



·光学元件激光损伤·综述·

高功率固体激光装置负载问题研究进展*

郑万国, 田野, 韩伟, 柴向旭, 邓学伟, 刘太祥, 廖威

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 高功率固体激光装置的负载问题是制约装置建设与运行的瓶颈问题。在高通量紫外纳秒激光辐照下, 熔石英后表面的损伤不断产生和增长, 严重限制了装置的负载能力。在提升熔石英抗损伤性能的基础上修复既有损伤, 循环使用光学元件, 是现阶段提升装置负载能力的主要手段。主要介绍了国内外近年来在熔石英损伤的规律与机制、光学元件循环处理的支撑技术以及提升负载能力的新材料与新技术方面所取得的重要进展。

关键词: 高功率激光装置; 熔石英; 激光损伤; 化学刻蚀; 损伤修复

中图分类号: O434

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220402

Research progress on loading capability of high-power solid-state laser facilities

Zheng Wanguo, Tian Ye, Han Wei, Chai Xiangxu, Deng Xuewei, Liu Taixiang, Liao Wei

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The loading capability is a bottle-neck challenge in both the construction and operation of high-power laser facilities. Under high-fluence, nanosecond laser irradiation in the ultraviolet regime, damage sites are constantly witnessed initiating and growing on the rear surface of fused silica, severely limiting the loading capability of high-power lasers. Optics recycling which is based on improving the damage resistance of fused silica and mitigating the as-grown damage sites is currently the major strategy for improving the loading capability. This paper introduces the recent progress in the laws and mechanism of laser-induced damage in fused silica, the essential techniques supporting the optical recycling strategy and the new materials and techniques developed to improve the loading capability of high-power laser facilities.

Key words: high-power laser facility, fused silica, laser-induced damage, chemical etching, damage mitigation

为追求超高的激光能量, 高功率固体激光装置主要采用“多程放大”的技术路线, 通过集成数十至上百束激光链路实现数万乃至兆焦耳的激光脉冲输出, 不仅为高能量密度物理等前沿科学提供了强有力的研究工具, 也在国民经济和国防建设中发挥着重要作用^[1]。随着输出能量的不断提高, 光学元件的激光诱导损伤使装置的负载能力受到限制, 业已成为制约装置建设与运行的一项艰巨挑战^[2]。世界上最主要的高功率固体激光装置, 如美国的国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF)、法国的兆焦耳激光装置 (Laser Megajoule, LMJ) 等, 目前均面临着严峻的负载问题^[3-5]。尽可能地减轻与消除强激光导致的光学元件损伤, 持续提升装置的负载能力, 始终是高功率固体激光技术发展的主要目标之一。

作为一项庞大而复杂的光学系统, 高功率固体激光装置中的光学元件数量巨大、种类繁多。根据承受激光波长的不同, 装置中的光学元件可分为基频 (1053 nm) 元件和紫外 (351 nm) 元件^[6]。在高通量辐照下, 位于不同波段的光学材料、表面和膜层通常表现出不同的激光损伤效应, 引起损伤的内在机制也不完全相同。其中, 基频元件的激光损伤问题主要是铍玻璃损伤与反射镜、透镜表面的介质膜损伤, 随着材料制备工艺的提升已基本解决或显

* 收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2023-02-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (11904338)

联系方式: 郑万国, wgzheng_caep@sina.com。

通信作者: 田野, tianye8911@outlook.com。

著缓解^[3];而位于终端光学分系统的紫外元件损伤问题,特别是熔石英元件的后表面损伤,在现阶段仍然是制约装置负载能力的瓶颈,并受到了国内外研究人员的广泛关注^[2]。

熔石英在紫外波段有良好的透过率,且具备硬度高、热膨胀系数低、耐高温、耐腐蚀等优点,因此常被用作紫外光学元件的基质。用于偏折基频光和二倍频光(532 nm)的透镜、用于诊断分束的衍射光栅以及在光路末端用于屏蔽打靶碎片的防护片等光学元件,均采用熔石英作为基底^[6]。熔石英是宽带隙材料,本征损伤阈值较高。然而,在激光装置的实际运行过程中,熔石英元件总是在远低于其本征损伤阈值的通量照射下产生损伤,并且损伤多数发生在后表面^[7]。在后续运行过程中,熔石英元件表面损伤的尺寸和数量又会随发次快速增加,导致元件透过率下降^[8-9]。同时,损伤点对光束的近场调制引起光束近场质量恶化,而前向散射光则增加了上游光学元件的损伤风险。此外,熔石英因激光损伤引起的光学性能退化将迫使元件提前报废,大幅增加了装置的运行维护成本。鉴于熔石英的紫外激光损伤实际决定了整个激光装置的负载能力,本文以熔石英元件为代表,围绕近年来高功率固体激光装置的相关负载问题,综述激光损伤的机制、规律与应对措施,并简要介绍提升装置负载能力的新材料与新技术等方面的研究进展。

