

光电探测器表面损伤状态偏振成像式探测系统

胡玮娜¹, 吕 勇¹, 耿 蕊¹, 李宇海², 牛春晖¹

- (1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;
2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要: 针对在外场实现探测器损伤状态实时探测的需求, 研发了光电探测器表面损伤状态偏振成像式探测系统。理论推导了“猫眼”目标回波偏振特性参数 DP 和回波偏振度 DOP 的表达式, 利用 MATLAB 软件仿真绘制了表面粗糙度、回波偏振度以及偏振特性的关系曲线; 设计了一套同时偏振成像光学系统, 开展了 671 nm 连续激光对电荷耦合器件 (CCD) 表面损伤状态的实时探测外场实验, 编制了基于 MATLAB GUI 的回波图像可视化实时采集系统, 得到了回波图像强度、偏振特性以及光斑尺寸等信息; 通过光学显微镜和白光干涉仪对探测器表面损伤处和未损伤处形貌图像分析, 发现探测器损伤表面可见硅基底且粗糙度参数 Sq 值较大; 结果表明, 仿真结果与实验测试结果具有良好一致性。光电探测器被损伤后, 其表面粗糙度增大, 回波偏振特性参数 DP 减小, 退偏特性明显, 偏振度 DOP 减小。偏振成像技术可有效对光电探测器表面损伤状态进行实时探测, 该研究提供了一种外场条件下实时探测的好方法。

关键词: 偏振成像; 损伤探测; 偏振特性; 电荷耦合器件; 粗糙度

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210629

Photoelectric detector surface damage state polarization imaging type detection system

Hu Weina¹, Lv Yong¹, Geng Rui¹, Li Yuhai², Niu Chunhui¹

- (1. School of Instrument Science and Photoelectric Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to achieve the demand of real-time detector damage detection in the external field, a photoelectric detector surface damage state polarization imaging type detection system was developed. The expressions of the cat eye target echo polarization characteristics (DP) and the degree of polarization (DOP) were derived theoretically, the relationship curves among surface roughness, DOP and DP were simulated by MATLAB software. A simultaneous polarization imaging optical system was designed, a real-time detection outfield experiment of the Charge Coupled Devices (CCD) surface damage state by a 671 nm continuous laser was carried out and a MATLAB GUI-based echo image visualization real-time acquisition system was developed to obtain information such as echo image intensity, DP and spot size. Moreover, by analyzing the morphological images of the damaged and undamaged detector surface with optical digital microscope and white-light

收稿日期: 2021-09-01; 修订日期: 2021-10-28

作者简介: 胡玮娜, 女, 硕士生, 主要从事光电对抗方面的研究。

导师简介: 吕勇, 男, 教授, 博士, 主要从事光电对抗方面的研究。

interferometer, it was found that the silicon substrate was visible on detector damage surface and the roughness parameter S_q was large. Clearly, the simulation results are in good agreement with the experimental test results. The results show that after the photodetector is damaged, its surface roughness increases, DP decreases, the depolarization characteristic is obvious and DOP decreases. Overall, the polarization imaging technique can effectively detect the damage state of the photodetector surface in real time, and this study provides a good method for real-time detection under external field conditions.

Key words: polarization imaging; damage detection; polarization characteristics; CCD; roughness

0 引言

随着高新技术的飞速涌现,电荷耦合器件(Charge Coupled Devices, CCD)凭借其线性度好、灵敏度高、光谱响应范围宽等特点在各领域均有广泛应用^[1-3]。目前在光电对抗中,激光武器能够对光学设备精确打击,使光电探测器表面结构发生改变,造成探测器损伤,而且武器的严重打击如激光热作用会导致探测器丧失成像能力以至无法使用^[4-5]。由于光电探测器是光学成像系统中的关键组成部分,非合作目标的光电探测器是否损伤决定了实际应用效果的好坏,因此,实时准确评估光电探测器表面损伤状态至关重要。

鉴于光电探测器的重要地位,研究者们对 CCD 损伤机理开展了大量研究。2011 年,邱冬冬等^[6]利用测量驱动电极与衬底之间的电阻值、观察 CCD 不同分层的形貌及破坏程度和检测其输出波形的的方法对 CCD 的破坏机理进行研究。2021 年,欧洲等^[7]人开展了 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 的损伤实验,观察到不同损伤状态的 CCD 表面,得出不同损伤状态主要由 SiO₂ 绝缘层材料相变引起电阻值不同改变量所产生的。近年来,笔者课题组主要针对 CCD 的损伤机理进行了研究,开展了激光光热效应以及脉冲激光对 CCD 的破坏机理实验^[8],结合有限元模型进行了固体传热仿真模拟^[9],以及“猫眼”目标表面粗糙度对其回波散射偏振度的影响^[10]和 CCD 损伤进程中猫眼回波特性研究^[11]。

