

doi:10.3788/gzxb20184709.0904003

CCD 不同损伤状态下光学成像系统猫眼回波

张明鑫, 聂劲松, 豆贤安, 孙可

(国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘 要:建立了不同损伤状态下光学成像系统的猫眼回波模型,分析了 CCD 各层被损伤对猫眼回波功率的影响,得到猫眼回波功率变化与 CCD 损伤程度的对应关系,并通过实验进行了验证.研究发现,在远场情况下成像光学系统的猫眼回波中心位置光强最强,且回波功率随 CCD 损伤程度的加深呈现先显著上升再迅速下降,最后缓慢下降的变化规律,可由此判断 CCD 各层结构的损伤状态.研究结果对远场条件下 CCD 被损伤程度的实时监测有一定的参考价值.

关键词: CCD; 猫眼回波模型; 回波功率变化; CCD 的损伤程度; 远场

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)09-0904003-12

Echo of the Optical Imaging System under Different Extent of Damage to CCD

ZHANG Ming-xin, NIE Jin-song, DOU Xian-an, SUN Ke

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The cat's eye echoes model of the optical imaging system under different damage conditions was established and the influence of the damage to the charge coupled device layers on the cat's eye echo power was analyzed. Based on this, the corresponding relationship between the echo power of the cat's eye and the damage degree of the CCD was established and verified by experiments. The results show that the field intensity is the strongest in the center of cat's eye echo which is from imaging optics system, and the power of the echo increases dramatically and then decrease steeply and decrease slowly with the damage degree more serious. The damaged status of CCD can be judged according to this rule. The study results have certain reference value for monitoring the damage degree of CCD in real time in the far field.

Key words: CCD; Cat's eye echo model; Variation of echo power; Degree of damage to CCD; Far field

OCIS Codes: 640.1520; 230.0040; 200.4740; 240.5770

0 引言

随着光电成像技术的发展,光电侦察与光电制导技术广泛应用于信息化战场^[1-3].光电侦察与光电制导装备离不开以电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)为核心的光电成像系统^[4-6].光学系统将目标的辐射、散射信号聚集到一个传感器上,光电传感器在对汇聚的光信号进行吸收、转换的同时,会将一部分光信号反射,如激光辐照 CCD 时约 30% 的光信号被从硅基底表面反射回来^[7-9].因此可以用主动发射激光的方式对光电成像设备进行探测,即基于“猫眼效应”的激光主动探测方法^[10-13].

2005 年,谷锁林用 Nd: YAG 激光器探测无人侦察机,仿真得出探测目标距离为 10 km、15 km、20 km、30 km 时,需要的激光功率分别为 15.2 W、75.5 W、236.6 W、1200 W,证明了利用激光器探测空中无人侦察

基金项目: 国家“十三五装备”预先研究项目(No.30603040207)资助

第一作者: 张明鑫(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光损伤.Email: zmx7530101@163.com

导师(通讯作者): 聂劲松(1970—),男,研究员,博士,主要研究方向为光电对抗技术.Email: njs7001@sina.com

收稿日期: 2018-03-14; 录用日期: 2018-06-07

<http://www.photon.ac.cn>

机的可行性^[14];2007年,邵立使用输出功率为5 mW的He-Ne激光平行入射到实验平台,经凸透镜传输到硅片表面,测得此时回波最大功率为19.4 μW,猫眼回波功率反射率为5.87%,将硅片替换为漫反射板,得到猫眼回波功率反射率为1.13%,表明当利用激光进行主动探测时,即使目标是漫反射面也会产生比较明显的猫眼效应^[15].可知,猫眼效应可以应用于激光探测技术中.

利用猫眼回波图像的改变可判断焦平面器件的损伤形貌变化^[16-19].雷鹏研究了1 064 nm脉冲激光对硅材料的损伤,并用猫眼回波图像的变化推断出硅材料的损伤状态^[17];雷鹏还通过实验研究了CMOS结构中微透镜的损伤对回波图像的影响,并进行了仿真验证^[18].此类方法探测的是猫眼回波的横向分布,仅适用于近场条件下探测激光损伤器件的程度,而远场条件下因猫眼回波的横向尺寸过大,无法通过探测器直接获得.对于需远距离探测CCD损伤状态的实际情况,猫眼回波功率变化受环境因素的影响,但由于激光损伤CCD时仅需几秒便可将其完全损伤且对回波接收是同步进行的,故可忽略环境因素的影响,而只需考虑CCD损伤形貌及结构变化对回波强度的影响.本文研究了远场条件下CCD不同损伤状态时猫眼回波中心处的功率变化,实际应用时可根据回波功率的变化情况推断CCD各层结构的损伤状态.

1 理论研究

1.1 CCD的层状结构与损伤的一般规律

CCD的层状结构如图1.CCD工作时,微透镜层将光聚焦于遮光铝膜的开口处,被硅电极所感应;二氧化硅层为绝缘层,用于隔开硅电极与硅基底;硅基底是存储和转化光电信号的主要区域.当1 064 nm的连续激光损伤CCD时,CCD内部结构的损伤顺序依次为微透镜层、遮光铝膜层、二氧化硅层、硅基底^[19].其中对回波功率产生较大影响的是微透镜层、遮光铝膜层及硅基底.故需研究这三层结构的损伤对回波功率的影响.

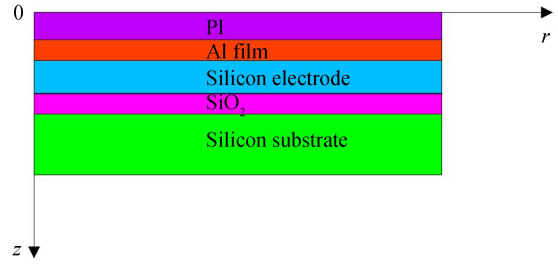


图1 CCD结构
Fig.1 Structure of CCD

1.2 理论分析

猫眼目标的光学系统可以等效为一个有限口径且透过率为1的薄透镜,其焦平面上的光学成像装备也可等效为一个孔径光阑.假定探测光为高斯光束,将其通过猫眼系统的光学传输过程展开为4f系统,如图2.