1 激光诱导损伤的规律与机制

1.1 熔石英激光损伤的物理图像

对于纳秒紫外入射激光脉冲而言,熔石英的激光诱导损伤通常是由位于元件表面或亚表面的缺陷和杂质引起的热损伤。一般地,熔石英可分辨的初始损伤尺寸在 μm 量级,主要存在麻点型、蚌壳型和火山坑(紫罗兰)型三种形貌,如图1所示。其中最为典型的是火山坑型,内部具有熔融核、致密层、裂纹三种细部结构^[10-11]。

熔石英的激光诱导损伤是一个极复杂的过程,涉及光热效应、光声效应、自聚焦等非线性效应以及激光等离子体的各种相互作用,无法通过单一的理论解释熔石英的损伤问题。目前国内外对损伤的认识主要聚焦于传热过程,并提出了小球吸热、失控吸收以及等离子体火球爆炸等多种模型来描述损伤不同阶段^[12-13]。首先,熔石英表面与亚表面存在不同尺度和类型的缺陷,可作为吸收前驱体吸收紫外激光能量,引起基底材料升温^[13-14]。随着温度的不断升高,熔石英带隙不断减小,吸收系数逐渐增大^[15]。紫外吸收增强又导致温度进一步升高,即形成了“升温-吸收增强”的正反馈过程,使热量通过“吸收波前”向更远处的熔石英材料传递,最终导致高温区域以缺陷为中心向外围快速膨胀^[15]。Carr等通过实验研究发现,熔石英在激光损伤过程中温度会升高到12000 K^[16]。高温、高压形成的等离子体火球继续吸收入射光并不断膨胀,直至尺寸和波长相比拟,最终发生微爆炸^[12]。爆炸产生的冲击波引起材料破坏,并造成裂纹扩展和材料剥离、喷射^[17]。DeMange等通过时间分辨成像实验以及流体动力学仿真,研究了熔石英对纳秒激光辐照的材料响应,阐述了材料体内的相失稳过程^[18]。朱成禹、梁凌熙等和蒋勇等通过泵浦-探针时间分辨成像技术研究了损伤过程中的激波传输与喷溅过程,如图2所示^[19-21]。田野等和苏锐等基于分子动力学模拟分别研究了致密层形成过程中熔石英结构的演化规律,以及裂纹处的粒子在冲击波传播中的喷射现象,发现喷溅主要发生在在加载速度超过4 km/s时,局部温度超过5000 K,且喷溅过程中形成了非桥氧等配位缺陷,如图3所示^[22-23]。

1.2 熔石英损伤的影响因素

作为典型的光与物质相互作用过程,熔石英的激光诱导损伤主要受到光学元件、激光特性以及系统环境三种因素的影响。

在纳秒脉冲范围,光学元件体内和表面各种缺陷和污染的光吸收是主要的损伤机制。熔石英中的缺陷不仅包括材料本征的原子与电子结构缺陷,也包括制备过程中引入的杂质元素以及表面加工或处理过程中产生的颗粒与裂纹等^[13]。其中,材料中的本征缺陷通常与氧相关,Skuja等已对其进行了详细的阐述^[24]。陈军等与冯青屹等利用密度泛函理论计算,定量表征了此类缺陷的结构与吸收性质^[25-26]。由于多数本征缺陷并不会引起强烈的紫外吸收,因此一般会在低通量下造成损伤。此外,利用熔融-退火方法或者气相化学沉积方法制备的熔石英均具有极

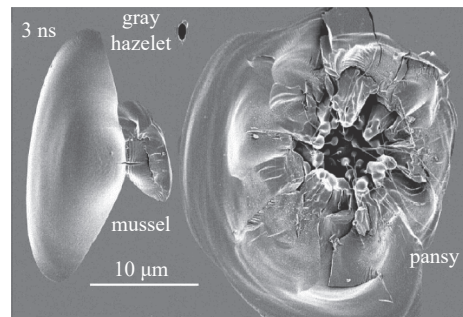


Fig. 1 Morphology of different damage types^[10]