上述研究主要集中在 CCD 损伤机理以及在实验室环境下利用光功率计探测计算得到回波偏振度实现对探测器损伤状态的评估,针对外场环境下探测器损伤状态的实时探测技术尚不成熟,仍需开展深入研究,其中,偏振成像技术在光电探测器表面损伤状态

探测中具有独特优势。不同于传统光电成像技术对二维空间光强分布信息的收集,偏振成像技术能够对同一被测物的不同状态下偏振特性信息和强度信息进行获取^[12]。同时偏振成像技术的测量方式可分为三种^[13]:分振幅、分孔径和分焦平面。采用一次曝光来获取同一目标的多幅不同偏振方向的偏振图像,其具有实时性好、空间分辨率高、精度高等优点,在动目标实时探测上有较好应用。

因此,文中设计了一套同时偏振成像系统实现对探测器表面损伤状态的外场实时探测。理论推导了“猫眼”目标回波偏振特性参数 DP 和回波偏振度 DOP 的表达式,利用 MATLAB 软件仿真绘制曲线得到了探测器表面粗糙度与回波偏振度以及偏振特性之间的规律。结合“猫眼”目标探测优势,基于偏振成像技术在外场开展了 671 nm 连续激光对 CCD 表面损伤状态实时探测研究,根据实验及仿真结果建立起光电探测器表面粗糙度、回波偏振特性以及回波偏振度之间的联系。

1 猫眼回波偏振特性理论及仿真分析

1.1 猫眼回波偏振特性

在夜晚,猫的眼睛被光照射后犹如宝石般明亮,是因为猫眼中有十几层的特殊细胞,可形成一个反射层,光线能够从反射层按原路返回并发出亮光,这就是“猫眼”效应。如同猫眼一样,当激光束照射在高灵敏度的光电传感器上时,也会发生“猫眼”效应,回波光束将原路返回且反射光强度比漫反射强度高 2~4 个数量级,这就是光学系统中的“猫眼”效应^[14]。利用目标的“猫眼”效应进行主动探测已在光电对抗领域得到广泛应用^[15],目前对光电探测器表面损伤状态的评估依据是猫眼回波的偏振特性,需进一步分析其偏振特性,找寻与偏振度之间的有机联系。

偏振度 (Degree of Polarization, DOP) 是描述光波偏振化程度的物理量, 其严格定义为部分偏振光的总光强中完全偏振光所占的百分比, 可用公式 (1) 表示^[16]:

$$DOP = \frac{I_{P0}}{I_{NP} + I_{P0}} \quad (1)$$

式中: I_{P0} 表示为完全偏振光光强; I_{NP} 表示为完全非偏振光的光强。对于完全非偏振光, $DOP=0$; 对于完全偏振光, $DOP=1$; 一般的 DOP 值表示部分偏振光, DOP 值越接近 1, 光的偏振程度越高。由公式 (1) 可以得到完全非偏振光的光强为:

$$I_{NP} = \frac{1 - DOP}{DOP} I_{P0} \quad (2)$$

一般描述线偏振光的偏振度可表示为:

$$LDOP = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (3)$$

式中: I_{max} 和 I_{min} 分别表示为两个正交分量对应的最大光强和最小光强。

类似的, 为表征回波的偏振特性, 假设存在参数 DP , 并指出:

(1) 仅适用于琼斯矢量; (2) 线偏振激光经损伤后的 CCD 表面反射后未转化为圆偏振光 (一般双折射才具有此效应)。由公式 (3) 可定义“猫眼”目标回波偏振特性存在参数 DP , 使得 DP 表示为回波的 S 波和 P 波光强和与差之间的比值:

$$DP = \frac{I_S - I_P}{I_S + I_P} \quad (4)$$

式中: S 波与 P 波是垂直方向和水平方向上振动的两正交光波, 其光强大小分别为 I_S 与 I_P 。

I_S 、 I_P 与 I_0 之间的振幅关系如图 1 所示, 设 E_0 为入射线偏振光的光矢量振幅且与 P 波传播方向夹角为 α , 将光振动分解为互相正交的两振动方向上, 两振幅分别为 $E_0 \cos \alpha$ 和 $E_0 \sin \alpha$, 则 I_S 、 I_P 与 I_0 之间的关系可以用公式 (5) 表示:

$$\begin{cases} I_P = I_0 \sin^2 \alpha \\ I_S = I_0 \cos^2 \alpha \end{cases} \quad (5)$$

部分偏振光由完全非偏振光 (自然光) 和完全偏振光组成。通常, “猫眼”回波 I_0 为部分偏振光, 则 I_P 和 I_S 可用公式 (6) 表示:

$$\begin{cases} I_P = \frac{1}{2} I_{NP} + (I_0 - I_{NP}) \sin^2 \alpha \\ I_S = \frac{1}{2} I_{NP} + (I_0 - I_{NP}) \cos^2 \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_P 表示为 P 波的光强强度; I_S 表示为 S 波的光强强度; I_{NP} 表示为完全非偏振光。

