

# 不同脉宽皮秒激光对介质膜损伤修复的热影响

熊智敏 张攀政\* 范 薇 汪小超 黄大杰 李学春

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光与物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要** 为了更深层次探究超短脉冲激光对惯性约束聚变(ICF)光学系统中常见的多膜层元件损伤修复性能以及特点,分别采用了 240、35、6 ps 的 1053 nm 激光脉冲在 1053 nm 0°高反膜上进行了损伤修复以及损伤增长测试实验,并在 1053 nm 45°高反膜上进行了大损伤区域的扫描修复实验。通过比较不同脉宽的修复点形貌以及损伤增长阈值,说明了超短脉冲用于修复多膜层光学元件损伤的优越性,并且脉宽越短修复效果越好。多点脉冲扫描修复结果表明,可以通过三维控制系统来任意控制扫描修复点形貌以达到最佳修复状态。

**关键词** 薄膜;超快光学;多膜层光学元件损伤;扫描修复

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0803005

## Heat Affection of Pico-Second Laser Irradiation with Different Widths on the Dielectric Film Damage Ablation

Xiong Zhimin Zhang Panzheng Fan Wei Wang Xiaochao Huang Dajie Li Xuechun

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In order to deeply explore the damage characteristic and damage morphology of multi-layer optical components in inertial confinement fusion (ICF) optical system, 1053 nm laser pulses with different widths of 240, 35, 6 ps have been used to research damage ablation and damage resistant experiments at large area damage pits at 45° high reflection film. By comparing the morphology and damage resistant threshold of the ablation pits at different pulse widths, the results show that it is superior to use ultra-short pulse to repair multi-layers optical components, and the shorter pulse width is used, the better results can be got. The results of scanning ablation indicate that with the help of three-dimensional control system, the better repairing status can be got by changing the shape of the ablation pits.

**Key words** thin films; ultrafast optics; damage of multi-layers optical components; scanning repairing

**OCIS codes** 510.20; 140.3055; 140.3099

## 1 引 言

用于惯性约束聚变(ICF)的高功率激光系统具有非常高的能量,往往接近光学元件的损伤阈值,因而对强激光诱导元件的损伤、损伤点增长控制以及损伤阈值提高等问题的研究有着重要的意义。另外,提高元件的损伤阈值可有效延长光学元件的使用寿命,降低大型激光装置的运行成本和维护成本。

光学元件体内吸收性缺陷、杂质或者表面加工

造成的缺陷,在激光照射下会产生损伤<sup>[1]</sup>。对光学元件的修复方式很多<sup>[2~7]</sup>,目前对介质膜层损伤点修复主要是用超短脉冲将原来不规则的损伤点切除,形成一个规则的修复坑,并且修复坑在光场辐照下不继续扩大,后场调制效果不明显。

超短脉冲激光修复技术的最大优点是几乎没有热沉<sup>[8]</sup>,对加工区域周边材料不产生热冲击损伤,加工可控精度高。当光强达到一定数值( $\sim 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>)<sup>[9]</sup>时,

**收稿日期**: 2012-02-28; **收到修改稿日期**: 2012-05-02

**作者简介**: 熊智敏(1987—),男,硕士研究生,主要从事超短脉冲激光对多膜层元件表面损伤修复方面的研究。

E-mail: timefateself@163.com

**导师简介**: 范 薇(1975—),女,研究员,硕士生导师,主要从事激光脉冲整形方面的研究。E-mail: fanweil@siom.ac.cn

\* **通信联系人**。E-mail: nwpuzhangpanzheng@163.com

产生多光子电离。对于超短超强脉冲,电子加热的速率(单电子加热速率与入射光强和光波长成正比,和电子寿命成反比)可以高达每飞秒几个电子伏特<sup>[9]</sup>,而能量从电子到晶格的传输速率大约只有0.01 eV/ps,要远远小于电子的加热速率。当电子获得足够大的速度以后,与相邻分子发生碰撞,产生新的自由电子。这种多光子电离、电子加速、碰撞电离的过程一直持续,随着自由电子密度的不断增大,物质开始表现出电子等离子体的特性。当局部电子体密度达到临界值,入射激光能量几乎全部被高温等离子体吸收,等离子体区域不再扩大,同时高温高密度的等离子体被临界面反射,等离子体迅速膨胀,物质以气态进入空间,最终激光束中能量超过多光子电离要求的辐照区域形成整齐的加工坑。

本文主要讨论皮秒脉冲修复薄膜元件损伤点特性,通过对比240、35、6 ps脉冲在0°和45°(1053 nm)高反膜上修复产生的热效应,说明超短脉冲激光修复的可行性和优越性,并通过激光扫描点阵方式实