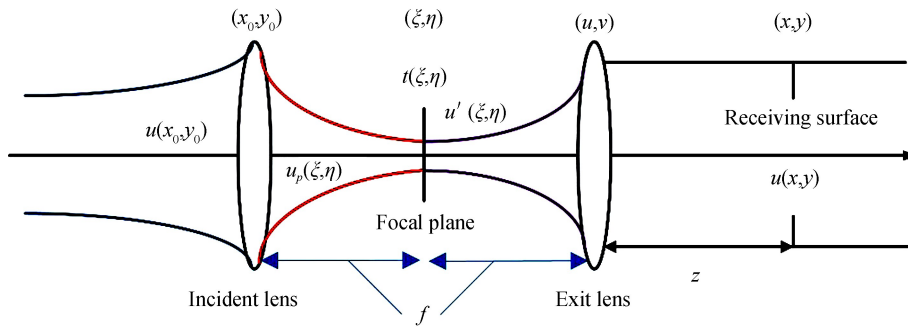


图2 猫眼回波传输示意图
Fig.2 The transmission of cat's eye echo

激光在4f系统中的传输过程推导见文献^[18].最终得到接收面上猫眼回波的传输公式为

$$u(x, y) = -\frac{\exp[jk(z+f)]}{\lambda^2 z f} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda z}(x^2 + y^2)\right] \iint u_p(\xi, \eta) t(\xi, \eta) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda f}(\xi^2 + \eta^2)\right] d\xi d\eta \iint p(u, v) \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(u^2 + v^2)\right] \exp\left\{-j2\pi\left[\left(\frac{x}{\lambda z} + \frac{\xi}{\lambda f}\right)u + \left(\frac{y}{\lambda z} + \frac{\eta}{\lambda f}\right)v\right]\right\} du dv \quad (1)$$

式中,λ为入射光波长,ξ,η为焦平面上的空间坐标,u,v为透镜上的空间坐标,u_p(ξ,η)为入射光经透镜聚

焦后的光场的复振幅分布, f 为透镜焦距, z 为透镜至接收面的距离. $p(u, v)$ 表示透镜的复振幅, $t(\xi, \eta)$ 为焦平面器件的透过率函数. 离焦量为微米量级时, 反射或散射物位置导致的离焦量对猫眼回波功率的影响微乎其微^[1]. 由于 CCD 整体厚度在百微米量级, 本文忽略离焦量的影响.

在仿真计算中考虑了 CCD 各层材料被损伤后反射率及粗糙度的变化对猫眼回波功率的影响, 具体体现在 $t(\xi, \eta)$ 中. 当微透镜完好时, 微透镜将入射光聚焦至遮光铝膜开口处的硅基底(二氧化硅对 1 064 nm 光近乎全透), 且单晶硅对 1 064 nm 激光的折射率为 3.55, 光强反射率为 0.30, 因将光路展开为 $4f$ 系统, 设置焦平面器件透光部分透过率为 0.30.

当微透镜被激光损伤时, 微透镜的形状发生畸变, 无法将光聚焦至遮光铝膜开口处, 此时部分入射光辐照在铝膜上, 因此设置焦平面器件铝膜部分的透过率为 0.9, 硅基底部分的透过率为 0.3.

当微透镜被完全损伤露出其下遮光铝膜层时, 将遮光铝膜开口处(即为硅基底)透过率设为 0.3, 其余部分透过率设为 0.9; 当遮光铝膜部分被损伤时, 露出其下硅基底及硅电极, 因此将透过率设为 0.3; 当 CCD 被损伤至硅基层时, 将透过率设为 0.3.

用高斯随机表面形貌模拟焦平面器件被损伤时的表面形貌设置粗糙度. 高斯随机表面形貌公式为

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

式中, $\eta(u_x, u_y)$ 是均值为 0 的白噪声, l 为相干长度, δ 为高斯形貌高度起伏的均方根^[20]. CCD 不同损伤状态时的粗糙度设置见表 1.

表 1 粗糙度设置
Table 1 Roughness setting

Damage status of CCD	$\delta/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$
Intact microlens	0	∞
Distorted microlens slightly	0.05	6
Distorted microlens severely	0.1	3
Damaged microlens completely	0.15	3
Damaged aluminum slightly	0.16	3
Damaged aluminum severely	0.17	3
Damaged aluminum completely	0.2	3
Damaged silicon completely	0.2	3

考虑到激光在粗糙表面的后向散射问题, 通过限制透镜的尺寸使以较大角度入射的散射光无法经过透镜.

根据 CCD 内层结构被激光损伤的顺序, 微透镜层最先被完全损伤, 后汽化消失, 因此在建立不同损伤程度的遮光铝膜层和硅基层层对猫眼回波功率影响的理论模型时, 不加入微透镜层.

1.3 模型参数设置

仿真中设置入射高斯激光的波长为 1 064 nm, 发散角为 0.6 mrad, 入瞳功率为 80 W, 激光器与猫眼回波探测面距离被探测成像系统的距离 z 为 10 m. 透镜的焦距为 100 mm, 直径为 50 mm, 微透镜的焦距为 10 μm .

2 仿真结果与讨论

2.1 CCD 未被损伤时的回波

CCD 未被激光损伤时, 微透镜处于完好状态. 在数值仿真中, 设定微透镜共 64 个, 单个微透镜的直径为 6 μm , 微透镜之间的距离为 6.5 μm , 阵列结构如图 3. 微透镜完好时回波图像如图 4, 此时, 在接收面上猫眼回波中心区域强度最强, 其它区域散射光呈杂散分布, 且离中心区域越远强度越弱. 考察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率为 10.96 W.

