材料不同,其表面反射率不同,材料表面形貌发生变化,其粗糙度改变,由参考文献^[9]可知材料表面粗糙度(目标表面粗糙度参数为面均方根高度,均方根(root mean square, RMS)高度与粗糙度成正比关系)越大,材料对入射光的吸收率越高,其反射率越低^[10],而其他参数不变,所以由公式(1)可知文中实验中探测目标的猫眼回波功率 P 仅与光敏面的反射率 ρ 有关,且二者之间成正比关系。

为进一步研究 CCD 未损伤至全靶面损伤损伤进程中猫眼回波功率变化趋势不同的原因,使用 Olympus 公司生产的型号为 DSX110 光学数码显微镜,以 600 倍放大率采集各损伤状态下损伤处显微图像,CCD 像元大小为 $10 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$,如图 3(a)~(c)所示,CCD 在产生点损伤、线损伤与全靶面损伤时损伤处微透镜层颜色发生改变,表面形貌无明显变化,使用

ZYGO 公司型号为 ZGPH3X02-1Z-03V, 垂直精度为 0.15 nm 的白光干涉仪采集两组 CCD 产生点损伤至全靶面损伤进程中 CCD 损伤处的表面轮廓图, 其中一组图像如图 3(d)~(f) 所示, 其损伤处材料表面均方根高度如表 1 所示。由图 3(a)~(c) 可知: CCD 产生点

损伤至全靶面损伤进程中损伤至微透镜层, 所以损伤处材料不变, 由表 1 可得两组实验 CCD 损伤处粗糙度变化趋势不同, 由此可得 CCD 在未损伤至全靶面损伤的损伤进程中, 猫眼回波功率变化趋势是由微透镜粗糙度变化无固定规律造成的。

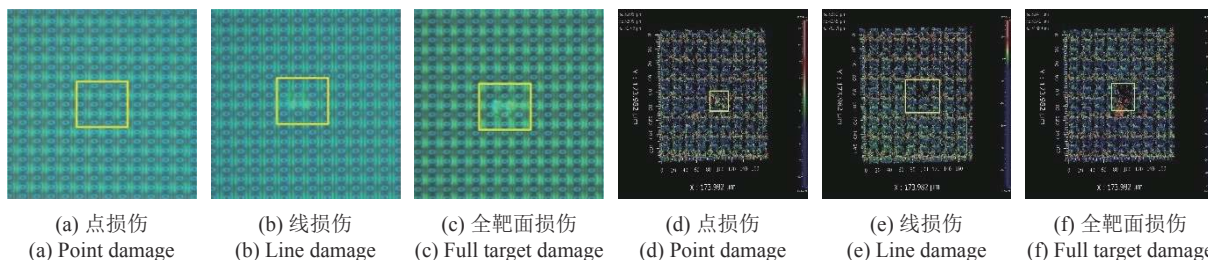


图 3 不同损伤状态损伤处显微图像 (a)~(c) 与轮廓图 (d)~(e)

Fig.3 Microscopic images (a)-(c) and contour images (d)-(e) of damage sites under different damage states

表 1 材料表面均方根高度测量结果

Tab.1 RMS height measurement results of material surface

RMS height $S_q/\mu\text{m}$	Point damage	Line damage	Full target damage
The first group	4.132	3.919	4.006
The second group	3.895	4.036	3.940

2.1.3 猫眼回波偏振度分析

材料目标表面散射偏振特性与入射角、探测角、折射率、表面粗糙度等参数有关^[9]。实验系统一样, 影响猫眼目标猫眼回波偏振度的因素为材料折射率与表面粗糙度。基于微面元理论, 结合 Jones 矩阵与 Mueller 矩阵相互转换, 可得偏振双向反射分布函数的表达式为:

$$f_{j,k}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)\cos(\theta_r)} \times M_{j,k}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \quad (2)$$

式中: σ 为目标表面的粗糙度参数; 由半球定向反射理论可得, 光波入射到猫眼目标表面后按照原路返回的光波积分运算为:

$$\rho_{HDR}^T(\theta_i) = \int_0^{2\pi} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f(\theta_i, \theta_r, \Delta\varphi) \cos(\theta_r) \sin(\theta_r) d(\theta_r) d(\Delta\varphi) \quad (3)$$

以 Mueller 矩阵建立入射光 Stokes 向量与目标表面散射光 Stokes 向量之间的数学关系, 当线偏振光入

射目标表面时, 线偏振光在目标表面散射回波的 Stokes 向量为:

$$S^r = \rho_{HDR}^T \cdot S^i \quad (4)$$

式中: S^i 为线偏振光的 Stokes 向量; 因此得到线偏振光入射目标表面其回波散射的偏振度表达式为:

$$DOP = \frac{\sqrt{((S_1^r)^2 + (S_2^r)^2 + (S_3^r)^2)}}{S_0^r} \quad (5)$$

使用 matlab 仿真可得不同材料猫眼目标回波偏振度与目标表面粗糙度的关系曲线如图 4 所示, 猫眼目标材料表面粗糙度越大, 猫眼回波偏振度越小, 且相同粗糙度时, 猫眼回波偏振度由高到底为 Al、树脂 (Resin)、Si。