现大区域损伤的初步修复。

## 2 实 验

根据 Chichkov 等<sup>[10,11]</sup>的研究表明,皮秒超短脉冲加工过程中的热沉积与脉冲宽度以及脉冲能量有着密切的联系,具体表现为

$$T_e(\tau_L) \approx \frac{I_a \alpha}{\gamma} \exp(-\alpha z), \quad (1)$$

$$T_i(\tau_L) \approx \frac{I_a \tau_L \alpha}{C_i} \exp(-\alpha z). \quad (2)$$

式中  $T_e, T_i$  分别为电子与晶格的温度,  $I_a$  为入射光强度,  $\tau_L$  为脉冲宽度,  $\alpha$  为材料吸收系数,  $C_i$  为晶格比热容,  $z$  为光传播距离,  $\gamma$  为电子与晶格的耦合系数。

从(1)式和(2)式可以看出,超短脉冲在对材料进行切割加工过程中,吸收的热与光强和脉冲宽度相关。脉宽越小,材料内的热沉积越少。图1为建立的实验平台示意图。

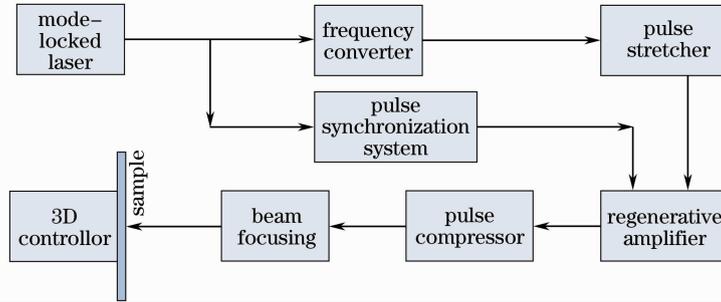


图1 超短脉冲修复实验设计图

Fig. 1 Schematic diagram of equipment for the ultra-short pulse ablation

从锁模激光器<sup>[12]</sup>出来的30 ps、16.45 MHz、3.2 nJ脉冲经过选单同步变成频率为1 Hz的脉冲,然后通过脉冲展宽变成大约660 ps脉冲,在再生放大器<sup>[13]</sup>内放大,后经脉冲压缩成皮秒脉冲。随后皮秒脉冲经过聚焦以及三维坐标控制在样品上进行超短脉冲修复实验。最终的输出脉冲参数如下:能量为1~100 μJ,脉冲重复率为1 Hz,最短脉宽为6 ps,偏振态为水平方向偏振。

### 2.1 不同脉宽下的单点修复

损伤缺陷点的尺寸一般在微米量级,目前通过扫描振镜系统结合长聚焦显微镜都很难精确定位,所以实验中选用未经任何损伤破坏的介质膜元件进行单点修复。实验中假定激光光斑聚焦点就是损伤缺陷点,经皮秒脉冲处理后直接将该处切除。通过改变脉冲能量形成不同切除点,借助显微镜观察切除点形貌从而选取合适脉冲能量进行后续实验。

使用16、240、35、6 ps脉冲在介质膜层上形成单点损伤修复点、点阵扫描修复区域<sup>[7,14,15]</sup>。为了增加实验数据的可靠性,相同种类元件的实验都是在同一批元件上进行,甚至在同一片元件的相近区域进行。

在用16 ns脉冲进行损伤修复时,不断提高16 ns单脉冲能量,从0.166 mJ慢慢增加,直到从长聚焦显微镜中观测到明显的衍射光斑为止,此时能量为0.922 mJ。随后保持此能量不变连续打5次。实验中16 ns脉冲光斑大小为0.04 mm<sup>2</sup>。

采用上述不同脉宽脉冲在1053 nm 0°高反膜进行单点修复,膜层结构为二氧化铪与二氧化硅交替排列的26层膜结构,总膜层厚度约为4.6 μm。文中提及的其他膜都为二氧化铪与二氧化硅膜系,不同角度下的高反或高透膜不同之处在于两种介质交替排布的层数以及厚度有所不同而已。

对应的单点修复形貌如图 2 所示。由图 2 可以看出,16 ns 脉冲作用的损伤点边缘形貌极不规则,具有严重的熔化残留结构和不规则破裂现象。240 ps 脉冲热残余导致薄膜形态产生严重改变;修复点边缘相对较规则,但光滑程度较差,且边缘存在大量的飞溅物;修复坑膜层边界分明,说明膜层物质出现严重

的熔化现象,且存在由于热膨胀不同产生的膜层分离。35、6 ps 脉冲在辐照 10 次下形成的修复点形貌,都具有较整齐的修复边缘,光滑程度较好,修复点周边无破碎物残留,无明显热沉积造成的附加影响,膜层细节信息用普通光学显微镜已无法观测,故采用奥林巴斯激光共聚焦显微镜进行更精细地观测。

