

## 猫眼回波探测 1.06 $\mu\text{m}$ 激光引发硅的损伤演化

雷 鹏, 孙 可, 张玉发, 聂劲松, 孙晓泉

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

**摘 要:** 利用猫眼回波的变化研究焦平面上硅在激光辐照下的损伤演化。随着激光辐照时间的增加, 回波图像出现抖动, 产生新的纹理, 判定焦平面上硅受到损伤。损伤对应的回波图像面积不断扩大, 损伤区内光斑结构逐渐变得复杂, 且光斑面积不断减小, 最终形成动态稳定的损伤回波图像。依据回波图像的变化分析硅的损伤形貌, 依次出现表面氧化、小尺度形貌损伤、损伤面积扩大等现象。初步分析了回波图像纹理特征与焦平面上硅损伤形貌的对应关系, 认为回波图像损伤区光斑的自相关性与其角二阶矩随着损伤形貌粗糙度的增大而减小。

**关键词:** 猫眼回波; 微观损伤形貌; 演化; 纹理特征

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1206007

## Cat's eye echo detecting the damage evolution of silicon induced by 1.06 $\mu\text{m}$ laser

Lei Peng, Sun Ke, Zhang Yufa, Nie Jinsong, Sun Xiaoquan

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology(Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China)

**Abstract:** Detecting silicon damage evolution induced by laser irradiation on the focal plane was researched through the change of cat's eye echo. With the time increase of laser irradiation, the echo images started to shake and new texture appeared, which indicate the silicon was damaged. The area of echo images corresponding to the silicon damage expanded unceasingly. The facular structure in the damaged echo image became complicated and the facular area became smaller. The damaged echo image was dynamic stability under the laser irradiation at last. According to the change of echo images, the silicon damage morphology were analyzed. The phenomena of surface oxidation, small scale damage and the expanding of damaged area were observed. The corresponding relationship between the echo image texture feature and the silicon damage morphology was analyzed preliminarily. The correlation and angular second moment would be decreased if the roughness of the damage morphology increased.

**Key words:** cat's eye echo-wave; micro damage morphology; evolution; texture feature

收稿日期: 2016-04-07; 修订日期: 2016-05-06

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室基金(SKL2014ZR06)

作者简介: 雷鹏(1987-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为激光应用技术。Email: leipeng0214@sina.com

通信作者: 孙晓泉(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光应用技术。Email: sun\_xq@yahoo.com

## 0 引言

激光对物质的辐照效应与激光的工作参数密切相关,形成的表面损伤形貌也各不相同。目前对于激光损伤物质引起的微观形貌变化大多通过光学显微镜和电镜扫描等技术手段进行探测,以分析激光辐照下物质的损伤特性<sup>[1-3]</sup>。此外,在实验过程中往往需要获得尽可能多的信息,如利用激光散射法<sup>[4-5]</sup>、等离子体闪光法<sup>[6]</sup>测量物质的激光损伤阈值,利用脉冲激光研究物质损伤的演化过程<sup>[7]</sup>等。上述实验方法在脉冲激光作用的前提下具有很好的实验预期,因为脉冲激光对物质的作用在能量和脉冲数上都较容易控制,能够将细微的形貌变化分辨出来。然而对于连续以及高重频激光作用条件下的物质形态变化研究有一定的难度,由于激光对物质的作用是连续进行的,物质形态的变化也是无间断的,这使得利用常规方法分析其损伤演化具有较大的误差。

文中建立了猫眼回波探测物质损伤演化的实验系统,利用回波图像的变化判断焦平面上物质的形貌改变,研究了 5 kHz 重频 1.06 μm 激光对硅损伤的演化过程。实验中硅的损伤主要是由激光辐照产生的热效应引起,表面依次出现了氧化、小尺度形貌损伤、损伤面积扩大等现象,初步分析了回波图像与焦平面上硅微观损伤形貌的对应关系。