图1 不同类型损伤的形貌^[10]

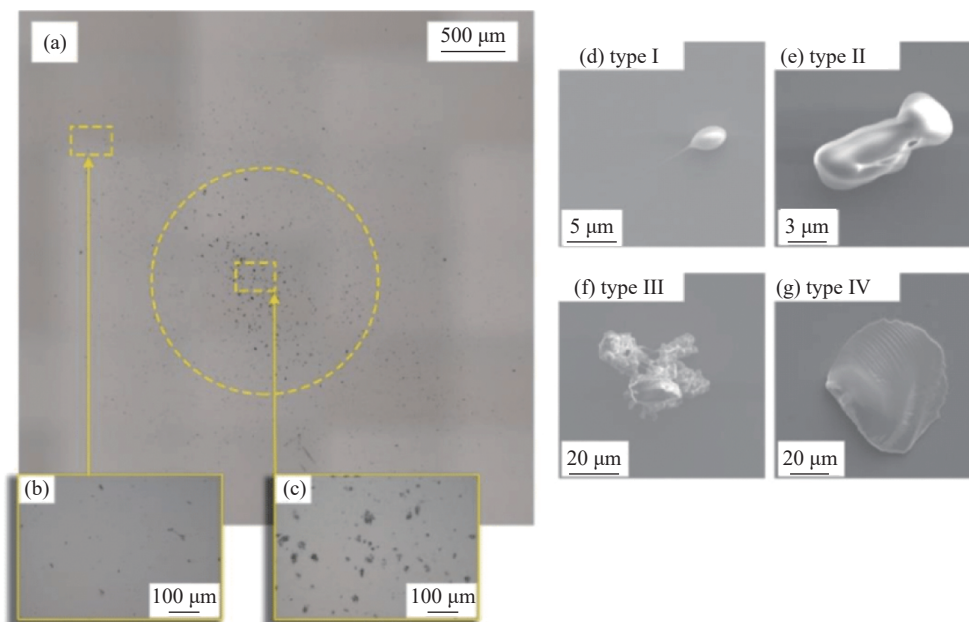


Fig. 2 (a)~(c):Ejection distribution on the collector; (d)~(g): typical SEM images of the collected particles^[18]

图2 熔石英损伤喷溅颗粒分布((a)~(c))与典型颗粒的SEM图像((d)~(g))^[19]

高的纯度,体内的杂质离子含量仅有 ppm 甚至 ppb 量级,同样难以引起熔石英表面损伤。另一方面,元件研磨、抛光和精修等加工过程会在亚表面引入大量抛光颗粒与裂纹,均具有较强的吸收特性,容易导致熔石英表面损伤性能下降。例如,刘红婕等通过光热弱吸收检测揭示了表面加工富集的铁、铈元素导致表面吸收增强,如图 4 所示;黄进等进一步建立了这种强吸收与熔石英表面损伤性能的关联关系^[27-28]。针对此类缺陷,除改进前级加工工艺外,现阶段主要对熔石英表面进行氢氟酸刻蚀,以达到去除杂质、钝化裂纹的效果,有望将熔石英损伤阈值提升至 30 J/cm^2 附近^[29-30]。然而,刻蚀过程中的氟硅酸盐反应产物如不及时去除,也将成为新的吸收前驱,诱导熔石英发生损伤^[29]。近期, Cross 等通过测试发现即使低通量辐照也会在附近表面产生不可见的污染,其损伤阈值在 20 J/cm^2 附近,同样造成熔石英损伤性能下降^[31]。

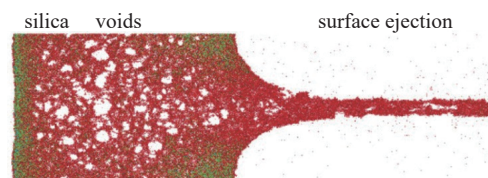


Fig. 3 Molecular dynamics simulation of shock-induced ejection on silica surface

图3 熔石英冲击导致喷溅过程分子动力学模拟^[22]