由上文可知 CCD 损伤进程中损伤处材料不变, 材料表面粗糙度变化无固定趋势, 由图 4 可得相同材料其表面粗糙度与猫眼回波偏振度成反比, 所以 CCD 在未损伤、点损伤、线损伤与全靶面损伤损伤进程中猫眼回波偏振度变化趋势不同是 CCD 损伤进程中损伤处微透镜粗糙度变化无固定规律造成的。

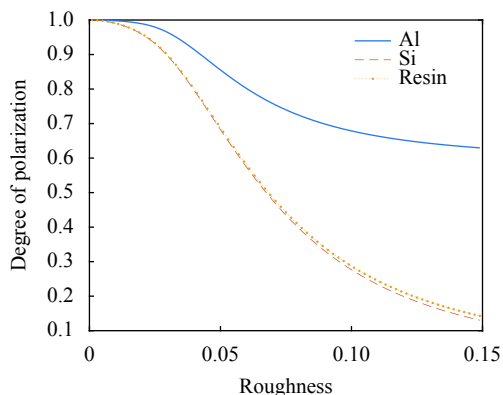
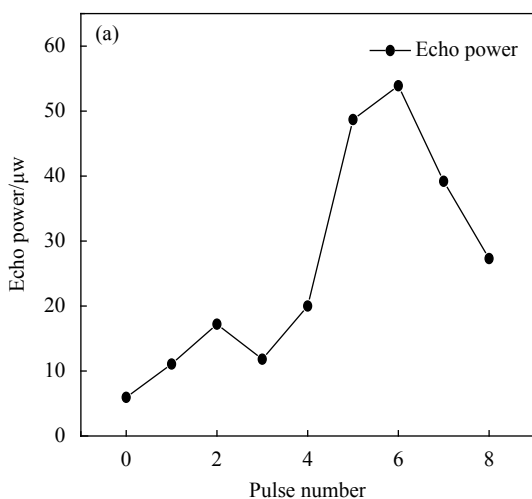


图 4 不同材料“猫眼”目标回波散射偏振度与目标表面粗糙度的关系曲线

Fig.4 Relation curves between the polarization degree of echo scattering and the surface roughness of target for cat's eye of different materials



2.2 CCD 完全损伤时实验及分析

2.2.1 实验数据整体分析

实际光电对抗中多采用高于目标损伤阈值的高能量重频脉冲激光对目标进行多脉冲损伤, 结合实际应用, 实验中调节损伤激光能量使 CCD 受到首个激光脉冲辐照后达到完全损伤的效果, 对 CCD 不同位置依次进行 0~8 个脉冲辐照损伤, 不断加深 CCD 器件的损伤状态, 分别记录光学成像系统 CCD 探测器件受 0~8 个脉冲辐照过程中光学成像系统猫眼回波功率与偏振度数据, 进行多组实验, 分析实验数据, 如图 5 所示: CCD 芯片受激光辐照 0~8 个脉冲损伤进程中, 光学成像系统猫眼回波功率与偏振度呈现先增大后减小, 再增大最后不断减小的变化规律。

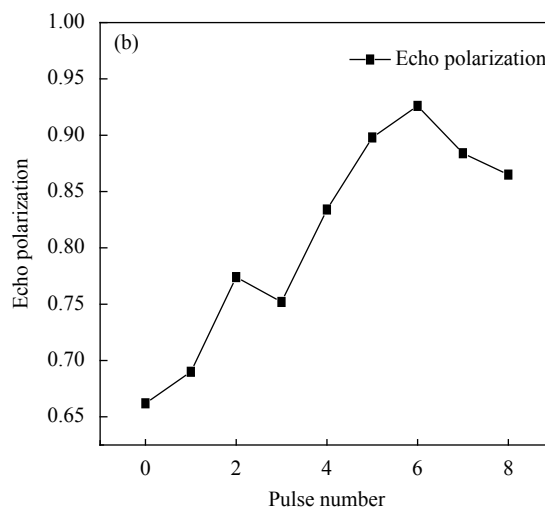


图 5 猫眼回波功率 (a) 与偏振度 (b) 随脉冲数变化

Fig.5 Cat eye echo power (a) and degree of polarization (b) vary with the number of pulses

2.2.2 猫眼回波功率与偏振度分析

采集 CCD 受激光辐射 0~8 个脉冲损伤进程中部分损伤处表面形貌图像, 如图 6 所示, 采集 CCD 损伤处表面轮廓图像, 整理测量所得材料表面均方根高度数据, 如表 2 所示。

光学成像系统猫眼回波功率与偏振度受 CCD 损伤处材料与表面粗糙度影响。在激光辐照 0~8 个脉冲损伤进程中, 如图 6(b) 所示, CCD 首先被损伤至遮光铝膜层, 其损伤处显露出被熔融的微透镜所覆盖的金属网状结构, 随激光辐照脉冲数增加, 熔融的微透镜逐渐消失, 裸露出遮光铝膜, 且如表 2 所示, 材料表