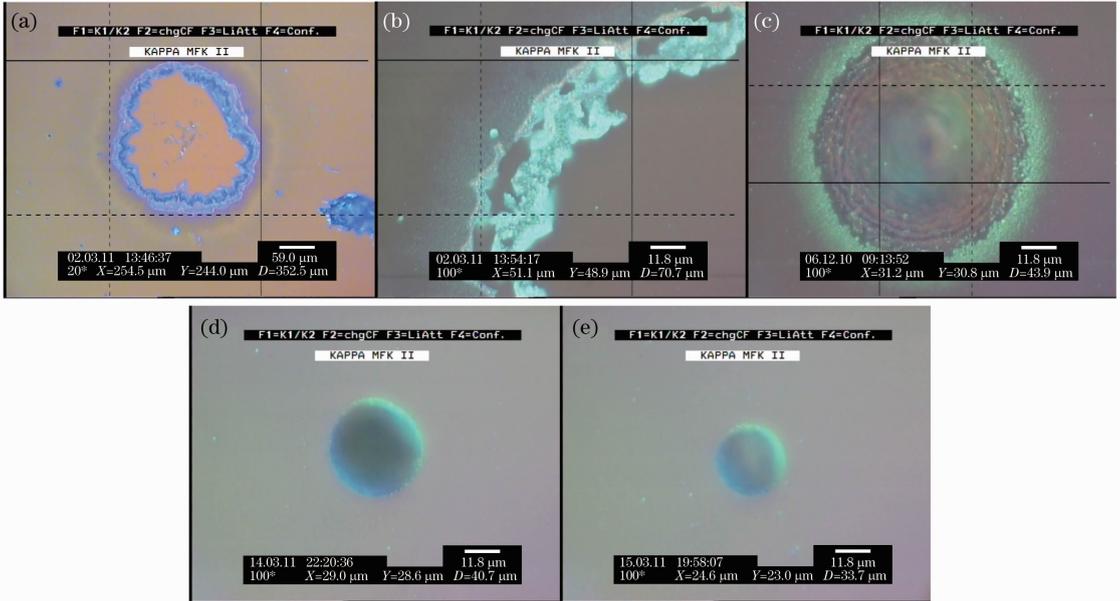


图 2 1053 nm  $0^\circ$ 高反膜经 1053 nm 不同脉冲损伤形貌图。(a) 16 ns 脉冲修复点整体形貌(200 倍);(b) 16 ns 脉冲修复点边缘形貌(1000 倍);(c) 240 ps 脉冲修复形貌(1000 倍);(d) 35 ps 脉冲修复形貌(1000 倍);(e) 6 ps 脉冲修复形貌(1000 倍)

Fig. 2 Ablation morphology of 1053 nm  $0^\circ$  high reflection films at 1053 nm got by optical microscope. (a) 16 ns ablation morphology (manified 200 times); (b) 16 ns ablation morphology (manified 1000 times); (c) 240 ps ablation morphology (manified 1000 times); (d) 35 ps ablation morphology (manified 1000 times); (e) 6 ps ablation morphology (manified 1000 times)

图 3 分别是 1053 nm  $0^\circ$ 高反膜经 35 ps 和 6 ps 脉冲 10 次连续辐照的修复点在激光共聚焦显微镜

下的形貌特征。从图 3(a)可以看出修复点的横向尺寸大约为  $28 \mu\text{m}$ ,修复坑深度大约为  $7 \mu\text{m}$ ,修复

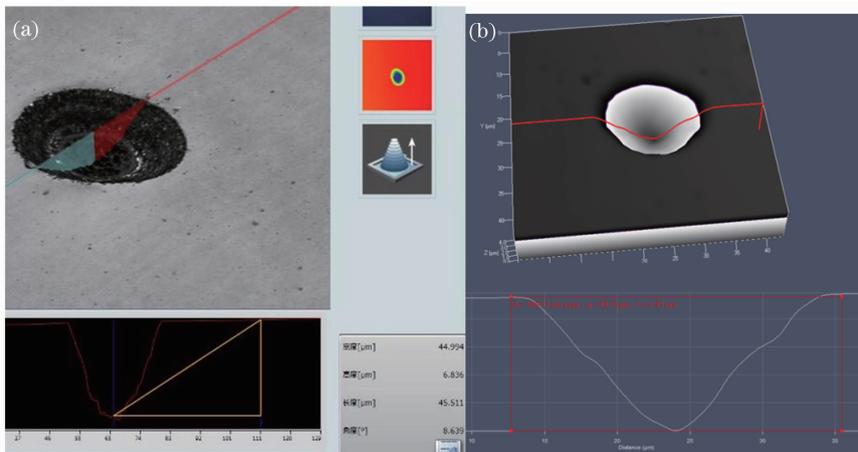


图 3 1053 nm  $0^\circ$ 高反膜经 10 个脉冲单点修复后在激光共聚焦显微镜观察得到的三维形貌图。(a)脉冲能量为  $100 \mu\text{J}$ ,脉宽为 35 ps;(b)脉冲能量为  $35 \mu\text{J}$ ,脉宽为 6 ps

Fig. 3 Ablation morphology of 1053 nm  $0^\circ$  high reflection films under the irradiation of 10 shots laser pulses, imaged by laser scanning con-focal microscope. (a) 35 ps,  $100 \mu\text{J}$ ; (b) 6 ps,  $35 \mu\text{J}$