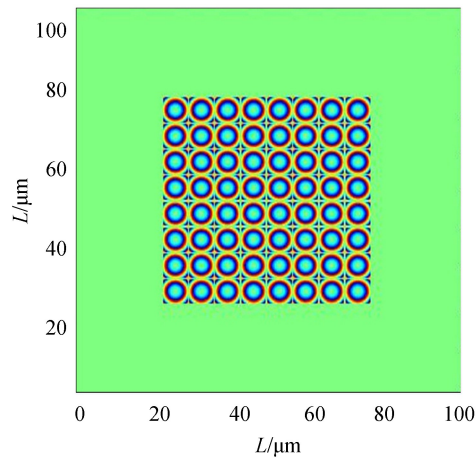


图3 微透镜阵列结构示意图
Fig.3 Micro lens array structure diagram

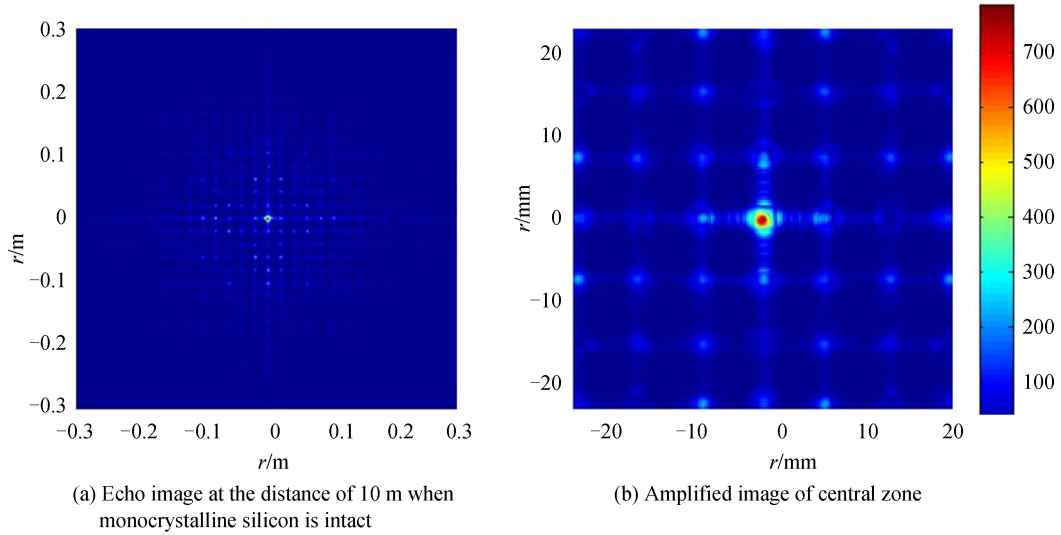
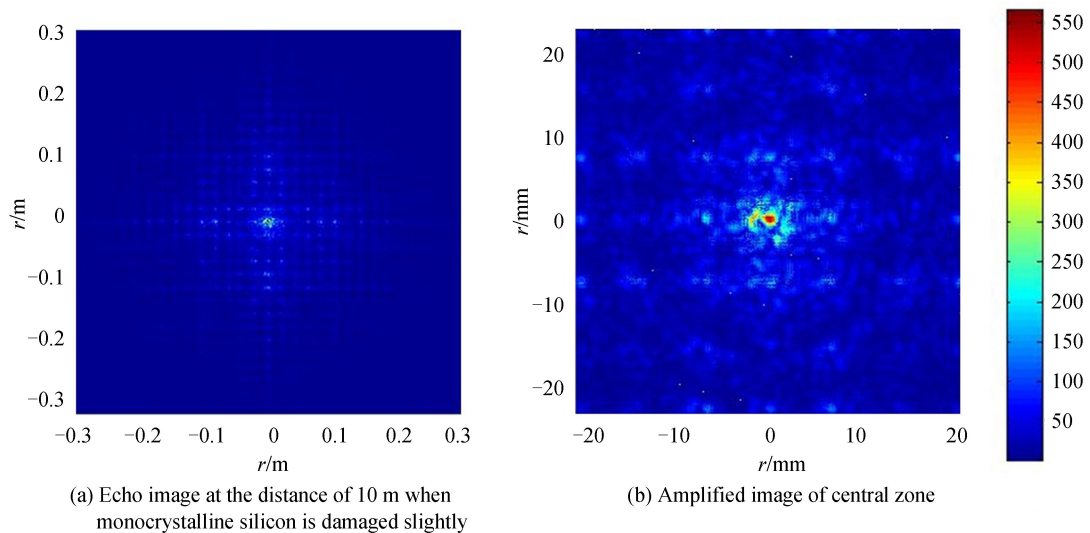


图4 微透镜完好时的回波图像及焦平面光斑分布
Fig.4 Echo image and focal plane spot distribution when micro lens is intact

2.2 微透镜层部分损伤对回波的影响

激光辐照 CCD 时,微透镜遇热发生畸变,入射光辐照在遮光铝膜上.微透镜畸变的程度取决于设置的粗糙度大小.如图5,当微透镜畸变程度较小时,回波中心处光强分布较为集中,考察接收面中心位置边长为



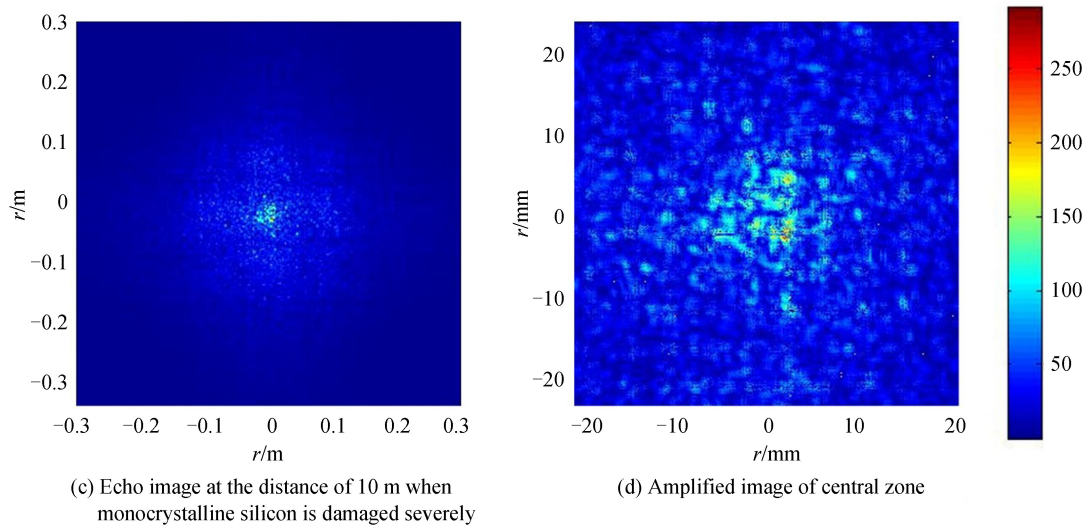


图5 微透镜畸变时的回波图像
Fig.5 Echo image when micro lens is distorted

20 mm的矩形内的光功率为 11.72 W;当微透镜畸变程度较大时,回波图像中出现的光斑分布散乱,说明微透镜畸变程度越大,对入射光的随机调制越明显,考察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率为 10.34 W.

2.3 微透镜层完全损伤对回波的影响

根据 CCD 被激光损伤的顺序,微透镜因熔点最低最先熔融,然后随着温度的增高汽化,因此此时建立的模型未添加微透镜层.微透镜完全损伤后露出其下的遮光铝膜层,入射光直接辐照至遮光铝膜层表面,此时遮光铝膜完好无损.为便于理论研究,可将遮光铝膜层简化为二维矩孔光栅,如图 6,黑色矩孔为铝膜开口处,为硅基底,设定透过率为 0.3,而矩孔之间的缝隙为遮光铝膜,透过率为 0.9.根据遮光铝膜的实际结构,在进行仿真计算时,设定一个周期内焦平面上二维矩孔光栅的矩孔尺寸为 $5\ \mu\text{m}$ (水平) $\times 2\ \mu\text{m}$ (竖直),二维光栅周期为 $10\ \mu\text{m}$ (水平) $\times 5\ \mu\text{m}$ (竖直).

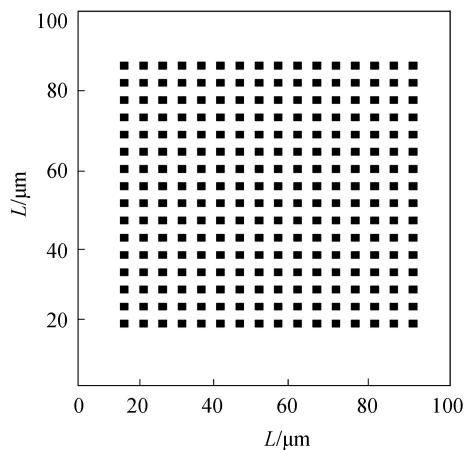


图6 遮光铝膜模型
Fig.6 Structure of shading aluminium film

仿真所得结果如图 7.猫眼回波中包含了更丰富的空间频率成分,这些空间频率使接收面上的光更加弥散,猫眼回波中心区域光的分布也不再均匀.考察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率为 23.41 W.

