

## 膜层对熔石英表面损伤修复点光调制性能调控研究

蒋勇 廖威 王毕艺 赵万里 刘强虎 邱荣 郭德成 周磊 周强 张远恒

### Light modulation performance control of the coating on the repaired damage sites in fused silica surface

JIANG Yong, LIAO Wei, WANG Bi-yi, ZHAO Wan-li, LIU Qiang-hu, QIU Rong, GUO De-cheng, ZHOU Lei, ZHOU Qiang, ZHANG Yuan-heng

引用本文:

蒋勇, 廖威, 王毕艺, 赵万里, 刘强虎, 邱荣, 郭德成, 周磊, 周强, 张远恒. 膜层对熔石英表面损伤修复点光调制性能调控研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 552–559. doi: 10.37188/CO.2020–0110

JIANG Yong, LIAO Wei, WANG Bi-yi, ZHAO Wan-li, LIU Qiang-hu, QIU Rong, GUO De-cheng, ZHOU Lei, ZHOU Qiang, ZHANG Yuan-heng. Light modulation performance control of the coating on the repaired damage sites in fused silica surface[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 552-559. doi: 10.37188/CO.2020-0110

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0110>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 微分干涉差共焦显微膜层微结构缺陷探测系统

Detection system of multilayer coating microstructure defects based on differential interference contrast confocal microscopy  
*中国光学*. 2018, 11(2): 255 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0255>

#### 石墨烯太赫兹波动态调制研究进展

Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene  
*中国光学*. 2017, 10(1): 86 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0086>

#### 激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理

Laser damage mechanism of flake graphite modified phenolic resin coating  
*中国光学*. 2017, 10(2): 249 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0249>

#### 飞秒脉冲激光对硅基多层膜损伤特性

Femtosecond pulsed laser induced damage characteristics on Si-based multi-layer film  
*中国光学*. 2019, 12(2): 371 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0371>

#### 多元热流体激光检测及杂光抑制光路

Optical path of laser detection and stray light suppression for multiple thermal fluids  
*中国光学*. 2019, 12(2): 310 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0310>

#### 温度变化对金属Ag膜反射镜偏振特性的影响研究

Influence of temperature variation on polarization characteristics of silver thin film mirror  
*中国光学*. 2018, 11(4): 604 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0604>

文章编号 2095-1531(2021)03-0552-08

## 膜层对熔石英表面损伤修复点光调制性能调控研究

蒋勇<sup>1,4\*</sup>, 廖威<sup>2</sup>, 王毕艺<sup>3</sup>, 赵万利<sup>3</sup>, 刘强虎<sup>3</sup>, 邱荣<sup>1,4</sup>,  
郭德成<sup>1,4</sup>, 周磊<sup>1,4</sup>, 周强<sup>1,4</sup>, 张远恒<sup>1</sup>

- (1. 西南科技大学理学院, 四川绵阳 621010;  
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900;  
3. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308;  
4. 西南科技大学-中国工程物理研究院激光聚变研究中心极端条件  
物质特性联合实验室, 四川绵阳 621010)

**摘要:**针对 CO<sub>2</sub> 激光修复熔石英表面损伤点后得到的修复点(简称损伤修复点)产生的光调制问题, 重点研究损伤修复点在镀增透膜前后的形貌及光调制的变化规律, 探讨修复点深度、宽度等形貌因素对 SiO<sub>2</sub> 胶体在修复点坑内沉积的影响, 以及对光调制效应的影响。研究表明: 胶体材料在损伤修复点坑内具有明显的富集效应, 可有效改善损伤修复点的形貌尺寸, 尤其是对深度的影响尤为明显。这虽然会导致损伤修复点镀膜后最大光调制位置的增大, 但该最大光调制却远小于相应未镀膜损伤修复点引起的调制度。研究结果对进一步优化熔石英表面损伤点的修复工艺及光调制度控制提供参考。

**关键词:**熔石英; 损伤修复点; 光调制; 化学膜层; 富集

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0110

## Light modulation performance control of the coating on the repaired damage sites in fused silica surface

JIANG Yong<sup>1,4\*</sup>, LIAO Wei<sup>2</sup>, WANG Bi-yi<sup>3</sup>, ZHAO Wan-li<sup>3</sup>, LIU Qiang-hu<sup>3</sup>, QIU Rong<sup>1,4</sup>,  
GUO De-cheng<sup>1,4</sup>, ZHOU Lei<sup>1,4</sup>, ZHOU Qiang<sup>1,4</sup>, ZHANG Yuan-heng<sup>1</sup>

- (1. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;  
2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;  
3. Science and Technology on Electro-Optical Information Security  
Control Laboratory, Tianjin 300308, China;  
4. Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and  
Technology-Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621010, China)