将公式 (6) 代入公式 (4) 可得:

$$DP = \frac{I_{P0} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)}{I_{NP} + I_{P0}} \quad (7)$$

将公式 (2) 代入公式 (7) 可得:

$$DP = DOP (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \quad (8)$$

由公式 (8) 可知, 当 α 小于 45° 时, 目标回波偏振特性参数 DP 与偏振度 DOP 之间存在正比例关系。若偏振度 DOP 减小, 目标回波偏振特性参数 DP 也减小; 反之, 若偏振度 DOP 增大, 目标回波偏振特性参数 DP 也会随之增大。

偏振角 (Angle of Polarization, AOP) 也是描述回波偏振特性的一个重要参数, 参考文献 [17] 可知, 计算该参数需得到 0° 、 90° 、 45° 和 135° 这四个偏振方向的光强强度, 因此需要四相机系统进行探测, 但在实验过程中发现, 损伤前后偏振角的变化不明显且无明显规律, 因此, 文中采用双相机系统进行探测, 不考虑偏振角的特性。

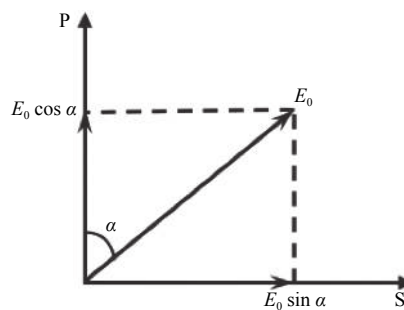


图 1 I_S 、 I_P 与 I_0 之间的振幅关系

Fig.1 Amplitude relationship between I_S , I_P , and I_0

1.2 偏振度与粗糙度的关系

微面元双向反射分布函数模型 BRDF 可用来表征目标表面对辐射的反射传输特性^[18]。但大部分目标表面并不完全光滑, T-S BRDF 模型应运而生。T-S BRDF 模型适用于高斯分布的光波在目标物体表面的散射情况, 其条件为 $\lambda \leq \sigma$, σ 为表面粗糙度参

数, σ 越大则表面越粗糙。T-S BRDF 模型表达式如下^[10]:

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)\cos(\theta_r)} \quad (9)$$

式中: λ 为光的波长; θ_i 为入射光线与目标表面法向 z 的夹角, 即入射角; φ_i 为入射方位角; θ_r 为反射光线与目标表面法向 z 的夹角, 即反射角; φ_r 为反射光线在 xoy 面上的投影光线与 x 的夹角, 即反射方位角; σ 为表面粗糙度参数; θ 为微面元法线与目标表面法线的夹角。

为了描述具有偏振特性的“猫眼”目标表面回波光束传输特性, 基于 T-S BRDF 模型, 推导出偏振双向反射分布函数模型 (pBRDF) 的表达式为:

$$f_{j,k}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{4\sigma^2} \frac{1}{\cos^4\theta} \frac{\exp(-(\tan^2\theta/2\sigma^2))}{\cos(\theta_i)\cos(\theta_r)} \times M_{j,k}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (10)$$

式中: $M_{j,k}$ 为 4×4 的穆勒矩阵, 由于 Jones 矩阵可以表示 Mueller 矩阵, 所以 Jones 矩阵的建立尤为重要。Jones 矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} T_{SS} & T_{PS} \\ T_{SP} & T_{PP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\eta_r) & \sin(\eta_r) \\ -\sin(\eta_r) & \cos(\eta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\eta_i) & -\sin(\eta_i) \\ \sin(\eta_i) & \cos(\eta_i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: R_s 、 R_p 分别代表菲涅耳反射系数; η 为两入射面或反射面之间的夹角。由公式 (11) 即可得到 Jones 矩阵的 4 个分量, 根据 Jones 矩阵与 Mueller 矩阵之间的转换关系, 将得到 Mueller 矩阵的各个分量代入公式 (10) 中即可得到偏振双向反射分布函数 4×4 矩阵形式 $f_{j,k}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 。

根据半球定向反射理论, 光波入射到目标表面产生“猫眼”效应原路返回光波的积分运算表达式为^[11]:

$$\rho_{HDR}^{\tau}(\theta_i) = \int_0^{2\pi} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} f(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \cos(\theta_r) \sin(\theta_r) d(\theta_r) d(\Delta\phi) \quad (12)$$

斯托克斯矢量 S 具有计算简洁和便于测量等优点, 是常用描述光波偏振特性的方法之一, 其表达式为:

$$S = [I \quad Q \quad U \quad V]^T \quad (13)$$

式中: I 表示光波的总光强; Q 和 U 表示线偏振分量;