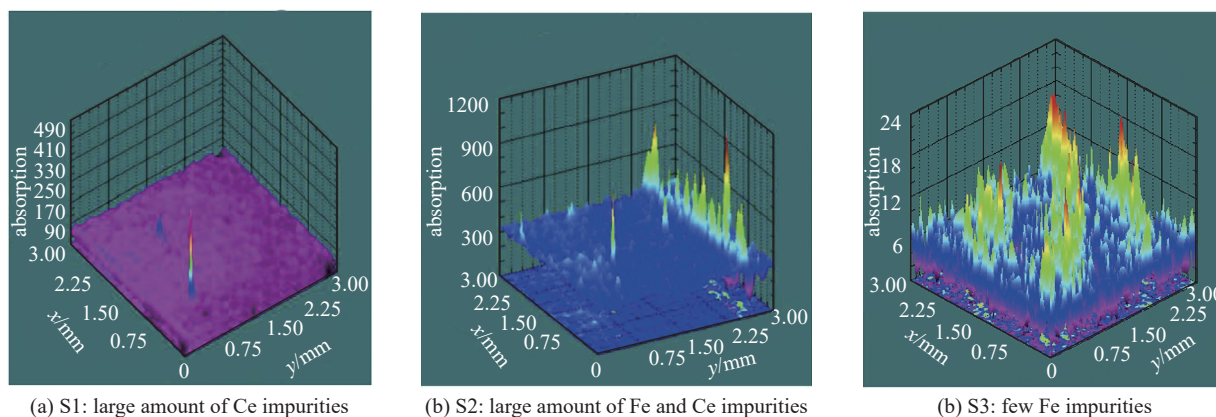


Fig. 4 Absorption mapping images of three kinds of samples^[27]

图4 三种金属元素污染的样品的吸收分布(扫描区域不同位置的相对吸收强度)^[27]

在大型激光装置中,光学元件并非独立存在的,而是处于一个互相作用的复杂环境中,激光输出带有一定的调制,并且每发次都有扰动,光束空间能量的分布也在变化。此外,由于光学元件表面的缺陷、光路中的尘埃、膜层的剩余反射或透射等因素,在激光发射时光路中会充满了各种各样的杂散光^[32]。调制或杂散光强度达到一定程度时,容易在元件表面形成局部的强区,并通过非线性光学效应使熔石英发生损伤。为避免这类问题,需要通过优化

系统结构、控制光束近场调制度或通量对比度、控制 B 积分以及抑制各类非线性散射等措施改善光束质量^[32]。

除了激光强度引起的非线性损伤外,激光的脉冲形状和脉冲宽度对光学元件的损伤行为也有明显的影响。Carr 等研究了不同脉宽和波形激光辐照下的元件损伤密度,发现在相同的通量条件下,平顶脉冲的激光损伤密度比高斯脉冲的高 15% 左右,而短脉宽激光造成的损伤阈值与密度均高于长脉宽激光,但形成的损伤点尺寸更小^[33]。为定量解释以上规律,该研究团队提出并发展了能量扩散模型,实现了不同激光参数下的损伤密度外推,为 NIF 装置的运行提供了重要支撑^[34]。

在高通量条件下导致光学元件损伤的主要原因是缺陷,除元件加工与处理过程中引入的缺陷外,环境中产生的潜在污染也可能在光学元件表面形成新的缺陷,同样降低了熔石英损伤性能。其中,颗粒污染和有机污染是最主要的污染类型,Pryatel 等与程晓峰分别介绍了装置中这两类污染的形式与具体影响^[35-36]。根据化学成分的不同,颗粒污染物主要包括矿物质类、金属类和有机类,尺寸一般在几微米至几百微米,数量随尺度成单调下降^[35]。在各种颗粒中,对损伤影响最为显著的是熔石英等玻璃前期损伤的碎片,叶亚云等和李玉函等对其损伤规律和去除技术进行了研究^[37]。在高功率固体激光装置运行环境中,分子态污染物(AMC)以有机分子为主,分子量在数十到数百不等,组分包括烷烃类、芳香烃类、氟氯烷类、酯酮类和硅氧烷类。有机污染主要来源于在特定条件下的 NVR 和有机材料的挥发,对于镀有溶胶凝胶膜的光学元件,分子态污染物容易沉积到元件表面,导致化学膜孔隙率降低甚至引起损伤。例如,Bien-Aimé等研究了存储环境中的有机污染并揭示了对元件损伤的影响^[38]。晏良宏、黄林等通过强化的气氛后处理提高膜层内部的催化缩合程度,以达到进一步降低膜层的微孔尺寸,从而阻止大分子有机污染物渗透进膜层孔隙内^[39]。