\* Corresponding author, E-mail: y\_jiang@swust.edu.cn

**Abstract:** In order to address the light modulation problem on repaired spots created after using a CO<sub>2</sub> laser

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2020-07-27

基金项目: 国家自然科学基金科学基金资助项目(No. 11972313, No. 61775235, No. 61705205, No. 61505170); 国防基础科学研究计划项目(No. JCKY2020210C005); 四川省大学生创新创业训练资助项目(No. S202010619071, No. S201910619039); 西南科技大学龙山人才计划资助项目(No. 18lzx516)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11972313, No. 61775235, No. 61705205, No. 61505170); National Defense Basic Scientific Research Project (No. JCKY2020210C005), Sichuan University Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. s202010619071, No. s201910619039) and Longshan Talent Program of Southwest University of science and Technology (No. 18lzx516)

to repair the damage in fused silica surface, we research the change of the profile and the modulation of the repaired sites before and after coating them with antireflective film. The influence of the depth and width of the repaired site on the deposition of the colloid are discussed, with some attention also given to the influence of the modulation effect. The results indicate that the colloidal material significantly enriches the pits of a repair, which can effectively improve their topographic dimensions with regards to their depth. The maximum modulation locations of a repaired site will increase after being coated with the antireflective film. However, the maximum modulation caused by the repaired site is much smaller than that of the corresponding uncoated repaired point. The results of this study can provide a reference for further optimization of repair processes and light modulation regime control of the surface damage sites on fused silica.

**Key words:** fused silica; repaired site; light modulation; chemical coating; enrichment

## 1 引言

在激光系统中,光学元件和光束质量的好坏直接决定了系统的整体性能。元件表面洁净度、元件表面的膜层、各类缺陷疵病及损伤点会对传输光束的相位、光束质量等光学性能产生影响。此外,对于传输高能量激光的元件而言,这些因素还会降低元件的抗激光损伤性能<sup>[1-2]</sup>。特别对于目前重点发展的高功率固体激光装置,如中国的神光装置(SG)、美国的国家点火装置(NIF)和法国的兆焦耳装置(LMJ)<sup>[3-4]</sup>,各种类别元件(如熔石英、K9和KDP等)都高达上千件,上述各因素的混合,将会大大影响激光装置的整体性能。因此研究这些因素对元件光学性能的影响一直是一个热点<sup>[5]</sup>。

针对各类缺陷疵病对元件产生的光场调制效应已从实验和理论等方面展开广泛而深入的研究。例如田润妮等人基于Mie理论研究了熔石英体内球形杂质的尺寸效应和折射率对光场的影响<sup>[6]</sup>。CHENG X B等人<sup>[7]</sup>、Zhu等人<sup>[8]</sup>研究了膜层中包裹物产生的光场调制效应。SUN X Y等人研究了光学元件前后表面污染物导致的调制效应<sup>[9]</sup>。CHENG J等人<sup>[10]</sup>和Génin等人<sup>[11]</sup>研究了KDP、熔石英表面不同类型裂纹导致的光调制效应及对损伤的影响。Feigenbaum等人研究了麻点导致的光场调制<sup>[12]</sup>。ZHENG Y等人研究了振幅、相位和尺寸因素对调制效果的影响<sup>[13]</sup>。

为避免这些因素对光束质量的影响,目前普遍采用激光预处理方式<sup>[14]</sup>去除表面的污染物,或

采用CO<sub>2</sub>激光高温熔融的方式处理消除各类划痕缺陷<sup>[15-17]</sup>或平滑损伤点<sup>[18-20]</sup>,进而有效避免这些因素导致的光调制效应以提升元件的抗激光损伤能力。然而,采用CO<sub>2</sub>激光高温熔融或采用蒸发修复方式平滑的损伤点会形成一个高斯状<sup>[18]</sup>或锥形<sup>[20]</sup>的坑(简称损伤修复点或修复点),会导致新的较强光调制点的出现。针对这个问题,目前也开展了广泛的研究。比如,本文作者曾研究了两种修复方式得到修复点的调制效应,指出非蒸发方式得到的修复点的调制度小于蒸发方式得到的修复点的调制度<sup>[18]</sup>。白阳等人基于实验数据建立了损伤修复坑的三维模型,模拟结果表明调制度的大小受修复坑深度、边缘凸起高度等因素的影响<sup>[21]</sup>。Gao等人研究了形貌、波长和折射率等因素对密接双坑对光调制的影响<sup>[22]</sup>。Li等人对比了高斯型坑和锥形坑光调制的差异<sup>[23]</sup>。Doualle等人也研究了锥形坑导致的光调制效应,指出锥形坑的调制度小于高斯型坑的调制度<sup>[20]</sup>。