## 1 实验系统

实验总体布局如图 1 所示,半导体泵浦的 Nd:YAG 激光器输出 1.06 μm 重频激光作为主光束对猫眼系统焦平面上的硅进行损伤,激光器距离猫眼光学镜头 4 m。辅助照明光束采用 532 nm 波长激光便于观察回波图像,激光器距离猫眼光学镜头 20 m。二者通过半透半反镜合束在同一光路上。光学镜头焦距为 50 mm,对应  $F$  数为 1.8。实验系统具有两个观察靶面,距离猫眼光学镜头均为 20 m:靶面 1 在辅助光束激光器前面,中心有小孔便于辅助光束通过,由于分光棱镜的激光损伤阈值较低,在主光束对硅进行损伤时将分光棱镜移开,猫眼回波出现在靶面 1 上,可以观察硅损伤时回波图像的动态变化;主光束停止作用时,将分光棱镜放置在光学镜头前面,在靶面 2 上观察回波图像,靶面 2 没有小孔,减少了回波

图像的观测误差。重频激光采用声光调制组件,工作频率为 5 kHz。

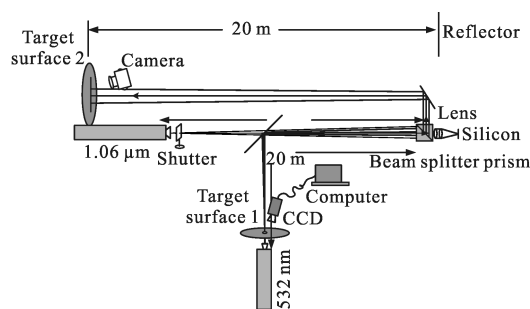


图 1 实验结构图

Fig.1 Experimental structure

## 2 实验现象

利用猫眼回波观察激光对硅的损伤过程,确定其损伤阈值入瞳功率为 4.83 W。硅发生损伤以后,随着辐照时间的增加,回波图像发生变化并达到新的动态平衡。而随着激光功率的增加,回波图像达到新的动态平衡所用时间迅速缩短。为了研究硅在激光辐照下的损伤变化,需要得到较为清晰的回波图像变化过程,实验采用阈值功率激光进行辐照。激光光斑如图 2 所示,由于所用光束质量分析仪采用 CCD 探测器,激光的辐照产生了微弱的串扰现象,实验发现不同功率的激光光斑分布有所改变,但固定功率激光的输出,其光斑分布同样稳定,这是由晶体热效应引起。激光器出口处的光斑半径为 1.75 mm,激光束发散角为 3.6 mrad。

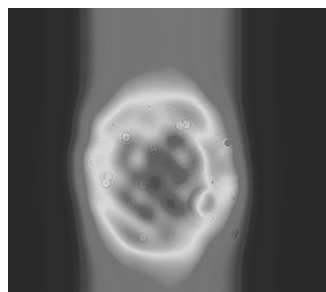


图 2 1.06 μm 激光光斑分布

Fig.2 Speckle distribution of 1.06 μm laser

图 3 是激光对硅损伤过程中回波图像动态变化录像截图,回波图像光斑略呈椭圆形,是由于辅助照明激光光斑是椭圆结构。主激光刚开始辐照时,辅助照明激光的回波没有明显的变化,如图 3(a)所示。硅