V 表示圆偏振分量。

线偏振光入射目标表面其回波散射的偏振度用 Stokes 矢量描述为:

$$DOP = \frac{\sqrt{(Q^2 + U^2 + V^2)}}{I} \quad (14)$$

当激光束保持以线偏振光入射到目标表面时, 光电探测器表面产生的猫眼回波与入射光之间的偏振态可由 Stokes 矢量描述为:

$$S_{\tau} = \rho_{HDR}^{\tau} \cdot S_i \quad (15)$$

式中: S_i 表示为以线偏振光入射的斯托克斯矢量; S_{τ} 表示为猫眼回波的斯托克斯矢量。

根据公式 (15) 与 (14) 即可求解出用 Stokes 矢量描述的猫眼回波偏振度。理论推导结果表明, 猫眼回波偏振度 DOP 与目标表面粗糙度有关。

1.3 表面状态与偏振度关系仿真分析

目标表面粗糙度是影响其回波偏振特性的重要因素, 利用 MATLAB 软件分别对回波光束的偏振度和偏振特性进行仿真分析, 保持线偏振光入射到目标表面时, 研究其回波偏振度、偏振特性与粗糙度的变化规律如图 2 所示。

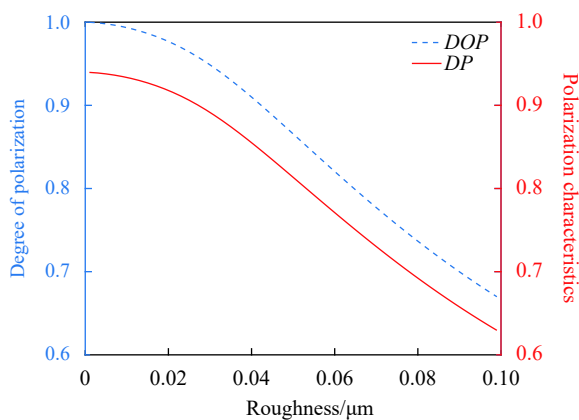


图 2 粗糙度与偏振度 DOP 和偏振特性 DP 的关系曲线

Fig.2 The relationship curve of roughness, DOP and DP

由图 2 中仿真绘制的两条曲线可知, 目标回波偏振度 DOP 和偏振特性 DP 均随着粗糙度的增大而减小。粗糙度小于 0.03 时, 曲线随着粗糙度的增加, 偏振度 DOP 和偏振特性参数 DP 均呈现较缓慢的变化趋势; 在大于 0.03 后, 两者均出现快速下降趋势。仿真结果表明, 两条曲线的变化趋势一致, 回波偏振特性 DP 以及回波偏振度 DOP 均与“猫眼”目标表面粗

糙度有关,随着表面粗糙度增大,回波的偏振特性 DP 减小,回波偏振度 DOP 也减小,下面搭建实验系统进行实验。

2 实验装置及系统

2.1 同时偏振成像系统

搭建了同时偏振成像光学系统平台,实验系统可分为发射系统和接收系统两部分。发射系统由 671 nm 连续激光光源、半透半反镜组成;模拟目标由单透镜(直径为 25.4 mm、焦距为 35 mm)、CCD 芯片和剪式升降台组成;接收系统由偏振分光棱镜、COMS 相机、信号发生器、千兆交换机以及计算机组成,系统装置示意图如图 3 所示,系统装置实物图如图 4 所示。

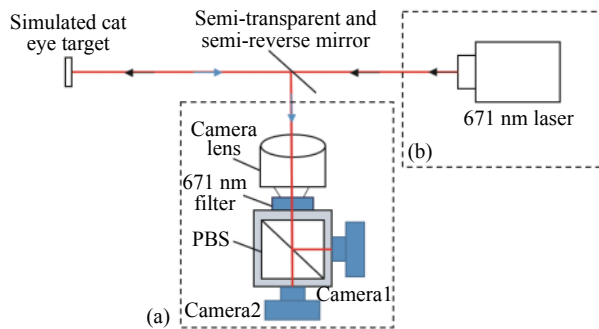
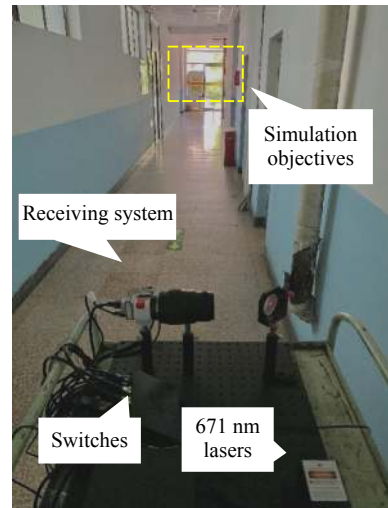