对于高功率固体激光装置中的光学元件,特别是在光路中作为屏蔽片使用的熔石英元件,在使用前会在元件表面镀制增透膜。而目前镀膜后损伤修复点对光调制效应的影响尚未见相关报道。基于此,本文针对该问题展开研究,研究结果对进一步探究损伤修复点的调制性能,对损伤点修复方案的探索与改进,以及对元件在装置中的实际应用具有参考性。

## 2 实验系统

实验测试光路如图1所示,采用声光调Q,

可同时激发 1053 nm、527 nm 和 351 nm 3 个波长激光的 Nd:YLF 多波长激光器 (Photonics 公司)。通过滤波器输出波长为 351 nm 的激光。通过一个直径为 20  $\mu\text{m}$  的小孔滤波获得均匀度较好的点光源, 然后利用焦距为 20 cm 的非镀膜熔石英透镜对光束进行准直而获得平行光束, 并垂直入射到样品表面的损伤修复点区域。将 CCD 放置于一个行程为 40 cm 的三维平移台上,

其移动控制精度为 10  $\mu\text{m}$ 。为尽可能获得较准确的最高光调制位置, 实验中在 0~5 cm 范围内, 每间隔 0.5 cm 采集一幅图像; 在 6~20 cm 范围内, 每间隔 1 cm 采集一幅图像; 在 20~40 cm 范围内, 每间隔 2 cm 采集一幅图像。实验中选用 CCD 的视场范围为 5 mm  $\times$  7 mm。测试过程中, 样品上有损伤修复点的一面位于激光的出射面, 即后表面。

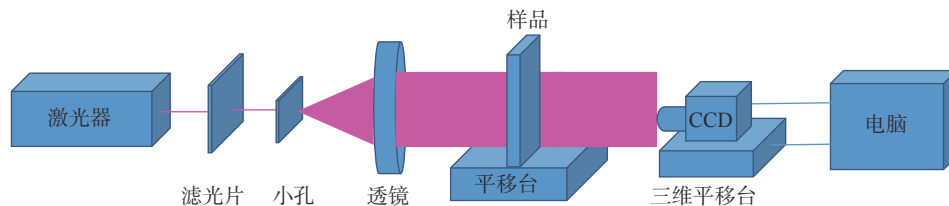


图 1 测量光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test system

为避免环境光因素对光场调制的影响, 首先获得未放置样品时环境光导致的背景噪声值, 记为  $B$ ; 然后将不含修复点的样品放置于光路中, 测得不含修复点调制影响时的光强分布值, 记为  $I_0$ ; 最后再将包含损伤修复点的区域放置于光路中, 获取其衍射图, 并测量其最大光强值, 记为  $I_{\max}$ , 获得的损伤修复点对光传输产生的光场调制度  $M^{[21, 23]}$ :

$$M = \frac{I_{\max} - B}{I_0 - B} \quad (1)$$

实验选用康宁公司的 7980 光学玻璃作为实验样品, 尺寸为 60 mm  $\times$  40 mm  $\times$  5 mm。采用质量分数分别为 1% 和 15% 的氢氟酸 (HF) 和氟化铵 ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) 制备成的缓冲腐蚀液处理样品 10 min, 充分去除样品表面在抛光加工中形成的重沉积层和污染物。利用去离子水清洗刻蚀后的样品, 再利用蒸馏酒精对其进行脱水处理, 获得表面干净的样品。采用输出波长为 351 nm 的 Nd:YAG 激光器以高于样品损伤阈值的激光能量在其表面制造一系列的损伤点, 损伤点间距大于 1 cm; 根据损伤点的特征及尺寸, 利用波长为 10.6  $\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光采用非蒸发高温熔融的方式修复损伤点, 具体修复参数可参见文献 [18]。在制备得到一系列损伤修复点后, 将样品置于  $\text{SiO}_2$  溶胶-凝胶

溶液中, 采用提拉镀膜法在样品前后表面制备一层高透 (>99.8%) 波长为 351 nm 的化学增透膜。

在对样品进行镀膜操作前后, 采用 Nikon Eclipse E600 型光学显微镜观察每个损伤修复点的修复状态, 判断修复点上是否存在未完全熔融的裂纹, 以及判断是否存在气泡或烧蚀的现象, 以保证光调制度的测试效果。如存在裂纹或气泡, 则不进行后续的光调制测试; 如存在烧蚀物质, 则采用 HF 溶液进行二次清洗, 具体原理可见文献 [24]。同时采用 Ambios XP-200 型接触式轮廓仪测量损伤修复点镀膜前后的轮廓形貌图, 以备后续对比分析。

### 3 结果与分析

图 2 和图 3 分别给出了典型损伤修复点镀膜前后的光学显微图和二维形貌轮廓图。当采用非蒸发式修复方式, 以优化的参数修复损伤点后, 会得到如图 2(a) 中虚线所示的一个修复点, 其变形影响区域并未影响到周围区域, 具体可由图 3 黑色实线所示的轮廓图看出。这也是采用  $\text{CO}_2$  激光高温熔融修复损伤点的主要原因之一。当损伤修复点表面镀制增透膜后, 由图 2(b) 的光学显微图可看出, 其变形区小于图 2(a) 中虚线所示的