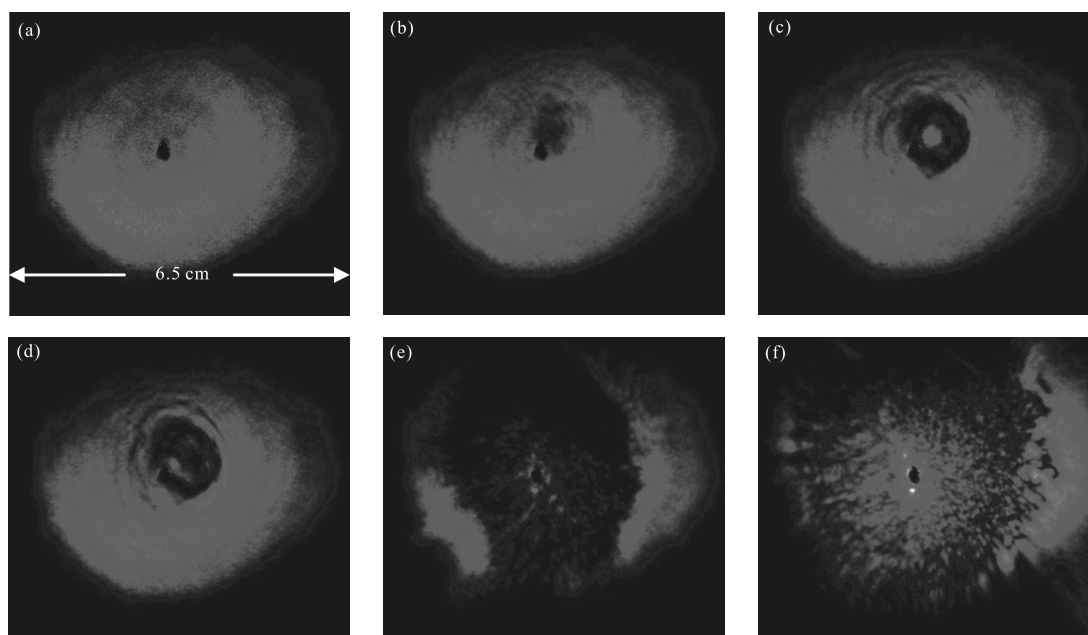


图 3 回波图像的动态变化(a)正常回波图像(b)出现暗斑(c)出现亮斑(d)亮斑分裂(e)细小光斑(f)动态稳定

Fig.3 Dynamic change of echo image (a) normal echo images (b) dark spot (c) bright spot appears (d) bright spot division (e) tiny spot (f) dynamic stability

开始受到损伤时,回波图像中出现环状波纹,之后迅速扩散,中心产生亮暗交替的光斑,但最终分裂成细碎的小光斑。

猫眼回波的变化反映了激光对硅的损伤过程,而通过观察猫眼回波图像的变化,可以控制实验的进程,研究硅不同的损伤状态,下面将以猫眼回波与相应的微观损伤形貌作进一步说明。

图 4(a)是刚出现环状波纹,中心即将变暗的回波图像。激光辐照处的电镜扫描图像如图 4(b)所示,表面出现了微小的突起结构,边界随机分布,认为此时的硅表面已经被加热熔融,突起的结构应该是硅在熔化后再次凝结时形成。其光学显微镜下的成像照片如图 4(c),激光辐照区域表面也出现了深灰色

区域,而图 4(b)中的微小突起在光学显微镜下并不明显。

随着激光辐照时间的增加,回波图像中的圆环波纹和暗斑扩散,中心出现亮斑,如图 5(a)所示。电镜扫描图像显示损伤区域出现圆环状裂纹,周围形貌凹凸不平,环内有明显硅熔融后再次凝固的痕迹,认为圆环裂纹的出现是由于硅在激光辐照时出现融化,而激光停止辐照时温度急剧下降热胀冷缩形成的。光学显微镜成像显示损伤区域由两个同心圆环组成,两环之间出现了浅蓝色的环带。