点内部面型较为光滑,基本无膜层之间的分离和熔化现象发生,修复点内壁无明显破碎物;从图 3(b)可以看出修复点横向尺寸大约为  $23\ \mu\text{m}$ ,深度大约为  $5\ \mu\text{m}$ ,内部面型光滑,无毛刺,无熔化,无破碎物质存在。

## 2.2 大区域扫描修复

为了说明通过二维扫描能够实现较大面积的损伤修复<sup>[14]</sup>,在  $1053\ \text{nm}$   $45^\circ$ 高反膜上进行了  $35\ \text{ps}$  脉冲的扫描修复实验,单脉冲能量为  $80\ \text{mJ}$ 、扫描步进

为  $10\ \mu\text{m}$ ,扫描点数为  $10 \times 10$ 。用奥林巴斯 OL4000 激光共聚焦显微镜对修复点的三维形貌进行观测,修复点横向尺寸为  $120\ \mu\text{m} \times 136\ \mu\text{m}$ ,呈规则矩形,修复点边缘整齐,无裂纹,无明显熔化现象;底部可以看出光斑扫描的痕迹,但没有出现明显的不平坦区域,无强烈起伏,边缘过渡平滑,修复点深度约为  $2.5\ \mu\text{m}$ ,如图 4(a)所示。另外,修复点拐角处过渡平缓圆滑,只存在少量的再沉积物质,结果如图 4(b)所示。

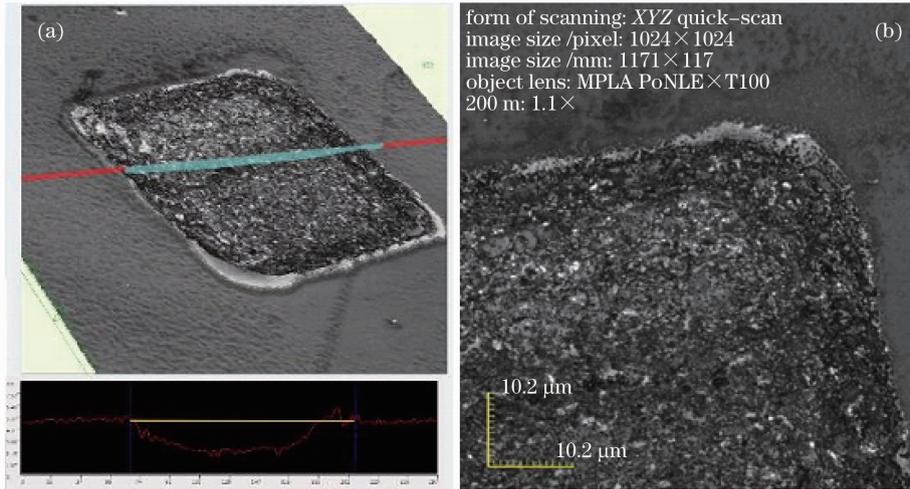


图 4  $1053\ \text{nm}$   $45^\circ$ 高反膜扫描修复形貌 3D 图。(a)整体形貌;(b)右上角形貌

Fig. 4 3D ablation morphology of  $1053\ \text{nm}$   $45^\circ$  high reflection films. (a) Overall morphology; (b) upper right corner morphology

从以上结果可以看出,无论采用单点修复实现几十微米的修复尺寸还是采用扫描修复实现上百微米的修复尺寸,超短脉冲激光修复技术完全能够得到边缘整齐光滑、形状规则、无裂纹、无破碎结构的修复点形貌。

## 2.3 修复点损伤测试

损伤修复点的抗损伤阈值是衡量修复效果的重要标准,在损伤点观测过程中采用长聚焦显微镜在线观测。高反介质膜产生损伤时,损伤点高反特性被破坏,经脉冲激光照射后,在长聚焦显微镜上就能观测到亮斑。在测量元件原始膜层阈值以及损伤阈值过程中,不断增加脉冲能量直到观测到明显衍射效应的光斑,此时的脉冲能量即为损伤阈值能量。

利用  $16\ \text{ns}$  脉冲在原始介质膜层和各修复点上进行抗损伤阈值测试和损伤增长阈值测试。测试类型如下:1)  $0^\circ$ 高反膜  $16\ \text{ns}$  脉冲原始膜层初始损伤阈值与损伤增长阈值;2)  $0^\circ$ 高反膜  $240$ 、 $35$ 、 $6\ \text{ps}$  脉冲单点修复后的损伤增长阈值;3)  $45^\circ$ 高反膜原始膜层在  $16\ \text{ns}$  脉冲初始损伤阈值与损伤增长阈值;4)  $45^\circ$ 高反膜  $35\ \text{ps}$  脉冲扫描修复后的损伤增长阈