区域,其轮廓如图3中虚线所示。由图3可以看出,镀膜后修复点的深度相对未镀膜修复点的深度减小了  $2.18\ \mu\text{m}$ 。根据增透膜设计原理,在实际工程应用中未变形样品表面镀制的增透膜层厚度大约为透射激光波长的  $1/4$ 。由此可以看出,修复点坑内膜层增加的厚度已远超过样品表面膜层的厚度。可以判断,在此过程中胶体在修复点坑内存在明显的富集现象,进而导致坑内沉积的胶体

远大于表面的沉积量。同时由图3可以看出,损伤修复点呈高斯形貌分布,且未出现明显的凸起形貌,镀膜后修复点的表面横向尺寸与未镀膜修复点的尺寸差异不大,但随时深度的增加,除坑底部沉积胶体外,其在侧壁沉积的胶体量总体是随坑形貌从区域A到区域B均匀增长,这进一步说明胶体在修复坑内的富集过程与修复点深度与宽度存在直接关系。

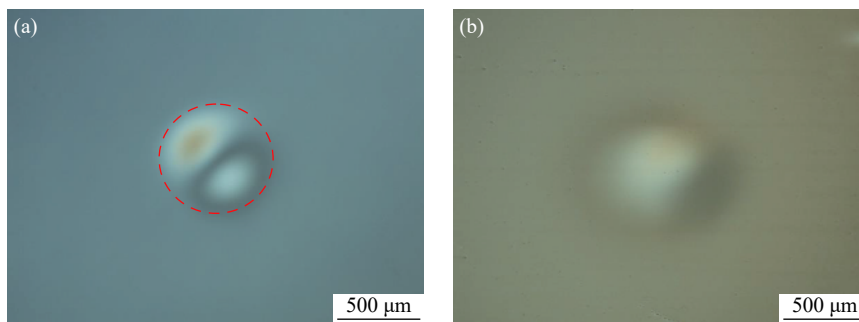


图2 未镀膜损伤修复点(a)及镀膜修复点(b)的光学显微形貌图

Fig. 2 Morphology graphs of un-coated (a) and coated (b) repaired damage site

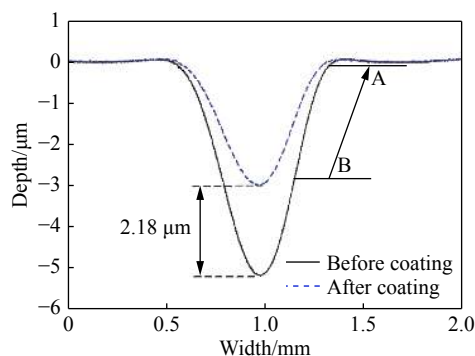


图3 损伤修复点镀膜前后的轮廓图

Fig. 3 Profile of repaired damage site before and after coating

虽然损伤修复点在镀膜后尺寸发生变化,但仍然会对经过该区域光束的调制效应产生影响。基于图1的光路图,图4和图5分别给出了图2所示损伤修复点在镀膜前后不同观察位置处的典型衍射图像。可以看出,损伤修复点在镀膜前后产生的衍射环没有明显差异。总体趋势为随着观察距离的增加,损伤修复点导致的衍射现象越强,即可观察到的衍射环数量更多。同时,由于修复点没有明显的凸起形貌,随观察距离的增大,未在垂直于光传播方向的平面上出现第二个光强增强

点<sup>[21, 25]</sup>。但是从图4和图5两组图可以明显看出,箭头所示的最大光强位置已发生变化。对于未镀膜的损伤修复点而言,最大光强出现在距离样品后表面  $2.5\ \text{cm}$  的位置处,而对于镀膜后的损伤修复点而言,其最大光强已出现在距样品后表面  $3.0\ \text{cm}$  的位置处,即最大光强位置相对于样品后表面向后移动了  $0.5\ \text{cm}$ 。这说明损伤修复坑的深度尺寸变小,会导致光强最大的位置后移。此规律与白阳等人针对修复点数值模拟结果规律一致<sup>[21]</sup>。

基于图4和图5所示的衍射图像,根据式(1),得到图6所示修复点镀膜前后调制度随距离的变化曲线。结合图3对应的轮廓图可以看出,损伤修复点在镀膜后,不但会影响光强出现的最大位置,也会影响调制度的大小。由图6可以看出,未镀膜损伤修复点引起的最大调制度为  $6.2$ ,而镀膜损伤修复点引起的最大调制度为  $4.8$ 。根据 Guss 等人<sup>[26]</sup>的报道,当调制度小于  $3$  时,其产生的影响是可以接受的。由此可以看出,损伤修复点在镀膜后,其最大调制度的位置虽然后移,但对光束的调制效应会进一步减小至可接受范围。