图 6 中的回波图像与图 5 相似,而电镜扫描图像显示其微观损伤形貌与图 5 具有较大的差别,出现不规则的熔融形貌,表面的凹凸尺度也比图 5(b)大。光

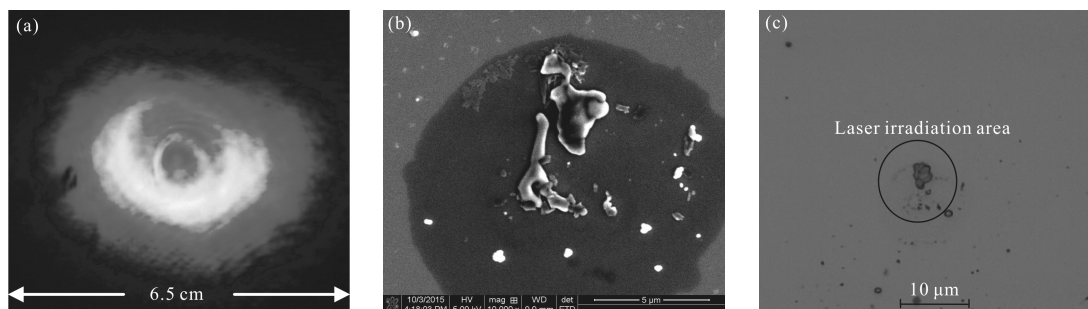


图 4 环状波纹回波图像与微小熔融损伤形貌(a)回波图像(b)电镜扫描图像(c)光学显微镜成像

Fig.4 Annular corrugated in the echo image and tiny molten damage on the silicon surface (a) echo image (b) electron microscope scanning image (c) optical microscope image

学显微镜成像中,损伤区域同样由两道暗环组成。

表面形貌出现损伤过后,从回波图像观察,其损伤面积会迅速扩大,如图 7(a)所示,暗环里的圆斑开始分裂,图中白线标定区域将用于后文纹理计算,下同。电镜扫描图像显示损伤区表面出现密集的球状凝固体。从光学显微镜成像可知,辐照区表面出现斑点损伤,与图 7(b)中较大体积的损伤点位置还是一一对应的,在辐照区未出现损伤的表面,背景呈深蓝色。

图 8 中,损伤对应的回波光斑轮廓清晰,数量明显增多。微观损伤形貌的电镜扫描图像中,颗粒已经

突出于硅的表面,而从颗粒的间隙能够发现低于硅表面的深坑。光学显微镜图像显示其损伤区内表面出现较大面积的完全损伤,表面形貌模糊,外围为彩色渐变的环状表面。

对图 9 中两幅回波图像的对比,损伤区域回波均是由随机分布的细小光点组成。而相应的电镜扫描图像中,损伤区域均出现细小的颗粒。将损伤局部区域放大,图 9(c)中颗粒体积似乎略大于图 9(f),同时图 9(f)颗粒表面普遍具有更加细小的纹路,尺度大小与辅助照明激光波长可比拟。在光学显微镜下

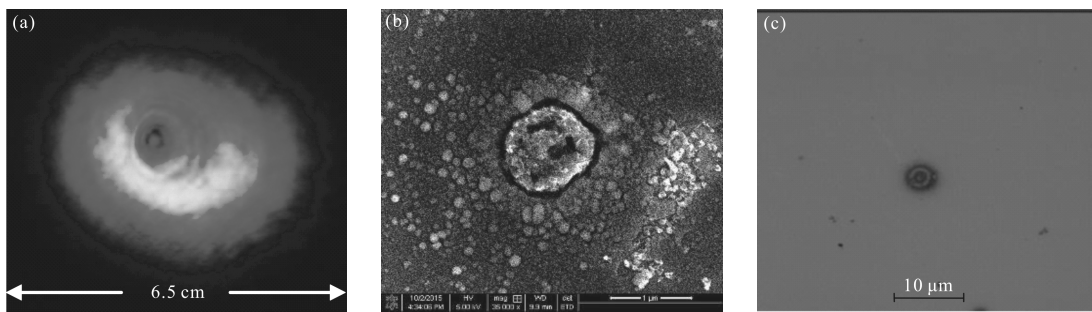


图 5 亮斑回波图像与小尺度圆环裂纹损伤形貌 (a)回波图像(b)电镜扫描图像(c)光学显微镜成像

Fig.5 Bright facular in the echo image and tiny ring crack damage on the silicon surface (a) echo image(b) electron microscope scanning image (c)optical microscope image