值。所有测试所采用的都是  $1053\ \text{nm}$ ,  $16\ \text{ns}$  脉冲垂直照射的方式,并采用长焦距显微镜进行在线观测。

各损伤阈值及损伤增长阈值如图 5 所示。图 5(a)中“◆”表示膜层初始损伤阈值,“■”表示经  $240\ \text{ps}$  脉冲单点修复后损伤增长阈值,“▲”表示经  $16\ \text{ns}$  脉冲产生的损伤点的增长阈值,“×”表示经  $35\ \text{ps}$  脉冲单点修复后损伤增长阈值,“\*”表示经  $6\ \text{ps}$  脉冲单点修复后损伤增长阈值;图 5(b)中“◆”表示膜层初始损伤阈值,“■”表示  $16\ \text{ns}$  脉冲产生的损伤点的增长阈值,“▲”表示经  $35\ \text{ps}$  脉冲扫描修复后损伤增长阈值。从图 5(a)可以清楚地看出  $0^\circ$ 高反膜的初始损伤阈值主要集中在  $25 \sim 45\ \text{J}/\text{cm}^2$  之间;  $16\ \text{ns}$  脉冲损伤点的增长阈值主要集中在  $10\ \text{J}/\text{cm}^2$  以下;  $240\ \text{ps}$  脉冲单点修复后损伤增长阈值没有任何提高,不能有效抑制损伤增长;  $35\ \text{ps}$  脉冲修复以后修复点的增长阈值得到明显提高,最高值可达到  $35.9\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,说明采用  $35\ \text{ps}$  脉冲单点修复点已经在一定程度上达到抑制损伤增长的效果;在 6 个  $6\ \text{ps}$  脉冲修复后损伤增长阈值测试值中,有 5 个在  $24\ \text{J}/\text{cm}^2$  以上,最高值达到  $44.2\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,几乎与膜层的初始损

伤阈值处在同一水平,且其中最低点( $12.2 \text{ J/cm}^2$ )也要高于 16 ns 脉冲损伤后损伤点增长阈值的最高测试值( $10.4 \text{ J/cm}^2$ ),说明 6 ps 脉冲的单点修复可以较好地抑制损伤增长,达到良好的修复效果。从脉宽与修复效果之间的关系来看,随着脉冲宽度变小,介质膜中的热沉积效果变得越不明显。

图 5(b)是  $45^\circ$ 高反膜损伤/损伤增长阈值的测试结果。从图中损伤阈值的分布情况也可以看出,35 ps 扫描修复后的损伤增长阈值主要分布于  $10 \sim$

$20 \text{ J/cm}^2$  之间,最高值达到  $22.1 \text{ J/cm}^2$ ,相比 16 ns 脉冲的损伤增长阈值(全部在  $10 \text{ J/cm}^2$  以下)还是有一些提高,但是相比初始膜层的损伤阈值还具有较大的差距。主要是因为扫描修复过程中脉冲能量波动、扫描步进控制不够精确、无法采取小脉冲能量多次重复扫描、较大脉冲能量对底部及边缘光滑程度的影响、扫描步进与脉冲能量不匹配等多因素造成。如果通过激光参数优化和精确扫描控制,这些影响因素将逐步消除,修复点的增长阈值将会提高。

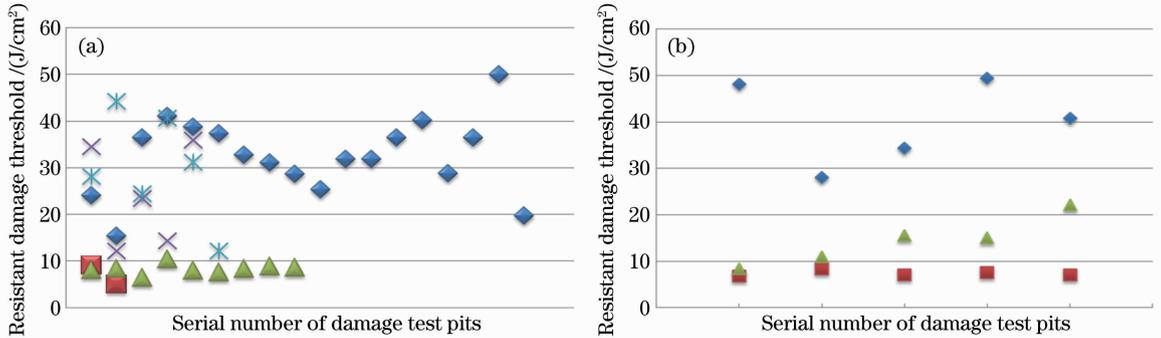


图 5 (a)  $0^\circ$ 高反膜初始损伤阈值/不同宽度激光脉冲修复单点的损伤增长阈值;(b)  $45^\circ$ 高反膜的初始损伤阈值,损伤点的损伤增长阈值,以及激光脉冲扫描修复点的损伤增长阈值

Fig. 5 (a) Initial damage threshold of  $0^\circ$  reflective coatings and damage growth threshold of the repaired pits created by laser pulse with different pulse widths; (b) initial damage threshold of  $45^\circ$  reflective coatings, damage growth threshold of the damaged pits, and the damage growth threshold of the repaired pits created by laser pulse scanning