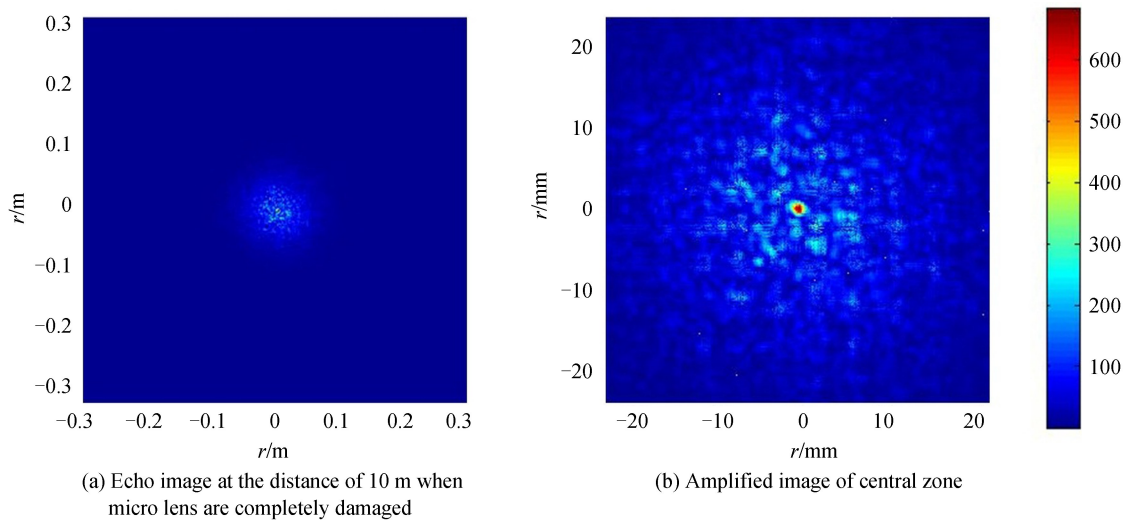


图7 微透镜完全损伤时的回波图像
Fig.7 Echo image when micro lens is damaged completely

2.4 遮光铝膜层部分损伤对回波的影响

随着激光辐照时间的增加,遮光铝膜层发生损伤.由于遮光铝膜碎片的产生具有随机性,且分布散乱,无法通过数学语言进行描述.因此在理论计算中设定损伤区域如图8.图9为遮光铝膜部分损伤时的回波图.由

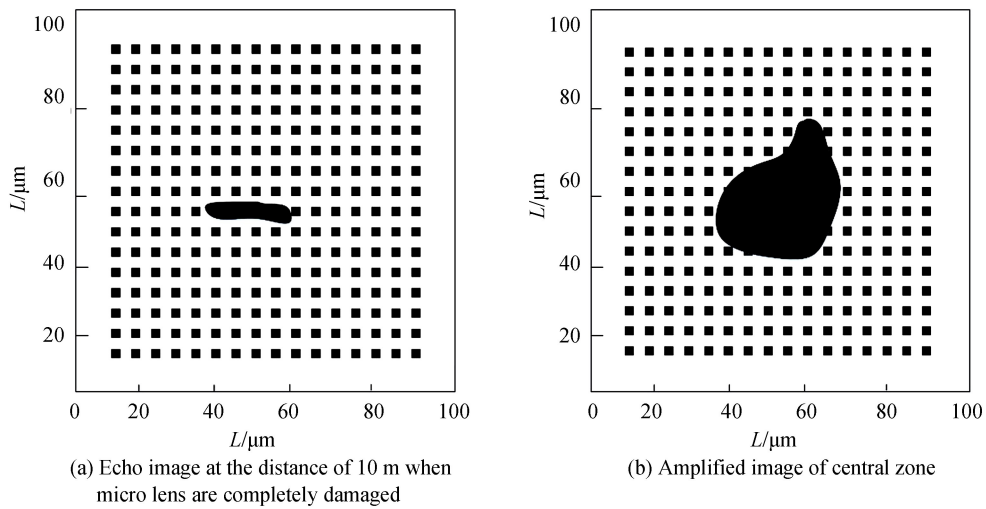
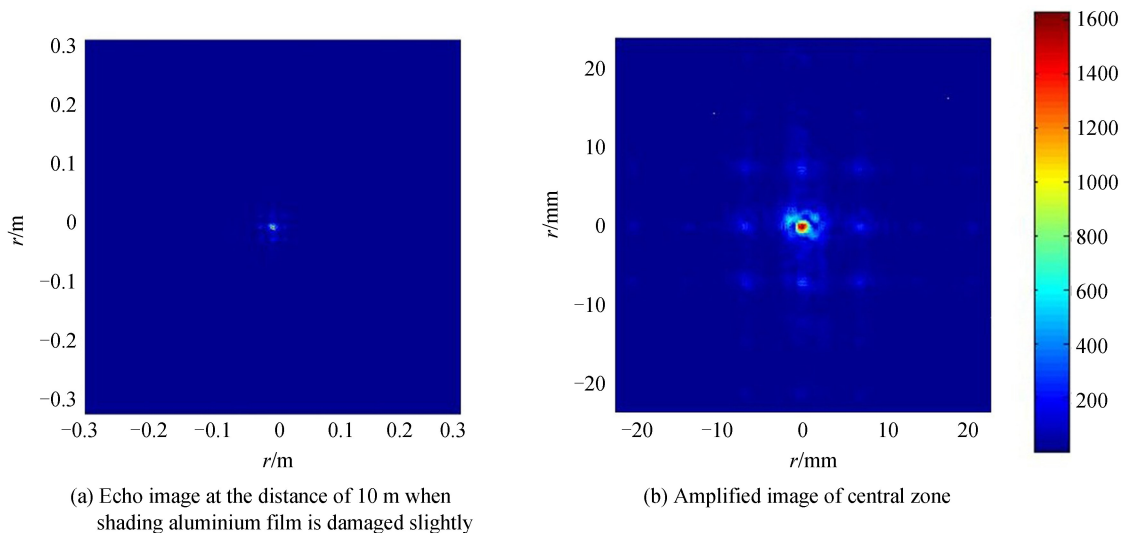