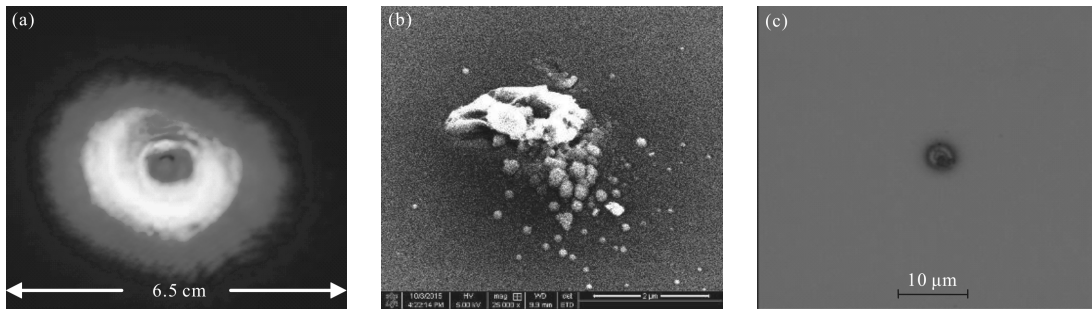


图 6 亮斑回波图像与小尺度表面熔融损伤形貌 (a)回波图像(b)电镜扫描图像(c)光学显微镜成像

Fig.6 Bright facular in the echo image and tiny molten damage on the silicon surface (a) echo image(b) electron microscope scanning image (c)optical microscope image

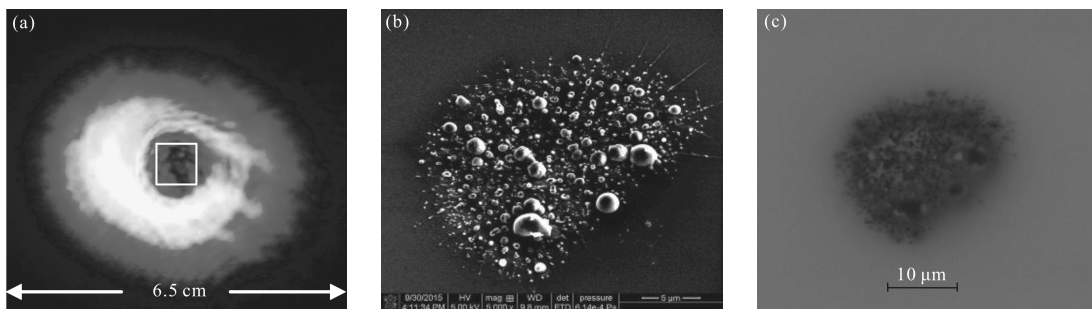


图 7 亮斑分裂回波图像与密集凝固体损伤形貌 (a)回波图像(b)电镜扫描图像(c)光学显微镜成像

Fig.7 Bright facular division in the echo image and intensive solidification on the silicon surface (a) echo image(b) electron microscope scanning image(c)optical microscope image

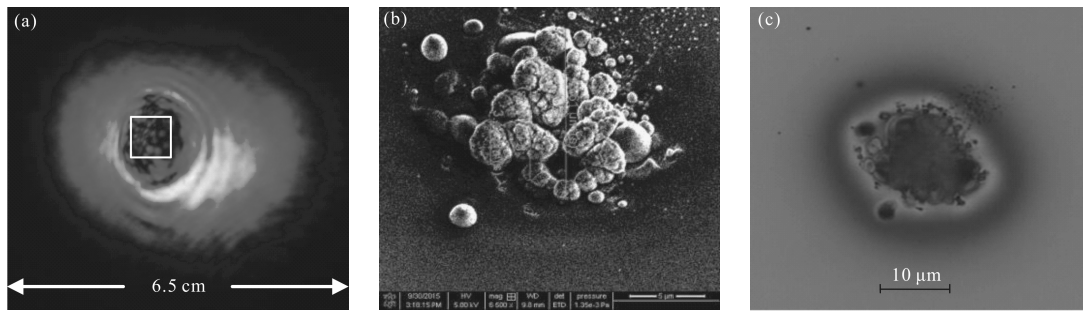


图 8 细小光斑回波图像与颗粒损伤形貌 (a)回波图像(b)电镜扫描图像(c)光学显微镜成像

Fig.8 Tiny spot in the echo image and particles on the silicon surface (a) echo image(b) electron microscope scanning image(c) optical microscope image