## 2.4 修复点经损伤增长测试后的损伤形貌

损伤点形貌的规则性与表面的平滑程度是判断损伤修复性能的主要标准之一。在损伤修复点上进行损伤测试,发现修复点形貌随着修复脉冲脉宽有着明显变化。图 6 是 240 ps 脉冲修复点经损伤测试以后的形貌图。可以看出修复点边缘和内部膜层都出现了严重的熔化和脱离,修复点本身遭到严重的损伤。值得注意的是,在测试脉冲单点修复损伤增长阈值的实验中,发现 35 ps 和 6 ps 脉冲的修复点在周边膜层损伤以后仍能保持几乎完好的形貌,修复点边缘无明显裂纹或破碎结构,切除坑内壁膜

层未能观测到明显的膜层烧蚀现象,在放大 1000 倍光学显微镜下,修复坑内细节很难观测出。通过与膜层烧蚀现象的对比,可以推断出坑内部并没有出现明显的烧蚀,否则在坑内应该可以看到对比强烈的膜层熔化痕迹。图 7 为 35 ps 修复点和 6 ps 修复点在损伤增长测试周边膜层损伤后放大 1000 倍观察的形貌图。在修复点周边膜层遭到严重的破坏情况下,修复点本身还能保持良好整齐的形貌和无损伤的内部膜层。另外,从损伤测试后的整体形貌图可以看出,修复点并不是其周边膜层损伤的直接源点,因为损伤区域中无明显的从修复点发散开来的

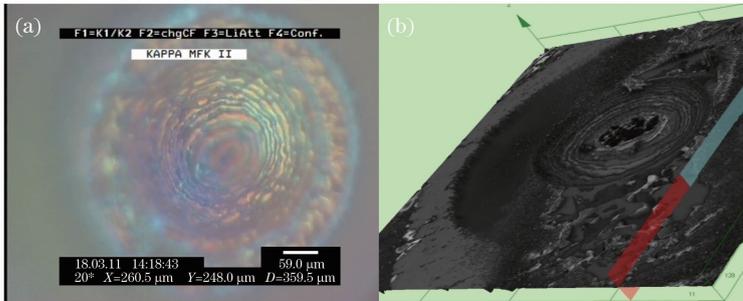


图 6 240 ps 脉冲修复点经损伤增长测试后的形貌。(a)测试点底部图像(1000 倍放大);(b)测试点三维形貌

Fig. 6 Images of repaired pits created by 240-ps laser pulse after damage growth testing. (a) Image of the pit bottom after testing (1000 times magnification); (b) three-dimensional morphology of the repaired pit after damage growth testing

裂痕,其中图 7(b)中修复点正好处在损伤后剥落膜层的膜层边界上,修复点将这一边界整齐地隔断,两边的破损边界还具有很好的连续性。由于在修复加工过程中从修复坑中溅出的物质会有一部分在修复

点周边的膜层上再沉积从而形成细小的颗粒,在后续光照下,这些细小颗粒具有很强的吸收性,所以使得修复点周边膜层相比原始膜层的损伤阈值会稍有降低。

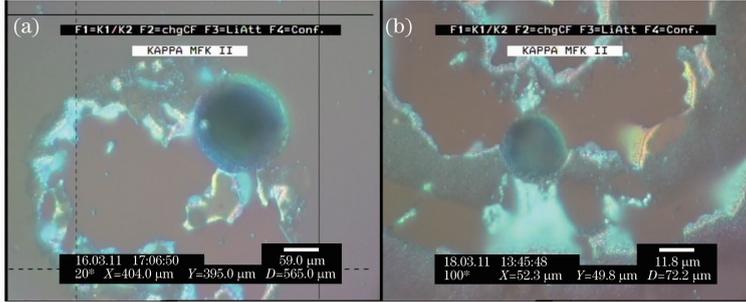


图 7 (a) 35 ps 脉冲修复点经损伤增长测试后的形貌(1000 倍放大);(b) 6 ps 脉冲修复点经损伤增长测试后的形貌(1000 倍放大)

Fig. 7 (a) Images of repaired pits created by 35 ps laser pulse after damage growth testing (1000 times magnification); (b) images of repaired pits created by 6 ps laser pulse after damage growth testing (1000 times magnification)

图 8 是 45°高反膜 35 ps 脉冲扫描修复点在 16 ns 激光脉冲辐照之后的损伤形貌图。从图中可以看出,损伤以后修复点周围存在大量的再沉积颗粒,修复点边缘仍保持较整齐的形貌且无裂纹出现,大部分损伤都表现为修复点底部或边缘膜层的烧蚀熔化

损伤,这说明损伤增长主要是由修复边缘或底部面型的起伏引起。通过激光参数和扫描参数的进一步优化使修复点底部和边缘面型得到改善,能够实现扫描修复点损伤增长阈值的大幅提高。