图8 遮光铝膜损伤区域
Fig.8 Damaged area of shading aluminium film



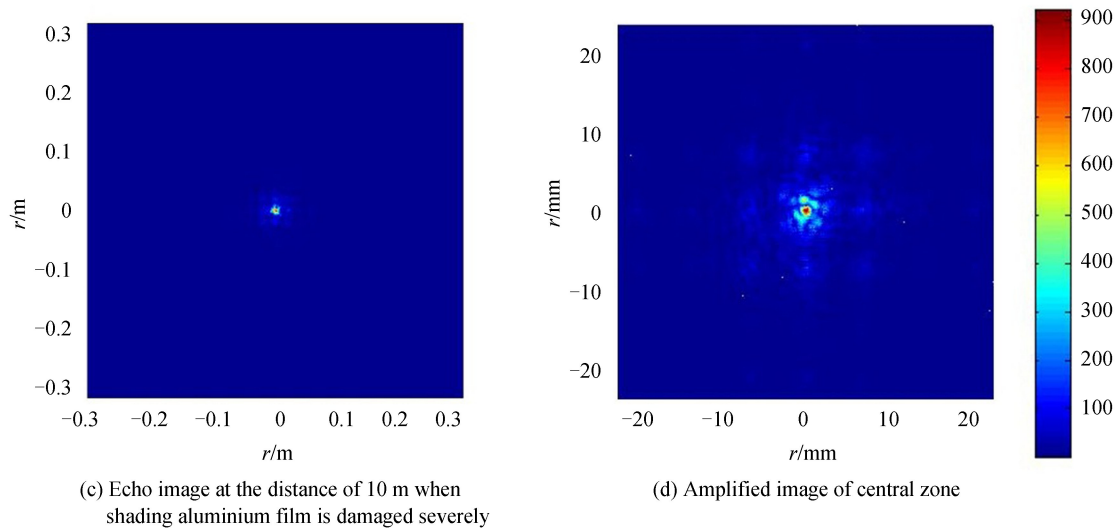


图9 遮光铝膜部分损伤时的回波图

Fig.9 Echo image when shading aluminum film is damaged partly

图可见,遮光铝膜损伤面积增大时,回波中心处光强逐渐减弱,且光场分布趋于散乱.损伤区域较小时考察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率为 18.69 W;损伤区域较大时光功率为 6.07 W.

2.5 遮光铝膜层完全损伤对回波的影响

遮光铝膜被完全损伤时,硅电极及硅基底便暴露出来,激光直接辐照在硅基底和硅电极上,此时硅基底完好.因实际情况中微透镜、遮光铝膜熔融后附着在 CCD 表面,建模时在焦平面透过率函数中附加一个高斯分布的随机相位调制.

如图 10,较遮光铝膜层完好时的回波图像,中心区域汇聚的光更少,考察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率为 4.84 W.

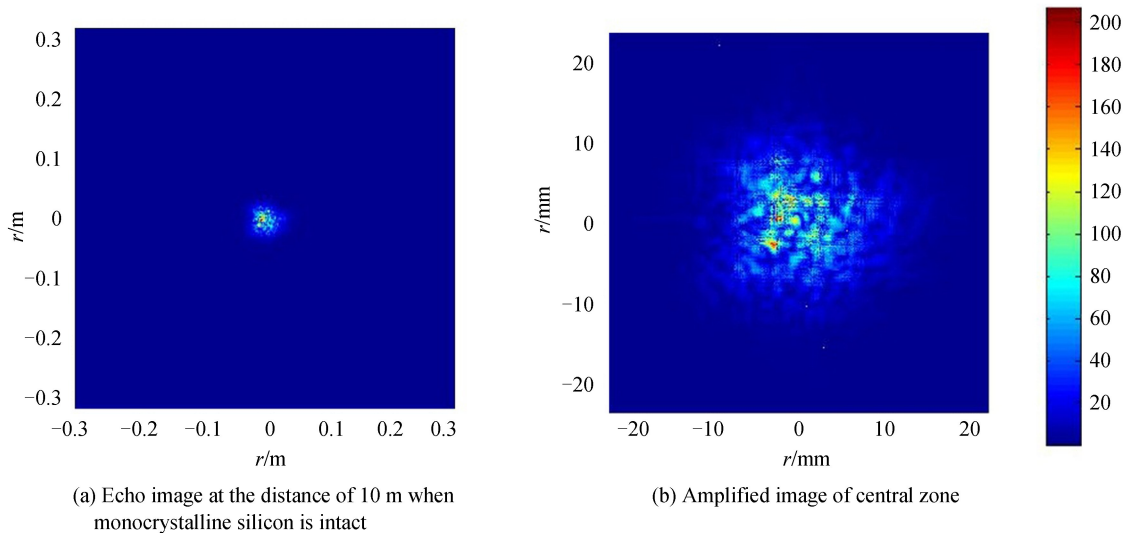


图 10 遮光铝膜完全损伤时的回波图

Fig.10 Echo image when shading aluminum film is damaged completely

2.6 硅基层完全损伤对回波的影响

根据 CCD 被激光损伤的顺序,硅基底最后被彻底损伤.单晶硅表面形成多个小孔^[17],据此在仿真计算时在硅材料表面随机分布 15 个直径为 1 μm 的小孔以模仿被损伤的单晶硅.考虑到被彻底损伤的硅基底表面粗糙,建模中选择用高斯随机表面形貌模拟其表面形貌.

从图 11 中可以发现,就接收到的回波图像而言,多个小孔结构使接收面上的光更加弥散.硅基底被彻底损伤时表面粗糙度很大,导致光在粗糙表面后向散射角度很大,光无法被全部聚焦至接收面中心处,因此考

察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率为 4.69 W.

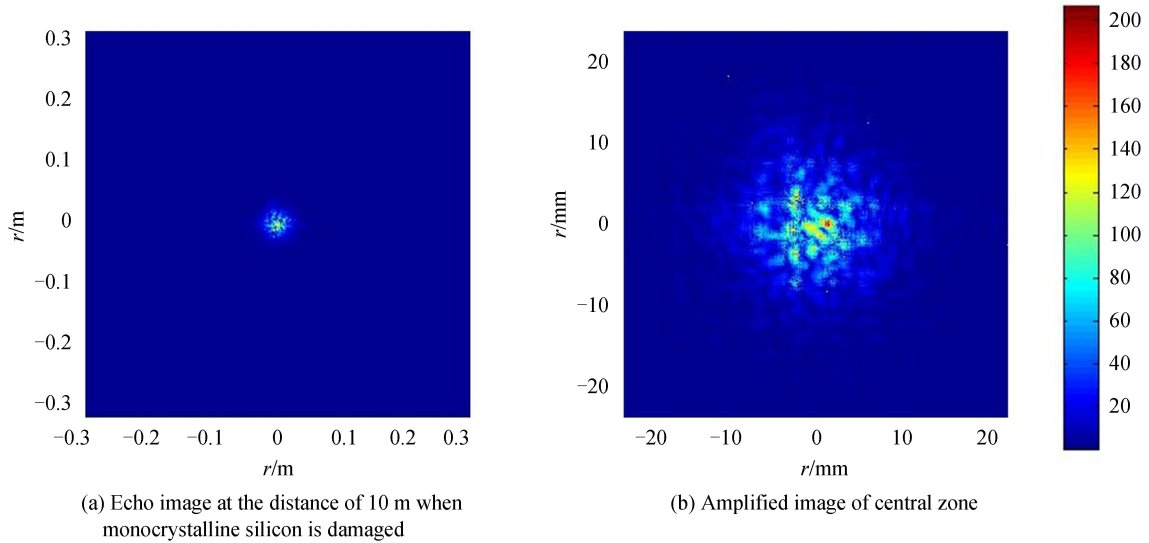


图 11 硅基底完全损伤状态下的回波图像分布图

Fig.11 The Echo image when silicon substrate is damaged completely

2.7 回波功率变化分析

激光辐照 CCD 时,其内部结构损伤顺序依次为微透镜、遮光铝膜、硅基底,当入射激光入瞳功率为 80 W 时,考察接收面中心位置边长为 20 mm 的矩形内的光功率变化如图 12.微透镜层完好时,回波功率为 10.96 W,入射激光经过微透镜后传输 10 m,光场在整个空间中呈弥散分布,大部分入射激光都散射开来,无法汇聚到接收面中心区域,因此回波功率较入瞳功率下降颇多.