面粗糙度减小, 因此, 光学成像系统猫眼回波功率、偏振度增加; 当激光辐照三个脉冲时, 如图 6(c) 所示, 损伤处少部分单一网格处遮光铝膜呈熔融态, 材料表面粗糙度显著增加, 如表 2 所示, 所以猫眼回波功率、偏振度有所减小; 激光辐照脉冲个数继续增加, 如图 6(d) 所示, 损伤处熔融态金属铝范围不断扩大, 且其表面均方根高度变化不断减小, 如表 2 所示, 其粗糙度不断减小, 猫眼回波功率、偏振度不断增大; 当激光辐照六个脉冲时, 如图 6(e) 所示, CCD 损伤处中心位置出现黑洞, 此时 CCD 损伤至硅基底, 材料硅对 671 nm 激光反射率仅为 0.3, 远小于金属铝, 且材料表面均方

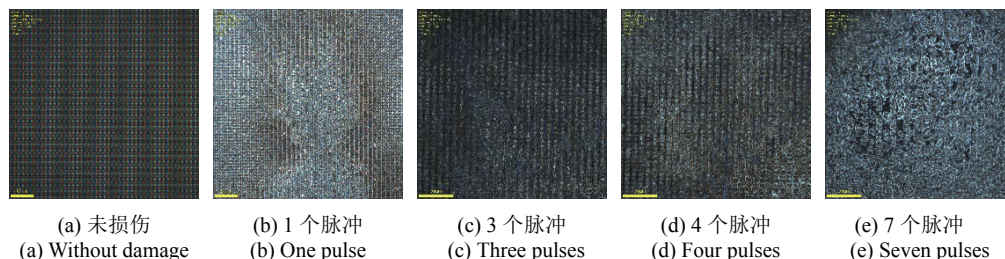


图 6 不同损伤处表面形貌

Fig.6 Surface morphology of different damage sites

表 2 材料表面均方根高度测量结果

Tab.2 Root mean square height measurement results of material surface

Item	Pulse number									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
RMS height $S_q/\mu\text{m}$	4.135	0.012	0.007	0.491	0.440	0.370	0.352	0.516	0.650	

根高度不断增大,粗糙度不断增大,所以猫眼回波功率、偏振度不断减小。

3 结论

文中搭建了光学成像系统 CCD 探测器件受激光辐照损伤进程中猫眼回波探测系统,分析了 CCD 损伤进程中光学成像系统猫眼回波功率与猫眼回波偏振度的数据变化曲线,总结建立了 CCD 完全损伤时其损伤程度与光学成像系统猫眼回波功率、偏振度变化之间的联系,验证了实验结果与理论分析结论的一致性。结果表明: CCD 受脉冲激光辐照产生点损伤至全靶面损伤进程中,光学成像系统猫眼回波功率及偏振度变化趋势与 CCD 损伤状态变化没有良好的相关性;提高损伤激光能量使 CCD 受到首个激光脉冲辐照时完全损伤,随激光辐照脉冲数增加,光学成像系统猫眼回波功率与偏振度呈现先增大后减小,再增大最后不断减小的变化规律,可以此判断 CCD 是否完全损伤,该结论在光电对抗领域具有重要意义。

参考文献:

[1] Liu Yang, Xia Runqiu, Lv Yong. Effectiveness evaluation system for anti cat's eye detection technology using optoelectronic target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1033-1038. (in Chinese)

[2] Yang Mingyu. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 255-262. (in Chinese)

[3] Zhang Mingxin, Nie Jinsong, Sun Ke, et al. Experimental study on laser cat eye echo of optical imaging system during CCD damage [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0314003. (in Chinese)

[4] Zhang Chi, Wu Xin, Xie Jian. Infrared polarization characteristics on sea surface based on bidirectional reflection distribution function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1303-1313. (in Chinese)

[5] Guo Zhongyi, Kang Qianlong, Peng Zhiyong, et al. Progress of polarization-information detection technology based on manipulations of metasurface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20201041. (in Chinese)

[6] Yin Yafang, Fang Qiang, Liu Yu. Study on the measurement methods of degree of polarization [J]. *Research on Optical Communications*, 2005(4): 68-70. (in Chinese)

[7] Han Min, Wang Xi, Nie Jinsong, et al. Temporal evolution characteristics and damage threshold of CCD detector irradiated by 1.06 μm continuous laser [J]. *Optik*, 2018, 157: 1282-1291.

[8] He Ting, Niu Yanxiong, Zhang Peng, et al. Original analysis and influence of the focal shift on the retro-reflected power of cat's eye effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2956-2960. (in Chinese)

[9] Yang Min, Fang Yonghua, Wu Jun, et al. Multiple-component polarized bidirectional reflectance distribution function model for painted surfaces based on Kubelka-Munk theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0126002. (in Chinese)

[10] Niu Chunhui, Zhu Ting, Lv Yong. Influence of surface morphology on absorptivity of light-absorbing materials [J]. *International Journal of Photoenergy*, 2019, 2019: 1476217.