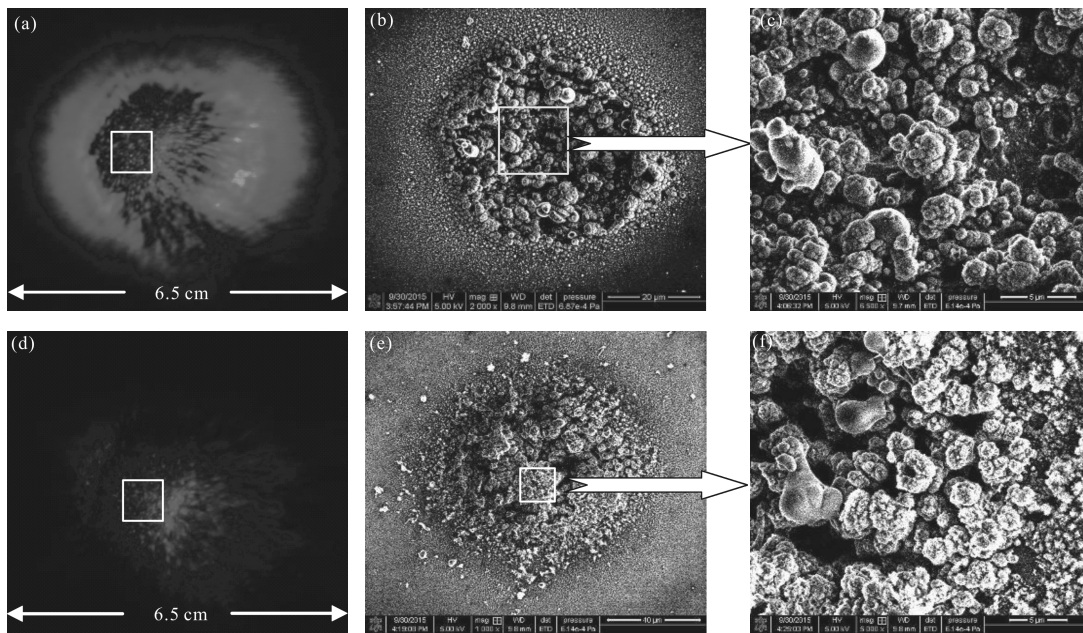


图 9 细小光斑回波图像与不同小尺度颗粒损伤形貌 (a)回波图像(b)电镜扫描图像(c)光学显微镜成像(d)回波图像(e)电镜扫描图像(f)光学显微镜成像

Fig.9 Tiny spot in the echo image and smaller particles with different volume on the silicon surface (a) and(d) is the echo image , (b)and(e) is the electron microscope scanning image (c) and(f) is the optical microscope image

观察两个损伤区域的微观形貌,表面凹凸不平,但细节模糊,二者没有太大的区别。

的增加,但此时表面的主要成分依然是硅;损伤区颗粒(谱图 5)的元素构成中,O 已经是主要成分。

### 3 实验分析

部分损伤区域的光学显微镜成像中出现彩色表面,在电镜扫描图像中分辨并不明显,认为是由于具体形貌没有改变,但是硅表面的光学特性发生变化。对图 8 微观损伤形貌表面不同位置进行元素分析,如图 10,测试结果如表 1 所示。在无损伤硅表面(谱图 1)只含有 Si;损伤区域外围(谱图 2),有了少量 O 的存在;对于光学显微镜中蓝白色外环所在的位置(谱图 3 和谱图 4)O 的含量相差不大,均有较大比例