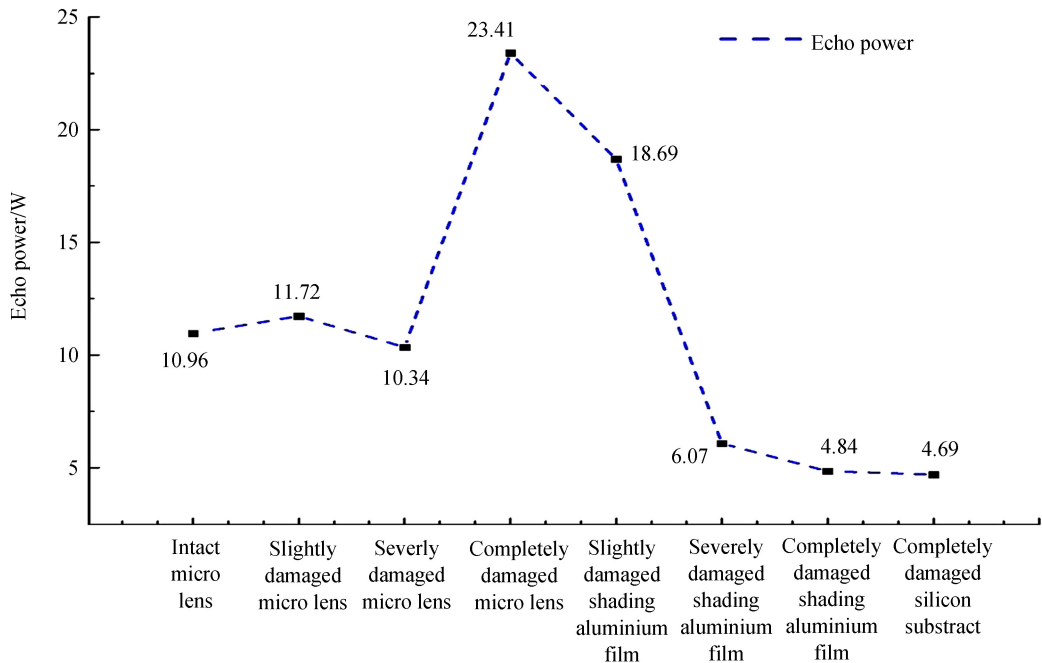


图 12 CCD 不同区域损伤回波功率变化

Fig.12 Echo power changes in different regions of CCD

微透镜层开始畸变时,入射光以各种角度斜入射至遮光铝膜层,此时光功率为 11.72 W;微透镜严重畸变时,光入射角度过大,经焦平面反射后会因出射角度过大无法进入透镜,因此无法汇聚到接收面上,此时光功率为 10.34 W.

微透镜层被彻底损伤时,入射光垂直入射遮光铝膜层,由于遮光铝膜材料对入射光的反射率可达到

90%,回波功率显著上升到 23.41 W.

遮光铝膜层开始损伤时,部分硅电极及硅基底暴露出来,焦平面透过率下降导致回波功率显著降低至 18.69 W;当遮光铝膜被损伤的面积较大时,回波功率降低至 6.07 W.

遮光铝膜层被彻底损伤后,入射光辐照于硅基底,此时设置硅基底完好,透过率的下降及较大的粗糙度使回波功率下降到 4.84 W.

硅基底被彻底损伤时表面出现许多孔状结构,入射光在其内多次反射,散射至空间中而无法聚焦至回波中心处,且因此时焦平面粗糙度最大,故回波功率有所下降,为 4.69 W.

综上所述,在 1 064 nm 激光损伤 CCD 的进程中,计算得到的回波功率呈现首先缓慢上升再下降,然后显著上升后显著下降,最后缓慢下降的规律,依据此规律可以判断 CCD 被损伤的程度.因远场条件下焦平面器件猫眼回波的横向分布过于庞大,无法通过光电探测器获得其横向分布,利用回波功率变化判断焦平面器件被损伤程度的方法显得尤为重要.

3 实验验证

3.1 实验系统

验证实验光路如图 13. Nd : YAG 连续激光用于对 CCD 芯片进行损伤, Nd : YAG 辅助脉冲激光用于对损伤后的 CCD 芯片进行回波探测,光学延迟线用于延长光路,设置 CCD 芯片与探测器间的光程为 10 m,与仿真设计相符.通过功率计可以使损伤激光功率大小保持稳定值.激光损伤 CCD 芯片后,电脑显示 CCD 此时所成的像,根据成像质量可初步判断 CCD 芯片的损伤程度,后用扫描电镜可进一步确定 CCD 的损伤形貌.将光开关的时间步长设定为 1 s,即激光作用时间每次增加 1 s,将激光作用于不同的 CCD 芯片,每块 CCD 芯片依次受到激光损伤的时间为 1 s、2 s、3 s...,直至 CCD 芯片无法成像为止.再用探测激光辐照已损伤的多个 CCD 芯片,猫眼回波经透镜收集后被探测器转化为电信号,示波器再将电信号转化为峰值电