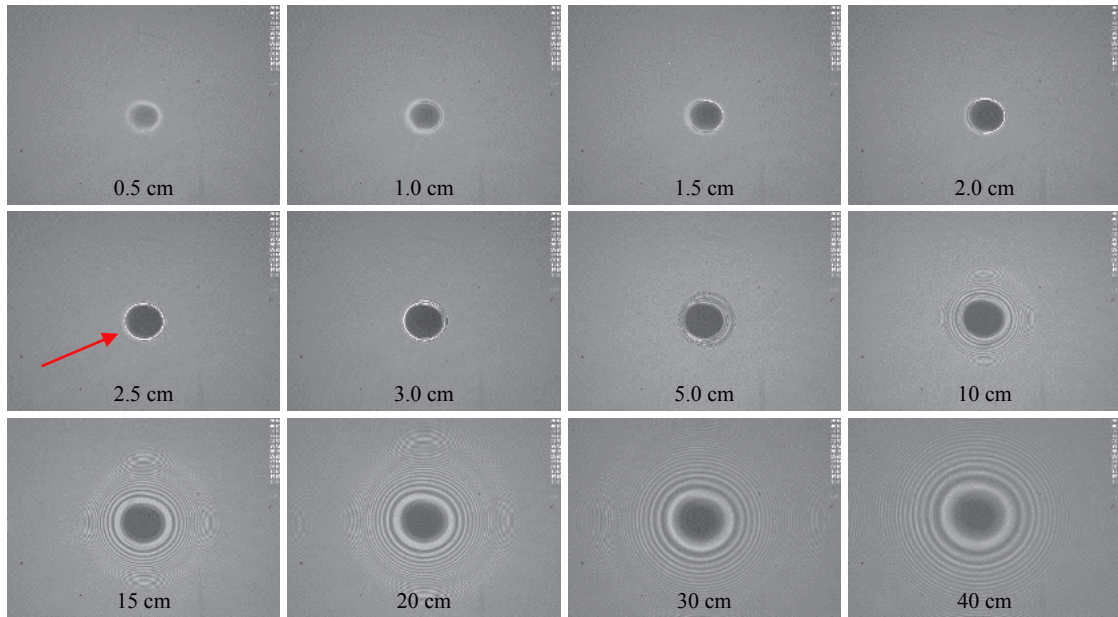


图 4 未镀膜损伤修复点在不同位置处的衍射图像

Fig. 4 Diffraction images of the un-coated repaired damage site at different locations

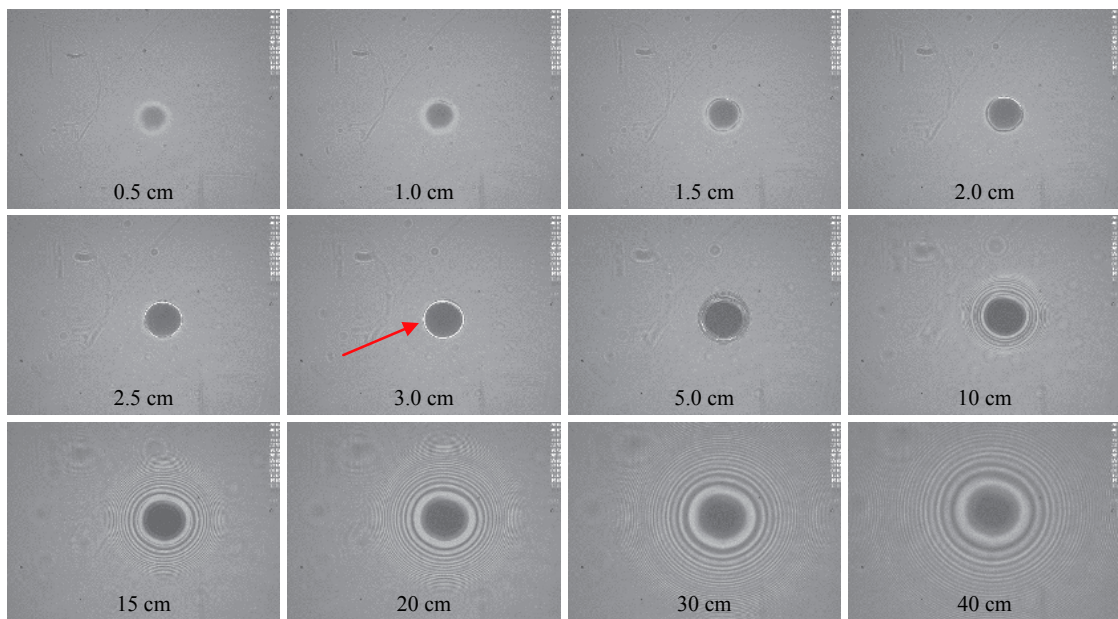


图 5 镀膜修复点在不同位置处的衍射图像

Fig. 5 Diffraction images of the coated repaired damage site at different locations