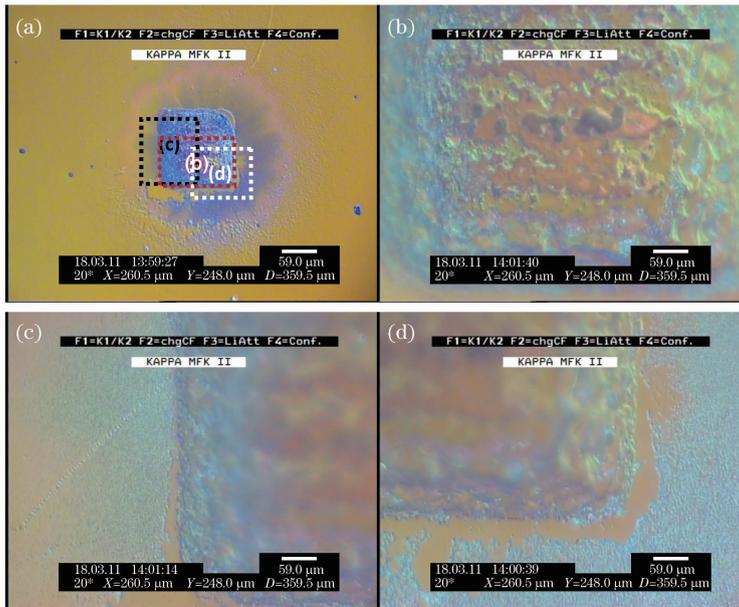


图 8 45°高反膜 35 ps 脉冲扫描修复点经 16 ns 脉冲辐照的抗损伤形貌图。(a) 200 倍放大整体形貌图; (b), (c), (d) 1000 倍放大局部细节图

Fig. 8 Resistant damage ablation morphology of 45° high reflection films by 16 ns pulses. (a) Overall morphology magnified 200 times; (b), (c), (d) morphologies at different parts magnified 1000 times

## 2.5 扫描修复点的后场调制测试

作为 ICF 激光系统中的元件,尤其是终端组件部分,如果修复点引起强烈的后场调制,极有可能引起后续邻近元件的破坏,所以后场调制也是衡量修

复点能否达到要求的重要标准之一。

实验中实际观测了 45°高反膜 35 ps 脉冲扫描修复点所引起的后场调制情况以及 16 ns 脉冲引起的相近尺寸损伤点的后场调制情况。为了便于比

较,理论模拟了 200  $\mu\text{m}$  圆孔衍射引起的后场调制随传输距离的演变过程(如图 9 所示)。小孔引起的光强调制在传输 80 mm 后调制强度只下降为初始值的 20%。相比之下,35 ps 扫描修复点引起的初

始调制传输 80 mm 以后所剩调制已经完全淹没于背景噪声。可以看出,35 ps 扫描修复点基本满足激光系统对修复点后场调制的限制要求。

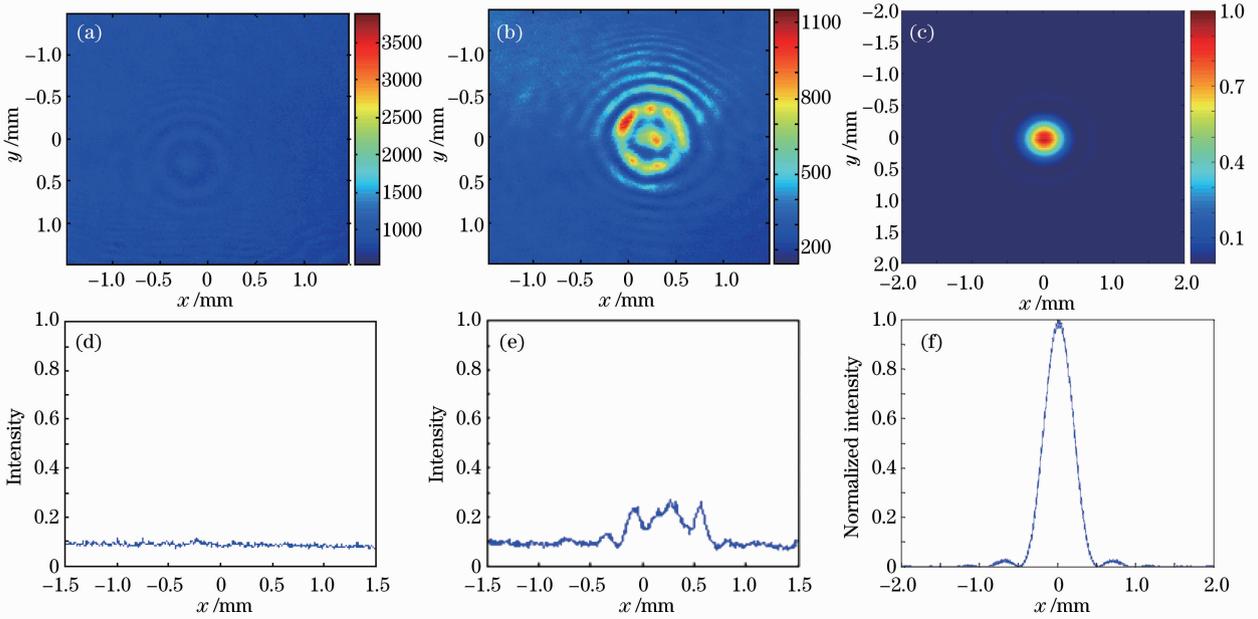


图 9 (a) 45°高反膜上 35 ps 激光脉冲扫描修复点导致的光束调制;(b) 45°高反膜上 16 ns 激光脉冲损伤点导致的光束调制;(c)理论模拟半径为 100  $\mu\text{m}$  的圆孔导致的光束调制;(d)、(e)、(f)为(a)、(b)、(c)对应的光强径向分布