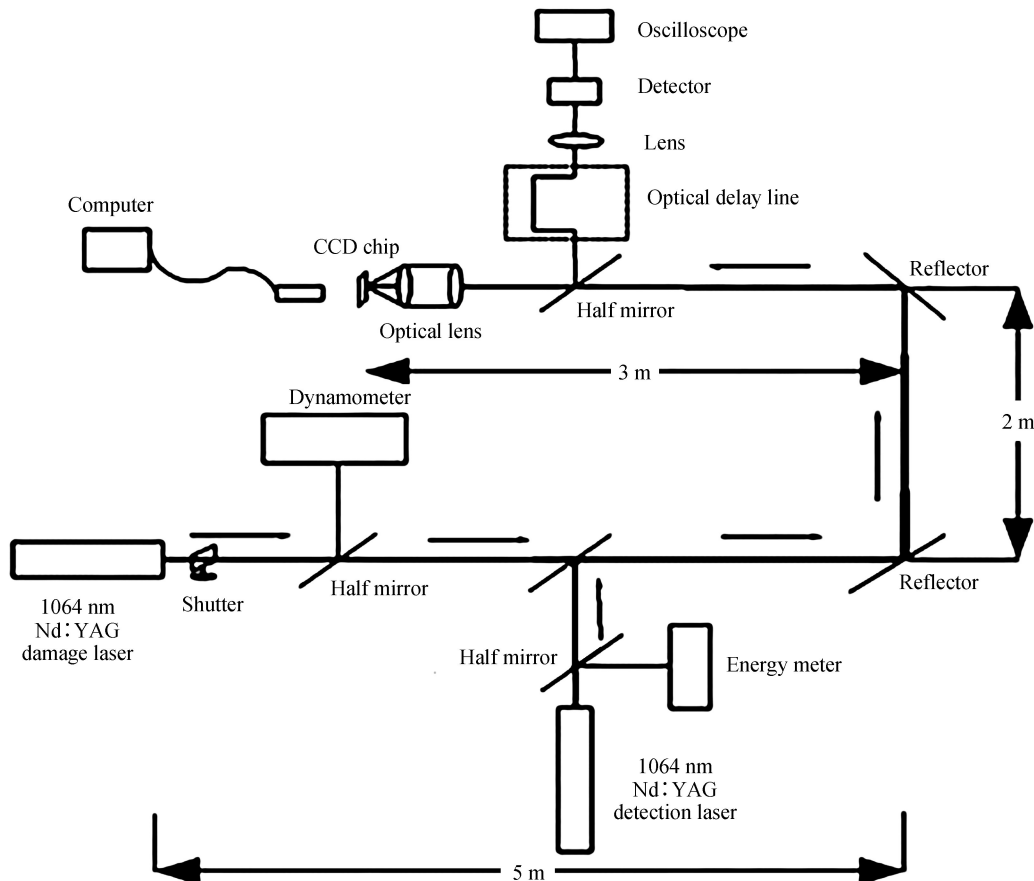


图 13 实验结构

Fig.13 Experimental structure

压.运用扫描电镜研究不同损伤程度的 CCD 片的微观损伤形貌,建立 CCD 损伤程度与回波峰值功率之间的联系.

3.2 实验结果

激光损伤 CCD 时,CCD 表面损伤形貌如图 14,设定的损伤区域与图 8 大致相同,回波峰值电压的变化如图 15.激光未入射时,微透镜完好,通过示波器测得猫眼回波的峰值电压为 2.32 V.由于微透镜的熔点仅有 473 K,激光辐照时微透镜熔融汽化速度过快,未捕捉到微透镜畸变的过程.微透镜完全损伤时激光直接辐照在遮光铝膜上,猫眼回波的峰值电压为 3.9 V;遮光铝膜损伤面积较小时,回波峰值电压降为 3.08 V;遮光铝膜严重损伤时,回波峰值电压大幅度下降至 1.67 V;遮光铝膜完全损伤且硅基底完好的情况过于理想而无法通过实验得到,但通过随着遮光铝膜损伤面积的增加回波峰值电压下降的规律可推断出峰值电压进一步下降.最终硅基底被彻底损伤时回波电压降为 1.07 V.由于电压与功率成正比关系,回波峰值电压的下降代表着回波功率的下降.通过比较图 12 与图 15 可以发现,实验现象与仿真总结的规律基本吻合.