由图 4 和图 5 的衍射图像及图 6 的调制度变化曲线可知,在损伤修复点镀膜后,不但可以减小修复点坑的尺寸,而且可以进一步减小光调制度的大小。类似情况也可从图 7 所示的不同形貌损伤修复点导致的光调制效应看出。根据白阳<sup>[21]</sup>等人的模拟结果知,影响调制度大小的主要因素来自于修复点的深度和凸起形貌。本研究中采用

基于实际工程用的优化修复参数,已尽可能避免凸起形貌的出现,故仅讨论深度的影响规律。

表 1 给出了图 3、图 7 中(a1)、(b1)3 组不同修复点镀膜前后的深度和宽度变化,以及形貌导致的最大光调制。图 8 和图 9 为测试的一系列损伤修复点镀膜前后的深度和光调制的变化情况(两图中的深度和调制度编号一一对应),图中各

损伤修复点的表面宽度均控制在  $(0.9 \pm 0.1)$  mm 范围内。可以看出,修复点的深度越大,其导致的光调制越大。基于标量衍射理论,修复点在不同位置处的光强变化完全符合菲涅耳衍射规律,这也就解释了修复点深度对调制度有重要影响的原因<sup>[13,21]</sup>。

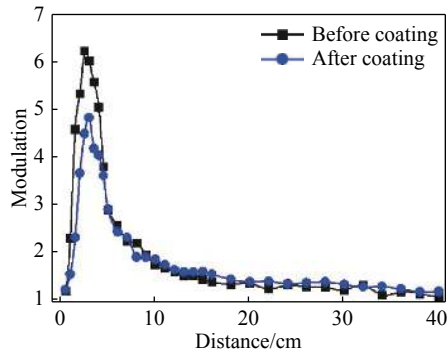


图6 损伤修复点镀膜前(矩形图标)后(圆形图标)调制度随距离的演化曲线

Fig. 6 The evolution curve of modulation over distance of repaired damage site before (rectangle) and after (circle) coating

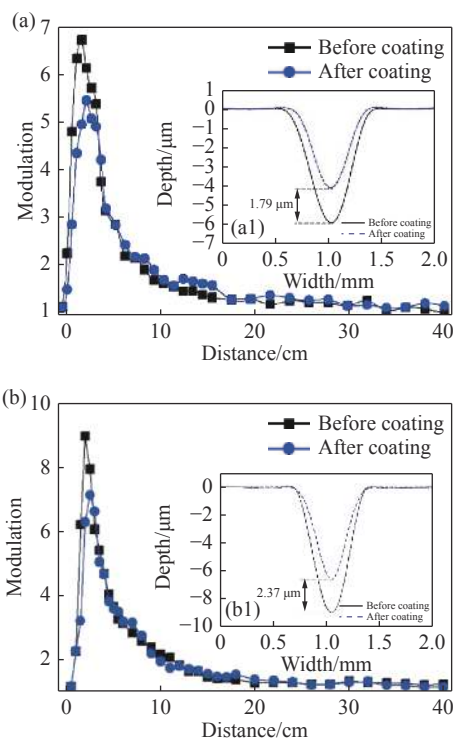


图7 不同形貌损伤修复点光调制随距离的演化曲线

Fig. 7 The relationships between the modulation of the repaired damage site with different morphologies and distance

同时,由表1也可以看出,对于深度越大的修复点,其宽度越小,胶体在修复坑内富集的胶体量越多,会进一步减小修复坑的深度。这种现象主要应归因于修复点的毛细现象。实验中所有修复点的深度和宽度都在微米或亚毫米量级,在镀膜过程中,修复点的坑内必然存在毛细作用,同时因

表1 损伤修复点镀膜前后参数与最大光调制度

Tab. 1 Parameters of the repaired site before and after coating vs. the maximum modulation

	对应图号	深度/ $\mu\text{m}$	宽度/mm	最大调制度
未镀膜修复点	图3	5.15	0.86	6.2
	图7(a1)	5.84	0.9	6.7
	图7(b1)	8.91	0.7	8.9
镀膜修复点	图3	2.97	0.8	4.8
	图7(a1)	4.05	0.8	5.5
	图7(b1)	6.55	0.7	7.1