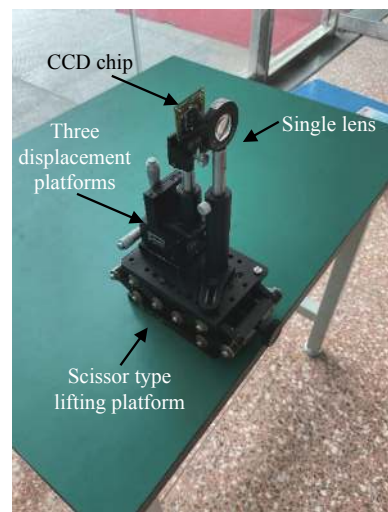
图 3 系统装置示意图:(a) 接收系统;(b) 发射系统

Fig.3 Schematic diagram of the system device: (a) Receiving system; (b) Transmitting system

发射系统中光源选择 671 nm 连续激光,其最大输出功率为 200 mW,光束发散角小于 1.5 mrad,是线偏振光。接收系统中镜头焦距为 70~300 mm,可实现自动或手动调焦。偏振分光棱镜是中国大恒光电公司型号为 GCC-402112 的宽带偏振分光棱镜,波长为 620~1 000 nm。相机选用美国 Teledyne Dalsa 公司 G3-GM10-M2590 黑白 COMS 面阵相机,其探测器分辨率为 2592×2048 ,像素大小为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$,像素位深为 8 bit 或 10 bit,文中选择 8 bit 采集方式。附属设备为各光学元器件的固定件如套筒、支杆以及偏振分光棱镜的固定结构件(立方架)等;模拟目标中探测器选用型号为 SONY ICX633BKAA 的行间转移型硅基底面阵 CCD 芯片,其像元尺寸为 $9.8 \mu\text{m} (\text{H}) \times 6.3 \mu\text{m} (\text{V})$,实验时使用工具提前拆解了芯片用于防尘的封装玻璃。



(a) 发射、接收系统
(a) Transmitting and receiving system



(b) 模拟目标
(b) Simulation objectives

图 4 系统装置实物图

Fig.4 System device physical diagram

2.2 回波图像可视化实时采集系统

编制了基于 MATLAB GUI 的回波图像可视化实时采集系统,回波目标识别流程如图 5 所示,系统界面由实时采集显示窗口、控制面板以及计算结果三大部分组成,能够实现对回波图像的强度信息实时提取、计算及显示,回波图像可视化实时采集系统界面如图 6 所示。

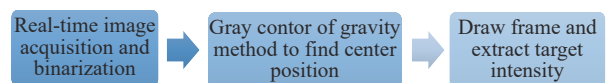


图 5 回波目标识别流程

Fig.5 Identification process of echo wave target

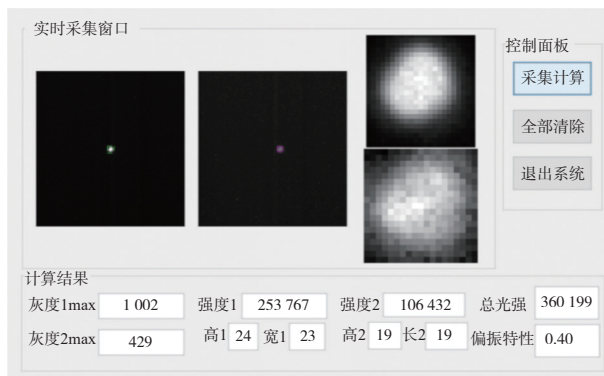


图 6 基于 MATLAB GUI 的回波图像实时采集软件系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of the MATLAB GUI-based echo image acquisition software system in real time

3 实验过程、结果及分析

3.1 实验过程及结果

由 671 nm 激光器发出的一束激光经半透半反镜,透射至远距离的模拟猫眼目标上,产生“猫眼效应”,光束将按原光路返回,回波光束经半透半反镜反射至接收系统中的偏振分束棱镜 PBS,偏振分束棱镜 PBS 将回波光束分解为两束正交的偏振光,分别被两台相机接收。其中相机 1 接收垂直方向振动的偏振光 S 波;相机 2 接收水平方向偏振光 P 波。用激光分别照射 6 组光电探测器被损伤区域和未损伤区域,测试得到 6 组光电探测器表面被损伤与未损伤的回波光束偏振特性参数 DP 实验值,如表 1 所示。

表 1 未损伤与损伤处 CCD 表面偏振特性 DP

Tab.1 CCD surface polarization characteristics DP of undamaged and damaged areas

Group number	Undamaged area DP	Damaged area DP
1	0.44	0.35
2	0.44	0.35
3	0.44	0.33
4	0.44	0.33
5	0.44	0.36
6	0.51	0.36