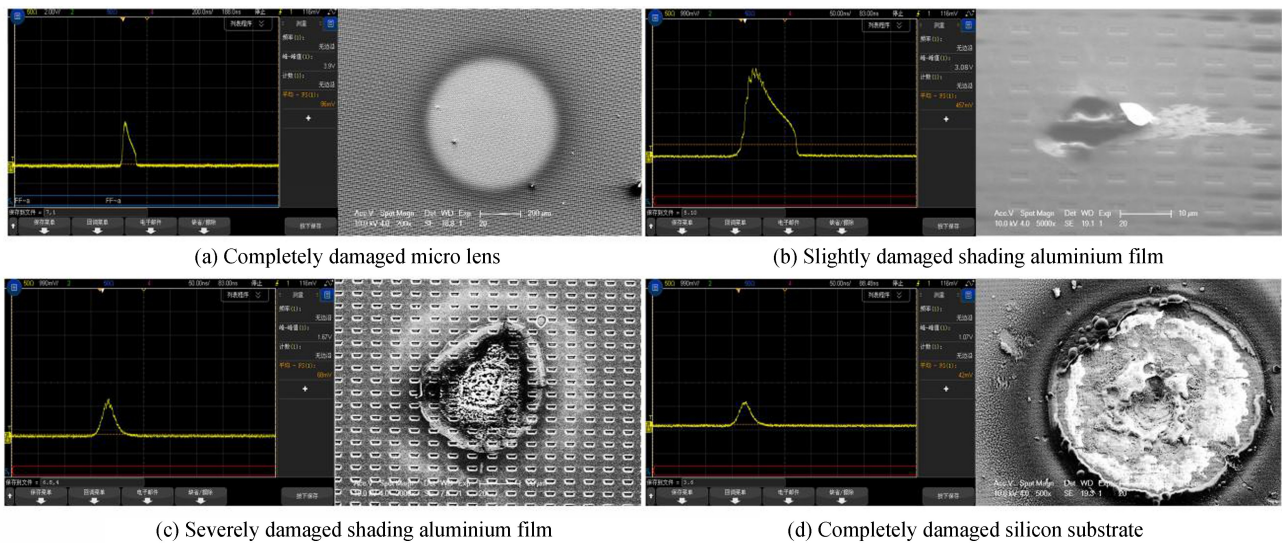


图 14 CCD 扫描电镜及回波峰值功率测量图

Fig.14 Electron microscope image and echo peak power measurement image

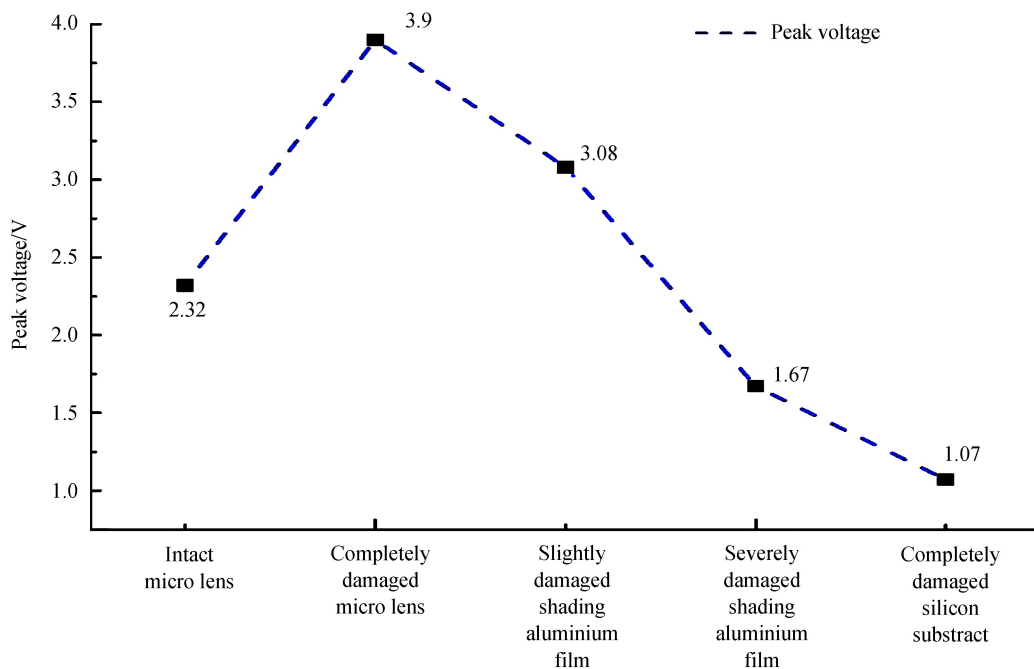


图 15 回波峰值电压变化

Fig.15 Change of echo peak voltage

4 结论

本文建立了远场条件下激光损伤 CCD 进程中探测猫眼回波的理论模型,计算分析了 CCD 结构中的微透镜层、遮光铝膜层及硅基底损伤时对回波功率的影响,并进行了实验验证.结果表明,在 CCD 成像系统被激光损伤过程中,依据微透镜层、遮光铝膜层、硅基底层被损伤的顺序,猫眼回波功率呈现出先显著上升再迅速下降最后缓慢下降的规律,实际应用时可根据回波功率的变化情况推断 CCD 被损伤区域、程度及其成像质量.研究结果对需在远场条件下探测 CCD 被损伤程度的实际情况具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] ZHANG Bo, NIU Yan-xiong, ZHANG Chu, *et al.* Analysis of influence factors for reflected wave power of 'cat-eye' target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 420-423.
张博,牛燕雄,张雏,等.“猫眼”目标回波功率的影响因素分析[J].*红外与激光工程*,2009, **38**(3):420-423.
- [2] BIN Zhou, LIU Bing-qi, WU Dong-sheng, *et al.* Research on echo energy of 'cat-eye' target based on laser's character of polarization [C].*International Conference on Electronics and Optoelectronics*, 2011, **30**(7): 302-305.
周斌,刘秉琦,武东升,等.利用 CCD 实现“猫眼”目标探测的实验研究[J].*光电工程*,2011,**38**(11):35-39.
- [3] MA Hao-zhou. Study on the reflective characteristics of the targets and the 'cat's eye' effect[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6): 600-602.
马浩洲.目标反射特性与“猫眼”效应研究[J].*激光技术*,2003,**27**(6):600-602.
- [4] JIANG Zhi-guo, TAN Ji-chun, LIANG Jin, *et al.* Suitability of "cat's eye" effect for reconnaissance by the scanning laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 549-551.
蒋治国,谭吉春,梁晶,等.“猫眼”效应用于主动式激光侦察的适用条件分析[J].*激光技术*,2005,**29**(5):549-551.
- [5] GE Cheng-liang, HUANG Zhi-wei, JI Yun-song, *et al.* Target classification with cat eye effect[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(7): 632-634.
葛成良,黄志伟,季云松,等.基于“猫眼”效应的目标识别[J].*强激光与粒子束*,2003,**15**(7):632-634.
- [6] ZHAO Yan-zhong, SUN Hua-yan, SHAN Cong-miao. A new identification method aimed at optical targets using an active interference laser beam[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(10): 1019-1022.
- [7] TITERTON D H. A review of the development of optical countermeasures[C]. SPIE, 2014, **5615**: 1-15.
- [8] ZHAO Yan-zhong, SUN Hua-yan, ZHENG Yong-hui. An approximate analytical propagation formula for Gaussian beams through a cat-eye optical lens under large incidence angle condition[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, **28**(7): 1-4.
- [9] MIEREMETA L, SCHLEIJPEN R M A, van PUTTEN F J M. Retroreflection reduction by masking apertures[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(4): 1-11.
- [10] ZHAO Yan-zhong, SUN Hua-yan, ZHENG Yong-hui. Time distribution characteristics of cat-eye reflected light from moving optical target[J].*Optoelectronics Letters*, 2011**7**(5): 0397-0400.
- [11] SUN Hua-yan, ZHAO Yan-zhong, ZHENG Yong-hui. Research and application of active laser detection technique based on cat-eye effect[J]. *Journal of Academy of Equipment*, 2012, **23**(6): 6-13.
孙华燕,赵延伸,郑勇辉.基于猫眼效应的激光主动探测技术研究与应用[J].*装备学院学报*,2012, **23**(6): 302-305.
- [12] YANG Ming-yu. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(2): 255-262.
杨名宇.利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测[J].*中国光学*,2015,**8**(2):255-262.
- [13] SHI Guang, ZHANG Hai-yang, GENG Zhong-bo, *et al.* Experiment of large field laser active detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4): 890-894.
时光,张海洋,耿仲博,等.大视场激光主动探测系统实验[J].*红外与激光工程*,2013,**42**(4):890-894.
- [14] GU Suo-ling, SUN Hua-yan. Laser active detection of aerial target[J]. *Laser and Infrared*,2005, **35**(7): 476-478.
谷锁林,孙华燕.空中目标的激光主动探测[J].*激光与红外*,2005,**35**(7):476-478.
- [15] SHAO Li, JIAO Yang. An accurate positioning method for optical satellite[J]. *Electronics Optics and Control*, 2007, **14**(2): 96-100.
邵立,焦洋.一种对光学卫星精确定位的方法[J].*电光与控制*,2007,**14**(2):96-100.
- [16] LEI Peng, SUN Ke, ZHANG Yu-fa, *et al.* Cat's eye echo-wave characteristics of staring photoelectric imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0614004.
雷鹏,孙可,张玉发,等.凝视光电成像系统猫眼回波特性的理论与实验研究[J].*光子学报*,2016,**45**(6):0614004.
- [17] LEI Peng, SUN Ke, ZHANG Yu-fa, *et al.* Cat's eye echo detecting the damage evolution of silicon induced by 1.06 μm laser[J].*Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(12): 1206007.
雷鹏,孙可,张玉发,等.猫眼回波探测 1.06 μm 激光引发硅的损伤演化[J].*红外与激光工程*,2016,**45**(12):1206007.
- [18] LEI Peng, SUN Ke, LI Hua, *et al.* Experimental study on the change of cat eye echo pattern with laser damage of CMOS detector[J].*Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(6): 0601001.

- 雷鹏,孙可,李化,等. 猫眼回波图像随 CMOS 器件激光损伤变化的实验研究[J]. 中国激光, 2016, **43**(6):0601001.
- [19] MIN Han, XI Wang, NIE Jin-song, *et al.* Temporal evolution characteristics and damage threshold of CCD detector irradiated by 1.06- μm continuous laser[J]. *Optik*, 2018, **3**(157): 1282-1291.
- [20] LIU Man, CHEN Chan-fu, SONG Hong-sheng. Phase singularities of speckle field produced by the scattering from Gaussian correlation random surfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(8): 5376-5384
- 刘曼,程传福,宋洪胜.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.

Foundation item: National "13th Five-Year Equipment" Advance Research Project(No.30603040207)

引用格式: ZHANG Ming-xin, NIE Jin-song, DOU Xian-an, *et al.* Echo of the Optical Imaging System under Different Extent of Damage to CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0904003

张明鑫,聂劲松,豆贤安,等.CCD不同损伤状态下光学成像系统猫眼回波[J].光子学报,2018,**47**(9):0904003