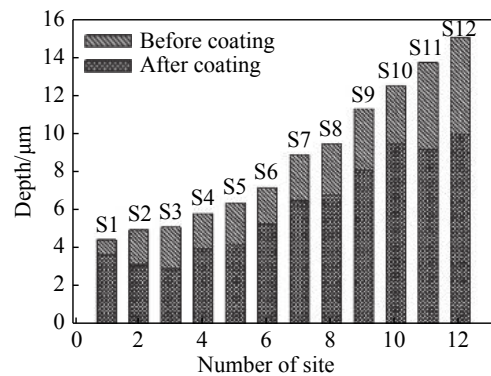


图8 损伤修复点镀膜前后坑深度的变化规律

Fig. 8 Change of crater depth of the repaired site before and after coating

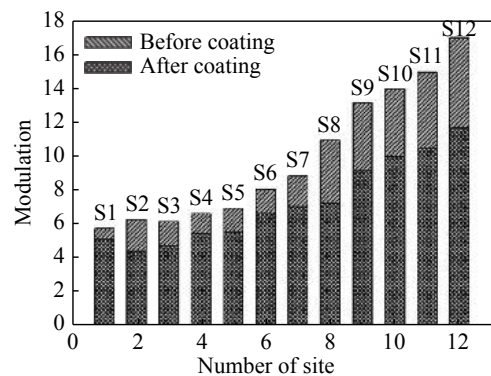


图9 镀膜前后损伤修复点最大光调制的变化规律

Fig. 9 Change of the maximum light modulation of the repaired site before and after coating

胶体黏度较大,进一步增强了胶体修复坑内的富集。而且修复点的宽度越小,深度越深,毛细现象越明显,进而进一步减小了修复点的深度,避免产生较大的调制度。

上述结果可用于进一步证明和反推损伤修复方案,尽可能减小修复点对光束的调制作用。在实际工程应用中,应确保元件上产生的损伤点尺寸不宜过大。在损伤点处于较小尺寸的情况下,将元件从系统中取出后,选用光斑尺寸较小的 CO<sub>2</sub> 激光器对其进行修复。这样可以保证修复过程中形成一个较小的变形区域,进而在镀膜过程中,可增强对胶体材料的富集作用,减小修复点的深度,从而减小光调制的影响。前期实验已经证明,镀膜后的损伤修复点对光透射率及损伤阈值的影响并不明显<sup>[27]</sup>。通过对一系列方法综合运用,可以得到更优化的损伤修复处理方案,更利于确保损伤修复后的光学元件在系统中继续保持较好的透光和抗激光损伤性能。

## 4 结 论

利用接触式轮廓仪对熔石英元件表面损伤修复点镀制化学增透膜前后的形貌特点进行测量,结果表明, SiO<sub>2</sub> 胶体会在修复点坑壁富集,且在修复点内壁上沉积的膜层厚度随深度的减小而减小,但其厚度远远大于平整表面沉积的化学膜层厚度。研究结果还表明,修复坑的横向尺寸越小,修复坑深度越深,在修复坑底部富集的胶体也会越多。无论形状如何,当胶体在修复坑底层及侧面富集后,虽然调制度最大位置会增大,但修复点对光调制的影响都会减小。可以认为,镀膜可以有效减小修复点对光调制的影响,同时也进一步说明有望通过控制修复前元件表面损伤点的尺寸将修复后的修复点引起的光调制效应控制在一个可以接受的范围内。

致谢:作者感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心的晏良宏和杨科在膜层镀制中给予的帮助与支持。

## 参考文献:

- [1] 董家宁,范杰,王海珠,等.高反射光学薄膜激光损伤研究进展[J].*中国光学*,2018,11(6):931-948.  
DONG J N, FAN J, WANG H ZH, *et al.*. Research progress in laser damage of high reflective optical thin films[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 931-948. (in Chinese)
- [2] 王超,张一杨,张雅静,等.掺 Yb<sup>3+</sup> 石英玻璃中非桥氧空穴缺陷特性的研究[J].*发光学报*,2018,39(10):1359-1364.  
WANG CH, ZHANG Y Y, ZHANG Y J, *et al.*. Characteristics of non-bridging oxygen hole centers defects in Yb<sup>3+</sup>-doped silica glass[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(10): 1359-1364. (in Chinese)
- [3] BETTI R, HURRICANE O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [4] ZHENG W G, WEI X F, ZHU Q H, *et al.*. Laser performance of the SG-III laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4: e21.
- [5] 王玺,李志明,谢运涛,等.紫外准分子激光损伤典型光学材料的特性分析[J].*发光学报*,2018,39(5):692-698.  
WANG X, LI ZH M, XIE Y T, *et al.*. Characteristics of typical optical materials damaged by ultraviolet excimer laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(5): 692-698. (in Chinese)
- [6] 田润妮,邱荣,蒋勇,等.熔石英亚表面球形杂质对入射光场的调制作用[J].*光学学报*,2015,35(4):0414003.  
TIAN R N, QIU R, JIANG Y, *et al.*. Light field modulation induced by spherical inclusion in fused silica subsurface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0414003. (in Chinese)
- [7] CHENG X B, ZHANG J L, DING T, *et al.*. The effect of an electric field on the thermomechanical damage of nodular defects in dielectric multilayer coatings irradiated by nanosecond laser pulses[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(6): e80.
- [8] ZHU ZH W, CHENG X G, HUANG L J, *et al.*. Light field intensification induced by nano-inclusions in optical thin-films[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(12): 5126-5130.
- [9] 孙晓艳,雷泽民,卢兴强,等.表面颗粒污染物诱导薄光学元件初始损伤的机理[J].*物理学报*,2014,63(13):134201.  
SUN X Y, LEI Z M, LU X Q, *et al.*. Mechanism of original damage of thin optical components induced by surface particle contamination[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 134201. (in Chinese)