1.3 损伤增长的主要规律

熔石英产生初始损伤后,若后续紫外光辐照通量超过熔石英的损伤增长阈值($4\sim 6\text{ J/cm}^2$),熔石英前表面损伤点的横向尺寸会随着激光发次线性增长,而后表面损伤点的横向尺寸随发次指数增长^[8]。熔石英的激光损伤增长的危害远甚于初始损伤,严重影响元件的光学性能。目前已建成或在建的高功率固体激光装置,其设计运行通量通常超过了熔石英的损伤增长阈值,因此在运行过程中熔石英的损伤增长将难以避免。

随着损伤检测能力的不断提高,大量实验结果表明熔石英后表面损伤虽然整体呈现指数增长趋势,但单发的增长实际表现出显著的随机性。Negres 等通过研究发现,损伤增长的指数系数可视为服从 Weibull 分布的随机变量,其形状和尺度参数均与辐照通量和损伤尺寸相关^[40]。此外,损伤增长本身也被发现具有随机性,概率同样受到辐照通量和损伤尺寸影响^[41]。Carr 等研究进一步表明,损伤增长概率还会受到损伤形貌影响,具有裂纹结构的损伤发生增长的概率更大^[41]。利用以上规律,Liao 等基于蒙特卡洛方法建立了损伤增长模型,并将其用于 NIF 元件的损伤预测与分析^[42-43]。类似地,Veinhard 等开展了损伤增长规律研究,获得了损伤增长速率与损伤尺寸和辐照通量的定量关联关系,建立了损伤演化的模型^[44]。Lacombe 等对 LMJ 装置上熔石英真空隔窗的损伤规律进行了长期观察,指出熔石英后表面损伤在低通量辐照下还存在线性增长行为^[45]。韩伟等对大口径熔石英元件的紫外损伤增长规律也开展了定量分析,如图 5 所示^[8]。

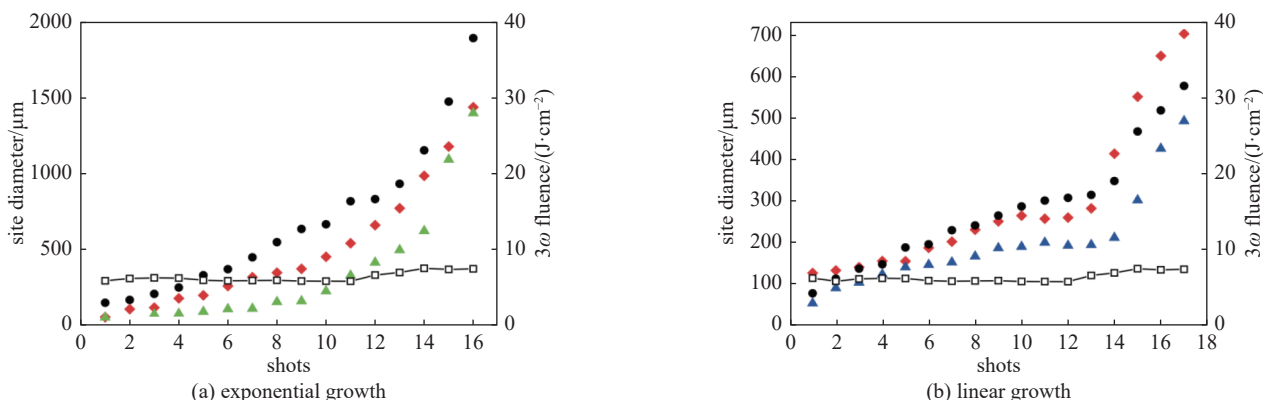


Fig. 5 Obscuration growth vs shot number of damage site^[8]

图 5 损伤区域尺寸随发次数量的增长^[8]