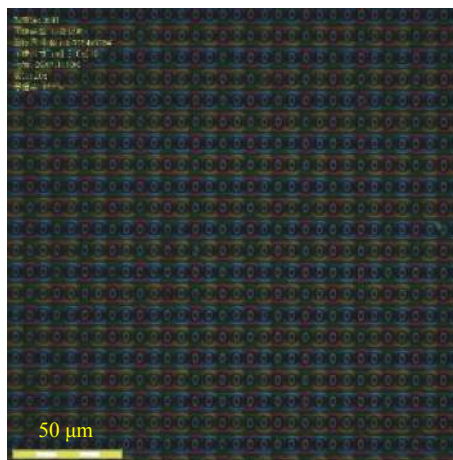
表 1 实验结果分析可知,6 组未损伤处 CCD 表面的回波偏振特性 DP 数值均大于损伤处数值。表 1 结合公式 (1) 和 (8) 可知,偏振度是部分偏振光的总光强中完全偏振光所占的百分比,若保持始终是线偏振光

入射这一条件不变时,损伤处 CCD 表面 DP 值减小的原因是由于 I_{NP} 值变大造成的。

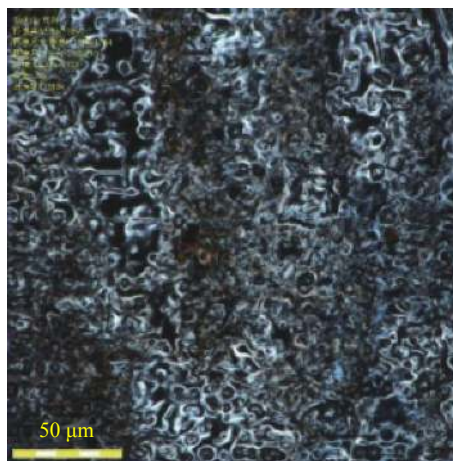
3.2 显微分析

需探究 CCD 表面损伤的微观结构,利用显微镜对损伤处和未损伤处 CCD 表面进行了观测,如图 7 所示。选用 Olympus 公司型号为 DSX110 的光学数码显微镜,其照明方式采用 LED 环形灯照明,扫描模式为逐行扫描,图像分辨率为 1194×1194 pixel,图像尺寸为 $210 \mu\text{m} \times 210 \mu\text{m}$,总倍率为 $1339 \times$ 。

图 7(a) 所示为未损伤处的 CCD 表面显微图像,图 7(b) 表示为损伤处 CCD 表面显微图像。由图 7 分析 CCD 表面未损伤处和损伤处的显微图像可知,CCD 表面未损伤处显微图像均可见清晰排列整齐的像元,



(a) 未损伤处
(a) Undamaged area



(b) 损伤处
(b) Damaged area

图 7 CCD 表面未损伤和损伤处显微形貌图像

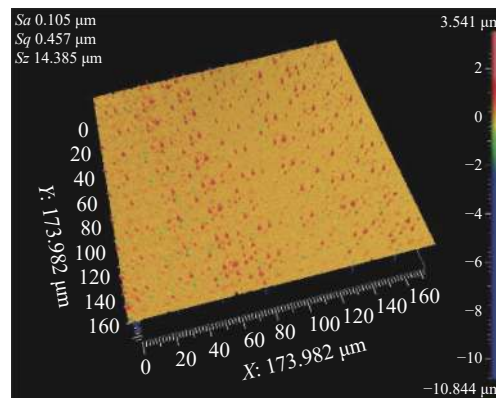
Fig.7 Microscopic images of undamaged and damaged CCD surfaces

微透镜层完好,如图 7(a) 所示;对比未损伤处,损伤处的 CCD 显微形貌如图 7(b) 所示,微透镜层显然被熔融破坏,熔融处周围清晰可见变形的网状结构说明遮光铝膜层也被熔融,露出了遮光铝膜层下的硅电极以及硅基层,溢出物明显。由于 CCD 受到了激光较强辐照,一般金属层和硅基层吸收激光能量最多,产生较多热量。这些热量不仅会使自身温度升高,还会以热传导方式扩散到周围区域,使各层材料有不同的温升效应。遮光铝膜层被彻底损伤导致硅电极温度不断升高,材料表面吸收热量后将部分热量传递给内部,温度达到硅熔点发生熔融形成损伤处表面形貌。分析认为,CCD 被损伤顺序由表面至内部依次是微透镜层、遮光铝膜层、二氧化硅层以及硅基层,损伤区域形貌特征处于激光辐照 CCD 进程的末端^[11,19],是由热传导、热对流和热辐射共同作用的结果。

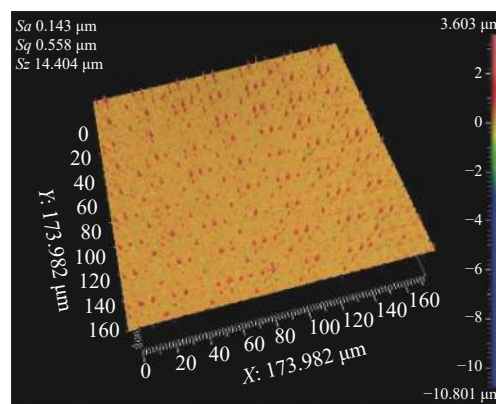
原本光滑的探测器表面受到激光辐照使其表面粗糙程度发生变化,表现在 CCD 表面相比于未损伤处十分粗糙,并且 CCD 像元结构损伤严重以至于 CCD 失去了成像能力。根据微面元理论^[10],粗糙表面可看作大量随机分布的微面元组成,这些微面元的倾斜角是随机分布的,因此微小面元的反射光偏振方向也是随机的,这一部分的反射光使目标回波中的完全非偏振光强度 I_{NP} 值变大,偏振特性 DP 减小。