- [10] CHENG J, CHEN M J, LIAO W, *et al.*. Influence of surface cracks on laser-induced damage resistance of brittle  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  crystal[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28740-28755.
- [11] GÉNIN F Y, SALLEO A, PISTOR T V, *et al.*. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(10): 2607-2616.
- [12] FEIGENBAUM E, ELHADJ S, MATTHEWS J M. Light scattering from laser induced pit ensembles on high power laser optics[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10589-10597.
- [13] ZHENG Y, MA P, LI H B, *et al.*. Studies on transmitted beam modulation effect from laser induced damage on fused silica optics[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16605-16614.
- [14] HARRIS C D, SHEN N, RUBENCHIK A M, *et al.*. Characterization of laser-induced plasmas associated with energetic laser cleaning of metal particles on fused silica surfaces[J]. *Optics Letter*, 2015, 40(22): 5212-5215.
- [15] CORMONT P, COMBIS P, GALLAIS L, *et al.*. Removal of scratches on fused silica optics by using a  $\text{CO}_2$  laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28272-28289.
- [16] LIU CH M, YAN ZH H, YANG L, *et al.*. Mitigation scratch on fused silica optics using  $\text{CO}_2$  laser[J]. *Optica Applicata*, 2016, 46(3): 387-397.
- [17] CORMONT P, BOURGEADE A, CAVARO S, *et al.*. Relevance of carbon dioxide laser to remove scratches on large fused silica polished optics[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(3): 253-259.
- [18] JIANG Y, XIANG X, LIU CH M, *et al.*. Two localized  $\text{CO}_2$  laser treatment methods for mitigation of UV damage growth in fused silica[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(6): 064219.
- [19] JIANG Y, LIU CH M, LUO CH S, *et al.*. Mitigation of laser damage growth in fused silica by using a non-evaporative technique[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(5): 054216.
- [20] DOUALLE T, GALLAIS L, MONNERET S, *et al.*.  $\text{CO}_2$  laser microprocessing for laser damage growth mitigation of fused silica optics[J]. *Optical Engineering*, 2016, 56(1): 011022.
- [21] 白阳, 张丽娟, 廖威, 等. 熔石英损伤修复坑下游光场调制的数值模拟与实验研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 024205.  
BAI Y, ZHANG L J, LIAO W, *et al.*. Study of downstream light intensity modulation induced by mitigated damage pits of fused silica using numerical simulation and experimental measurements[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 024205. (in Chinese)
- [22] GAO X, JIANG Y, QIU R, *et al.*. Effect of the repaired damage morphology of fused silica on the modulation of incident laser[J]. *Optical Materials*, 2017, 64: 295-301.
- [23] LIAO W, LI B, ZHOU Q Y, *et al.*. Optical modulation study of repaired damage morphologies of fused silica by scalar diffraction theory[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 016113.
- [24] 蒋勇, 向霞, 刘春明, 等. 熔石英表面损伤修复点上烧蚀碎片的分类与去除的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1203003.  
JIANG Y, XIANG X, LIU CH M, *et al.*. Classification and elimination of ablation debris on the mitigated damage site in fused silica surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1203003. (in Chinese)
- [25] 蒋勇. 熔石英光学元件表面损伤修复的理论和实验研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 173-179.  
JIANG Y. Theoretical and experimental studies on surface damage repair of fused silica optical components[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012: 173-179. (in Chinese).
- [26] GUSS G, BASS I, DRAGGOO V, *et al.*. Mitigation of growth of laser initiated surface damage in fused silica using a 4.6-micron wavelength laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6403: 64030M.
- [27] JIANG Y, MU X Y, QIU R, *et al.*. Comparison of bare and sol-gel coated of mitigated site on fused silica[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9543: 95430M.

#### 作者简介:



蒋勇(1982—),男,四川仁寿人,博士,副教授,2012年于电子科技大学获得博士学位,主要从事强激光与物质相互作用的理论与实验方面的研究工作。E-mail: y\_jiang@swust.edu.cn