2 光学元件循环处理支撑技术

由于熔石英损伤增长在装置高通量运行过程中难以避免,为延长元件使用寿命,降低装置运行成本,目前国内

外均采用光学元件循环处理策略应对熔石英损伤问题^[46-47]。在装置运行过程中,对损伤点进行在线监控。当损伤点尺寸增大到一定程度时,即将元件下架处理并对元件上的损伤点进行修复,修复后的元件将再次投入使用。为避免损伤尺寸超过修复能力,运行期间需利用可编程光束遮挡系统对达到临界尺寸的损伤点进行光束局部遮挡。光束局部遮挡将造成光束能量损失,因此在装置输出能量和功率平衡的要求下,可遮挡的损伤点数量将受到严格限制。

为了使光学元件循环策略有效实施,一方面元件需要自身具备较高的损伤性能,否则元件将失去修复价值,或难以与有限的循环处理产能相匹配;另一方面也需要相应的损伤抑制技术,使元件的损伤在不引起负面效应的同时不再继续随发次增长。

2.1 先进延缓处理技术

先进延缓处理技术(Advanced Mitigation Processing, AMP)主要基于氢氟酸刻蚀清洗熔石英光学元件,即利用含氢氟酸的溶液和熔石英进行反应,以移除其表面的物质,提高熔石英的损伤性能。在之前的研究中,熔石英表面的抛光层被刻蚀去除之后,可以提高元件的损伤阈值,刻蚀深度约 200 nm,进一步刻蚀反而会起负面作用,刻蚀后出现熔石英表面的紫外损伤阈值下降、损伤密度增大现象。出现这种差异的原因可能在于对再沉积物的控制。氢氟酸溶液和熔石英反应后产生 SiF_6^{2-} 离子,极易和溶液中的阳离子(如 Na^+ 、 K^+ 等)产生沉淀。尽管 $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ 具有较高的溶解度,但如果 NH_4^+ 离子浓度过高,也容易产生沉淀。NIF 研究人员发展了一种高频超声波辅助刻蚀的技术,将划痕整体的损伤统计概率从约 100/mm 降低到约 0.001/mm^[30]。与传统的氢氟酸刻蚀工艺相比,该工艺的“先进”之处主要有:通过减少阳离子浓度增加了反应产物的溶解度,以防止产生再沉积物;在刻蚀和漂洗过程中提高了反应产物的质量输运,防止产生再沉积物;刻蚀足够的深度,消除了抛光层和表面破裂层,使侧向裂纹贯通,最大程度提高质量输运速率^[30]。

激光聚变研究中心从 2005 年就开始了利用湿法刻蚀技术提升熔石英抗激光损伤性能的研究,经历了静态刻蚀-动态刻蚀-多次静态刻蚀-动态刻蚀的研究历程。在此基础上,叶鑫等研究了不同刻蚀深度对熔石英损伤性能的影响,如图 6 所示^[48]。

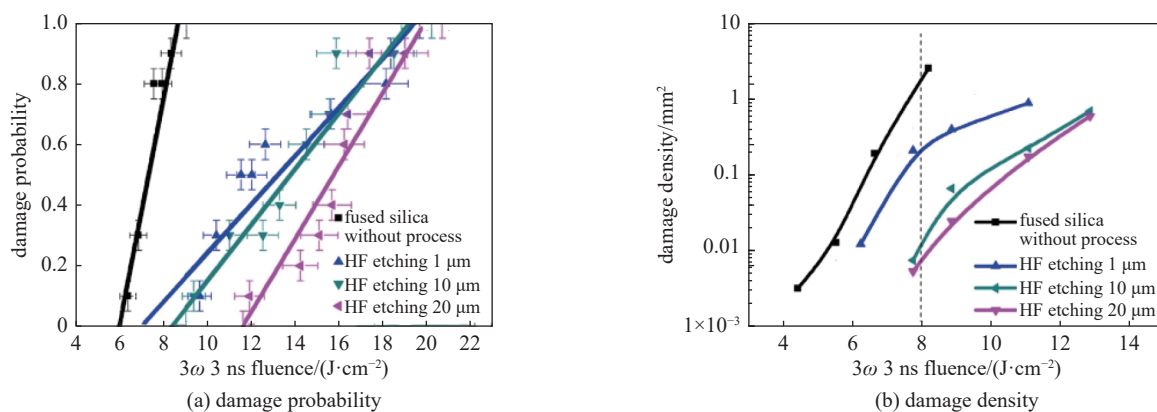


Fig. 6 Damage probability and damage density of fused silica etched different times^[48]

图 6 不同刻蚀次数下的熔石英损伤概率与损伤密度^[48]