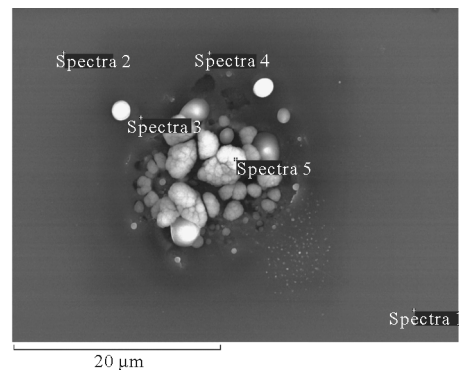


图 10 不同位置的元素分析

Fig.10 Element analysis at different locations

表 1 损伤区不同位置的元素成分

Tab.1 Element analysis at different locations of damaged area

	Spectra 1	Spectra 2	Spectra 3	Spectra 4	Spectra 5
Si	100%	93.18%	71.22%	78.39%	28.09%
O	0	6.82%	28.78%	21.61%	71.91%

表 1 显示,激光对硅进行辐照,使硅表面被加热氧化,且在熔融状态下硅的氧化比例越高。损伤区出现彩色表面,应该是表面形成氧化薄膜,产生薄膜干涉。电镜扫描图像对物质表面的形态变化敏感,但对材料成分出现的细小差别分辨率较低,因而对周围损伤区域的氧化表面分辨不明显。

对于图 5(a)~图 6(a)的猫眼回波,电镜扫描图像显示其微观损伤形貌并不相同,但是猫眼回波图像并没有明显的区别,损伤图像中心均为圆斑,认为这与猫眼系统的分辨极限有关。根据相关参数,光学镜头在焦平面上的衍射极限直径为  $2.33 \mu\text{m}$ ,而对于图 5(b)~图 6(b)的微观形貌总损伤尺度在  $2 \mu\text{m}$  左右,因此,即使各损伤点具有不同的损伤形貌,由于范围在镜头的衍射极限光斑直径以内,回波图像并不能对此进行分辨,而只能对总的损伤点进行响应,即为小面圆的菲涅耳衍射,不同的面圆大小影响回波图像中心的亮暗变化<sup>[9]</sup>,所以损伤回波中心出现暗斑与亮斑的转化,周围出现衍射圆环。

当微观损伤形貌的颗粒尺度大于镜头的分辨极限时,损伤对应的回波图像中心出现细小的光斑。根据图 7~图 9 中的回波图像与微观损伤形貌的对比,二者没有直观的联系,即不能从回波图像直接推断出微观损伤形貌。根据激光散斑理论,认为相干光照明漫反射表面,反射光会形成对比度高而尺寸细微的光斑,这是由于不同照明点对观察点光场均有独立的复振幅贡献<sup>[9]</sup>。虽然文中激光损伤的微观形貌大部分都不是漫反射表面,由于各颗粒对光的衍射,回波图像损伤光斑已经是表面各颗粒相互影响的结果,因此,回波图像与微观损伤形貌没有直观的联系。但是从回波图像以及微观损伤形貌的变化发现二者也有一定的相关性,如对图 7~图 9 中标定的损伤对应回波图像进行纹理分析,计算损伤区光斑的自相关性、角二阶矩,结果如表 2 所示。

从表 2 中数据可知,图 7 中标定的损伤区回波

表 2 损伤对应回波图像的相关性与角二阶矩

Tab.2 Correlation and angular second moment of echo images corresponding to damaged area

	Fig.7	Fig.8	Fig.9(a)	Fig.9(d)
Correlation	0.483	-0.089	0.185	0.265
Angular second moment	6.0266e-004	1.9899e-004	2.4510e-004	3.7885e-004

光斑自相关性最强,图 9(a)和(b)自相关性次之,而图 8 的自相关性最低。根据微观损伤形貌的比较分析,图 8(b)损伤颗粒体积最大,表面形貌起伏以及横向尺度都高于其他三组损伤图像,即局部形貌的粗糙度较大,回波图像的自相关性最低;图 9 两组图像的微观损伤形貌粗糙度明显大于图 7,回波图像的损伤区光斑自相关性也低于图 7。因此,回波图像损伤区光斑的自相关性与微观损伤形貌的粗糙度呈负相关变化,这与有关文献的研究结论是相符的<sup>[10]</sup>。角二阶矩的变化趋势与自相关性相同,也是由于粗糙度增大使回波图像纹理加粗,灰度分布不均匀,能量值减小。图 9(a)中损伤区回波光斑的自相关性和角二阶矩值均小于图 9(d),说明图 9(b)的微观损伤形貌粗糙度大于图 9(e),通过猫眼回波的纹理分析,可以将对比并不明显的微观损伤形貌分辨出来。