Fig. 9 (a) Beam modulation initiated by the repaired pit in 45° reflective coating created by 35 ps laser pulse scanning; (b) beam modulation initiated by the damaged pit in 45° reflective coating created by 16 ns laser pulse; (c) the calculated beam modulation initiated by a hole with 100  $\mu\text{m}$  radius; (d), (e), (f) are the radial distribution of optical intensities corresponding to (a), (b) and (c)

### 3 结 论

结合超短脉冲激光修复的物理过程,从实验上进行了皮秒脉冲激光修复技术的研究,实验结果显示皮秒脉冲能够实现光滑整齐的单点修复形貌并达到很好的损伤增长抑制效果,修复点不会引入额外的损失。当脉宽小于 10 ps 情况下介质内的热沉积可以忽略,并且通过脉冲宽度与修复效果的对应关系可以看出,在脉宽越小情况下,介质膜内热沉积越少,损伤修复效果越好;结合精确扫描技术能够实现形状可控、边缘光滑整齐、拐角过渡圆滑的扫描修复;初步的扫描修复实验已经表现出一定的损伤增长抑制效果,并且修复扫描点不会引起明显的后场调制。

通过后续对激光参数和扫描控制系统的优化,超短脉冲激光对 ICF 激光系统多膜层光学元件损伤的修复将会取得更好效果。

- 1 A. K. Burnham, L. Hackel, P. Wegner *et al.*. Improving 351-nm damage performance of large-aperture fused silica and DKDP optics[C]. *SPIE*, 2002, **4679**: 173~185
- 2 P. Geraghty, W. Carr, V. Draggoo *et al.*. Surface damage growth mitigation on KDP/DKDP optics using single-crystal diamond micro-machining ball end mill contouring[C]. *SPIE*, 2006, **6403**: 64030Q
- 3 L. Hrubec, J. Adams, M. Feit *et al.*. Surface damage growth mitigation on KDP/DKDP optics using single-crystal diamond micro-machining[C]. *SPIE*, 2004, **5273**: 273~281
- 4 S. T. Yang, M. J. Matthews, S. Elhadj *et al.*. Comparing the use of mid-infrared versus far-infrared lasers for mitigating damage growth on fused silica[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(14): 2606~2616
- 5 Huang Jin, Zhao Songnan, Wang Haijun *et al.*. Local CO<sub>2</sub> laser treatment for repair surface defect in fused silica[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1282~1286  
黄进, 赵松楠, 王海军等. 熔石英表面缺陷的 CO<sub>2</sub> 激光局部修复技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1282~1286
- 6 D. N. Nguyen, L. A. Emmert, P. Schwoebel *et al.*. Femtosecond pulse damage thresholds of dielectric coatings in vacuum[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(6): 5690~5697
- 7 J. Bonse, S. Baudach, W. Kautek *et al.*. Femtosecond laser damage of a high reflecting mirror[J]. *Thin Solid Films*, 2002, **408**(1-2): 297~301
- 8 M. Mielke, D. Gaudiosi, K. Kim *et al.*. Ultrafast fiber laser platform for advanced materials processing [J]. *J. Laser.*

- Micro/Nanoeng, 2010, **5**(1): 53~58
- 9 M. Perry, B. Stuart, P. Banks *et al.*. Ultrashort-pulse laser machining of dielectric materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(9): 6803~6810
- 10 B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Appl. Phys. A: Materials Science & Processing*, 1996, **63**(2): 109~115
- 11 S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs *et al.*. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(10): 2716~2722
- 12 Zhang Panzheng, Fan Wei, Wang Xiaochao *et al.*. All-fiber ultrashort Yb<sup>3+</sup> doped fiber laser self-started by spectral filter [J]. *Acta Physics Sinica*, 2011, **60**(2): 279~286  
张攀政, 范 薇, 汪小超 等. 利用光谱滤波器实现自启动的全光纤超短脉冲掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器[J]. *物理学报*, 2011, **60**(2): 279~286
- 13 Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun *et al.*. Highly stable laser diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 187~190  
王江峰, 朱海东, 李学春 等. 高稳定激光二极管抽运 Nd:YLF 再生放大器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 187~190
- 14 J. E. Wolfe, S. R. Qiu, C. J. Stolz. Multilayer coating laser damage stabilization by femtosecond laser machining[C]. *Optical Interference Coatings*, OSA, 2010. FA2
- 15 J. E. Wolfe, S. R. Qiu, C. J. Stolz. Fabrication of mitigation pits for improving laser damage resistance in dielectric mirrors by femtosecond laser machining[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(9): C457~C462

栏目编辑:宋梅梅