2.2 损伤修复技术

熔石英表面在出现初始损伤后,如不及时采取遮挡措施或者下架处理,初始损伤尺寸将在后续发次中快速增长,严重影响光学元件的稳定性和使用寿命。利用 CO_2 激光器对损伤点进行激光修复,抑制其继续增长,是国内外延长熔石英元件使用寿命、降低高功率固体激光装置运行成本的主要处理手段。

按照损伤材料的去除方式, CO_2 激光修复分为蒸发式修复和非蒸发式修复。由于非蒸发式修复难以应对较大尺寸损伤,因此现阶段国内外均采用蒸发式修复技术路线,即利用远小于损伤面积的光斑扫描辐照损伤区,辐照时间远小于热扩散时间,使损伤材料快速蒸发^[49-50]。

对于蒸发式 CO_2 激光修复技术,修复点造成的应力、激光调制与再沉积碎片是需要解决的关键问题^[51-52]。蒸发式修复技术必须具备对 CO_2 激光脉冲波形进行精细调控的能力,通过采用单激光脉冲瞬间气化剥离部分损伤材料,脉冲间隔充分冷却避免大范围材料熔融,多脉冲叠加去除全部的损伤材料,有效控制熔石英基底发生高温结构弛豫,最终实现对损伤修复过程中产生的残余应力的有效控制,获得残余应力受控的熔石英损伤修复点;并且,

通过修复激光脉冲扫描轨迹的设计可以有效控制修复点的形貌特征,抑制因修复点形貌引入的光调制增强现象。目前工程化应用的 CO_2 激光蒸发式修复技术已经实现了对修复点形貌的精细控制,一般把修复点控制为圆锥坑形貌,实现了抑制下游光调制增强效应(光调制度一般小2)。蒸发式修复技术采用的修复脉冲参数实现了把气化剥离的材料高速喷射远离元件表面,并采用相应的吸气收集设备,最小化气化剥离材料的沉积,避免循环使用中再沉积碎片导致的激光损伤。

近年来,NIF将损伤修复技术与机器学习技术结合,实现了对 $10\sim 300\ \mu\text{m}$ 损伤的快速修复^[53]。激光聚变研究中心研究了不同工艺参数下的修复点形貌,如图7所示,并攻克了修复低残余应力控制、微观形貌精确调控等关键单元技术,熔石英元件损伤修复数量逐年上升^[54]。