3.3 白光干涉分析

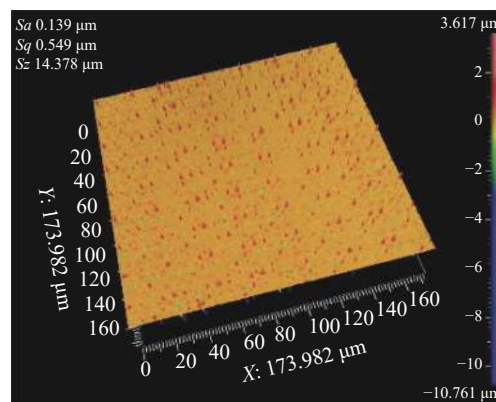
为了进一步探究目标表面粗糙度与其回波偏振特性之间的关系,选择白光干涉仪对此 CCD 表面进行三维形貌定量测量。白光干涉仪采用非接触的测量方式,测量的最大视场为 $173.982\ \mu\text{m} \times 173.982\ \mu\text{m}$,横向分辨率 $0.174\ \mu\text{m}$,采样的时间间隔为 8 s。使用配套软件进行三维形貌图像还原,并测量得到算术平均高度 Sa 、均方根偏差 Sq 及表面十点高度 Sz 。其中, Sq 的数值大小代表了均方根偏差,具体指被测物表面粗糙度偏离参考基准面的均方根,平均高度 Sa 代表了被测物表面的平均高度,最大高度 Sz 代表了被测表面 5 个最高点平均值与 5 个最低点平均值之和。CCD 表面未损伤处和损伤处三维形貌图像如图 8 和图 9 所示,表面粗糙度参数均方根测量值如表 2 所示。



(a) 第一组
(a) First group



(b) 第二组
(b) Second group

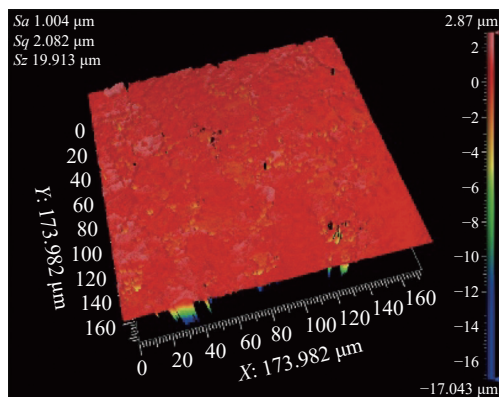


(c) 第三组
(c) Third group

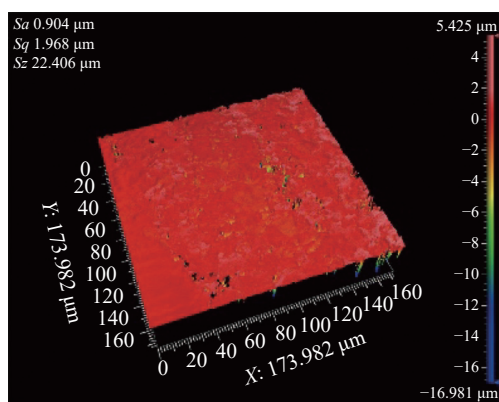
图 8 不同未损伤处 CCD 表面白光干涉三维形貌图像

Fig.8 White-light interference 3D morphology image of CCD surface at different undamaged areas

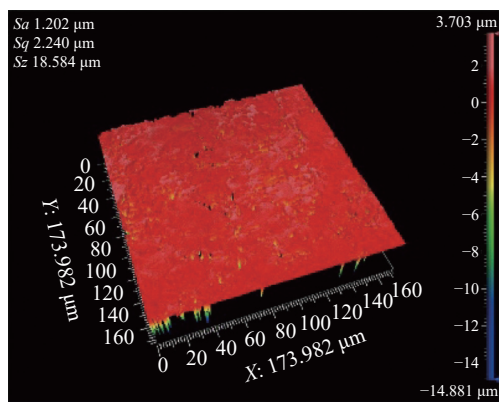
其中,图 8(a)~(c) 是 3 组 CCD 表面未损伤处白光干涉三维形貌图像,图 9(a)~(c) 是 3 组 CCD 表面损伤处三维形貌图像。表 2 中 Sq 的数值具体指被测物表面粗糙度偏离参考基准面的均方根,均方根偏差代表