## 4 结 论

利用猫眼回波探测激光对硅的损伤演化,回波图像随着硅损伤程度的加深出现环状波纹,环内光斑变暗,暗斑迅速扩散,在暗斑里面又出现了不同结构的小光斑。

从实验分析可知,回波图像与损伤形貌具有一定的对应关系,当损伤尺度过小时,超出了猫眼系统的分辨极限,回波图像只能显示硅表面出现了损伤,不能对损伤结构进行识别,但此时为激光对硅损伤的初始阶段,损伤区域很小,一般为表面出现氧化以及形成细小的熔融损伤点,损伤形貌较为简单。随着辐照时间的增加,表面的凝固颗粒逐渐增多,回波图像损伤区内出现细小的光斑,结构不断变化,对应于硅表面颗粒形貌的变化,认为光斑的纹理自相关性与角二阶矩随着损伤形貌粗糙度的增大而减小。

## 参考文献:

- [1] Liu Hongjie, Zhou Xinda, Huang Jin, et al. Comparison of damage between front and rear surfaces under nanosecond 355 nm laser irradiation on fused silica [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 065202. (in Chinese)  
刘红婕, 周信达, 黄进, 等. 355 nm 纳秒紫外激光辐照下熔石英前后表面损伤的对比研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 065202.
- [2] Chen C S, Liu A H, Sun G, et al. Analysis of laser damage threshold and morphological changes at the surface of a HgCdTe crystal [J]. *Journal of Optics a: Pure and Applied Optics*, 2006, 8(1): 88-92.
- [3] Chang Liyang, Li Xiaohong, Qiu Rong, et al. Surface microstructures and photoluminescence characteristics of monocrystalline silicon irradiated by 532 nm nanosecond laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2599-2603. (in Chinese)  
常利阳, 李晓红, 邱荣, 等. 532 nm 纳秒激光辐照下的单晶硅表面微结构及荧光特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2599-2603.
- [4] Fu Bo, Zhang Cuijuan, Luo Fei, et al. Studies on pulsed laser induced damage of silicon on insulator material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1413-1417. (in Chinese)  
付博, 张翠娟, 罗飞, 等. 脉冲激光对绝缘体上硅材料的损伤机理研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1413-1417.
- [5] Lou Jun, Su Junhong, Xu Junqi, et al. Laser-induced damage threshold detection for optical thin films by scattered light of He-Ne laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 131-135. (in Chinese)  
娄俊, 苏俊宏, 徐均琪, 等. He-Ne 散射光检测光学薄膜激光损伤阈值[J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 131-135.
- [6] Ni Xiaowu, Lu Jian, He Anzhi. New definition of laser damage threshold of thin film [J]. *SPIE*, 1991, 1519(pt1): 365-369. (in Chinese)
- [7] Yuan Chunhua, Li Xiaohong, Tang Duochang, et al. Evolution of silicon surface microstructure induced by Nd: YAG nanosecond laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7015-7019. (in Chinese)  
袁春华, 李晓红, 唐多昌, 等. Nd: YAG 纳秒激光诱导硅表面微结构的演化[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 7015-7019.
- [8] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optical[M]. Beijing: Peking University Press, 2008: 202-205. (in Chinese)  
赵凯华, 钟锡华. *光学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 202-205.
- [9] Cao Qizhi, Chen Jiabi. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-5. (in Chinese)  
曹其智, 陈家璧. *光学中的散斑现象: 理论与应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-5.
- [10] Feng Jian. Studies on the surface roughness with texture analysis of laser speckle images[D]. Yantai: Yantai University, 2007. (in Chinese)  
冯建. 基于激光散斑图像纹理分析的表面粗糙度研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2007.