(a) 第一组
(a) First group



(b) 第二组
(b) Second group



(c) 第三组
(c) Third group

图 9 不同损伤处 CCD 表面白光干涉三维形貌图像

Fig.9 White-light interference 3D morphology image of CCD surface at different damaged areas

了粗糙度评价参数,表 2 反映了损伤处与未损伤处 CCD 表面的粗糙程度,损伤处的 Sq 值均大于未损伤处的数值。结果表明,损伤处的 CCD 表面更加粗糙,偏振特性 DP 与 CCD 表面粗糙度有关。

表 2 不同损伤与未损伤处 CCD 表面均方根参数 Sq
Tab.2 Root mean square parameters Sq of CCD surface at different damaged and undamaged areas

Group number	Undamaged area $Sq/\mu\text{m}$	Damaged area $Sq/\mu\text{m}$
1	0.457	2.082
2	0.558	1.968
3	0.549	2.240
4	0.411	2.431
5	0.399	2.291
6	0.342	2.130

4 结 论

自主研发了偏振成像式光电探测器表面损伤状态实时探测系统,实现了外场条件下较远距离外主动式探测 CCD 损伤状态。推导了“猫眼”目标回波偏振特性参数 DP 和偏振度 DOP 的表达式,利用 MATLAB 软件仿真绘制了探测器表面粗糙度与回波偏振度以及偏振特性的关系曲线。搭建了同时偏振成像光学系统平台,研发了基于 MATLAB GUI 的回波图像实时采集系统,得到了回波图像强度、偏振特性和光斑尺寸等信息;通过显微镜和白光干涉仪对探测器表面损伤和未损伤部位开展了形貌测量,发现探测器损伤表面可见硅基底且粗糙度参数 Sq 值较大。研究表明:仿真曲线趋势与实验结果具有良好一致性。光电探测器表面被损伤后,其表面材料粗糙度增大、回波偏振特性参数 DP 减小、退偏效应显著、偏振度 DOP 减小。研究成果为远距离在线判别 CCD 损伤状态新系统提供理论依据和数据支持,实现了远距离非合作目标探测器表面损伤状态实时探测。

参考文献:

- [1] Jiang C X, Tan Y, Peng B, et al. Investigating the thermal stress of millisecond pulsed laser irradiation on Charge-Coupled Devices [J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2020, 08(11): 2557-2568.
- [2] Ma Z X, Li X Y, Ren Z G, et al. Design of ultra-compact optical detection system with large field of view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2581-2587. (in Chinese)
- [3] Wang Y B, Zhang D F, Zhou X F, et al. Formation mechanism of regular lattices on photosensitive surface of CCD [J]. *Optics*

- and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1242-1250. (in Chinese)
- [4] Bi J, Zhang X H, Ni X W. Study on the hard damage mechanism of MOS photosensitive unit composed of CCD image sensor by long pulse laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 340-345. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Qiu D D, Zhang Z, Wang R, et al. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 144-148. (in Chinese)
- [7] Ou Y, Shi G Z, Li D D, et al. Research on damage mechanism of 416 nm nanosecond pulsed laser to CCD [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 534-541. (in Chinese)
- [8] Xia R Q, Zhang Q Y, Niu C H, et al. Experimental study on CCD detector jammed by 1064 nm laser photothermal effect [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(9): 1188-1192. (in Chinese)
- [9] Zhang X, Niu C H, Ma M Y, et al. Experimental study on three-wavelength single-pulse nanosecond laser damage CCD [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(2): 300-307. (in Chinese)
- [10] Qin X Z, Niu C H, Chen S J, et al. Study on the polarization characteristics of echo scattering of "cat eye" target based on microplane element theory [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 916-923. (in Chinese)
- [11] Chen S J, Niu C H, Li X Y, et al. Cat eye echo characteristics of optical imaging system in CCD damage process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200425. (in Chinese)
- [12] Li S J, Jiang H L, Zhu J P, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)
- [13] Wang X, Xia R Q, Jin W Q, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
- [14] Wu D S, Liu B Q, Hu W G, et al. Echo characteristics model of cat-eye effect based on matrix optics. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 92-98. (in Chinese)
- [15] Liu Y, Xia R Q, Lü Y. Effectiveness evaluation system for anti cat's eye detection technology using optoelectronic target [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1033-1038. (in Chinese)
- [16] Liao Y B. Polarized Light[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [17] Wang H, Hu H, Li X, et al. Metal surface detection using division-of-focal-plane imaging polarimetry[C]//Third International Conference on Photonics and Optical Engineering, 2019, 11052: 110521A.
- [18] Liu Y, Shi H D, Jiang H L, et al. Infrared polarization properties of targets with rough surface [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471. (in Chinese)
- [19] Zhang M X, Nie J S, Sun K, et al. Experimental study on laser cat's eye echoes from optical imaging system in the process of CCD damaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 23-30. (in Chinese)