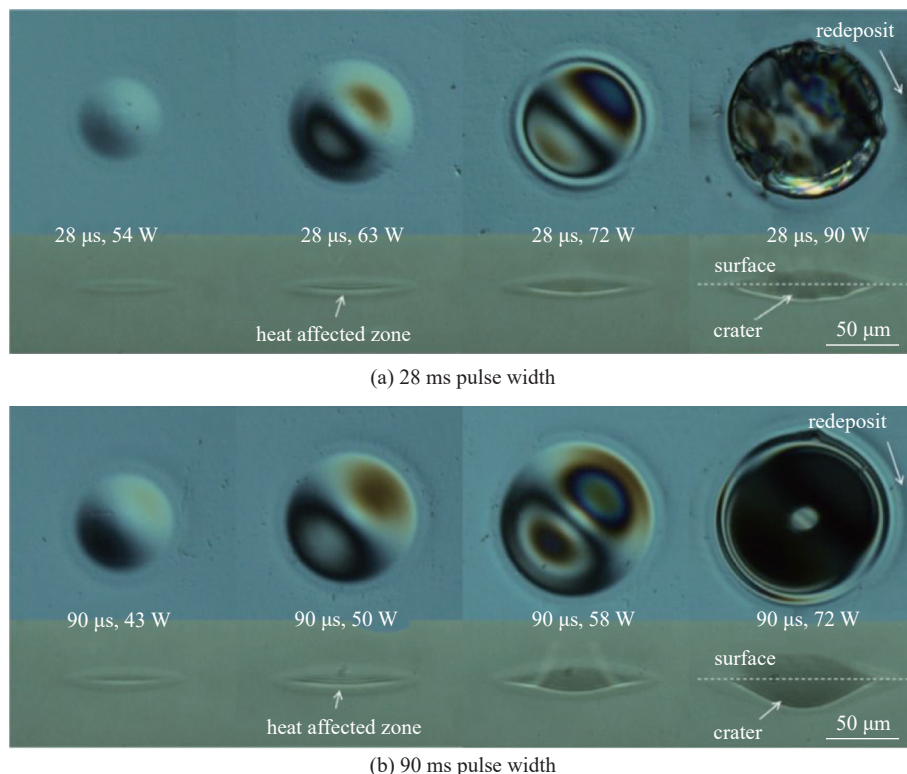


Fig. 7 Morphology of mitigated damage sites with different laser parameters

图7 不同激光参数下的损伤修复点形貌

3 提升装置负载能力的新材料与新技术探索

近年来,国内外以持续提升三倍频负载能力为牵引目标,积极发展了一批新工艺、新技术、新材料。

3.1 稀土离子掺杂熔石英与新型吸收陷阱

激光装置打靶过程中来自靶面的背向受激布里渊散射光会沿原光路返回,经过连续相位板调制后,可能造成传输反射镜表面的损伤。2014年,NIF研究人员为吸收装置终端的背反激光,开启了 Ce^{3+} 掺杂熔石英作为激光滤波材料的研究探索^[55]。 Ce^{3+} 掺杂熔石英兼具 Ce^{3+} 吸紫外、透红外的优异吸收特性,以及熔石英自身的高损伤阈值,在吸收玻璃方面具有广阔的应用前景。王方、邵竹锋等在熔石英中掺杂过渡元素离子制备得到的蓝阻玻璃,具有三倍频高吸收,基频高透过的光学特性,有望作为吸收型窗口元件,替代现有纯熔石英终端隔离窗口^[56]。

随着高功率固体激光装置输出能量的持续提升,杂散光通量也随之大幅提升,设计并研制一种能够实现通量超 $30\ \text{J}/\text{cm}^2$ 基频杂散光吸收的超高通量激光光束陷阱是保证高功率固体激光装置安全运行的迫切需求。郑天然等基于有限元分析,设计了“V型”结构形式作为超高通量激光光束陷阱的结构形式,通过增大辐照面积使得吸收玻璃表面及体内实际通量不超过入射光通量的35%,并在“接缝”位置采用“倒边自然过渡”设计,避免尖角处加工杂质富集与较强的激光调制引起激光损伤,如图8所示^[57]。激光聚变研究中心牵引中国建筑材料科学研究总院有限公司基于CVD熔石英掺杂工艺,完成了基频损伤阈值超过 $20\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的高阈值吸收玻璃的研发。

3.2 飞秒激光选择性刻蚀技术

熔石英元件中大尺寸的损伤点对现有熔石英元件单点损伤修复工艺提出了新的挑战,当面对较大尺寸损伤点

时,由于现役修复工艺是基于CO₂激光在熔石英元件上加工出固定径深比的圆锥形修复坑,如果单个损伤点横向尺寸增加一倍,修复工作量将是原有的8倍。方振华等开展了基于超快飞秒激光技术的新型修复工艺探索研究^[58]。飞秒激光加工的优势是脉冲宽度非常短,在较低的能量密度下就能得到非常高的瞬时功率。同时几乎不产生热扩散的优势,进而避免了无用功的热传导,又提升了效率和提高了加工精度。针对熔石英元件硬脆材料的特性,利用飞秒激光选择性刻蚀技术在元件表面进行损伤区域材料的去除。当飞秒激光通量稍高于改性阈值而小于烧蚀阈值时,可以获得均匀的材料改性。材料被激光辐照过的区域会转变成无定形态,其与酸或碱反应的化学活性比未改性区域更强,从而实现刻蚀选择性。对改性后的样品以氢氟酸与碱液分别刻蚀进行对比,以激光共聚焦显微镜观测刻蚀前后改性区域的深度变化。在元件表面改性后的深度约2 mm,而进行刻蚀后改性区域深度迅速增加,元件未改性区域基本无变化。对刻蚀溶液及刻蚀时间进行不断优化改进,测试刻蚀深度可达500 μm左右,基本达到损伤点修复需求。

3.3 紫外熔石英联合消释处理技术

氢氟酸刻蚀技术可以极大程度地提升熔石英元件的紫外损伤性能,但较深的刻蚀量会导致元件表面粗糙度增加和面形劣化。将两种乃至多种熔石英表面处理手段相结合已成为制备高品质熔石英元件的重要发展方向。由于反应离子束刻蚀可以有效去除熔石英亚表面的物理结构缺陷,而动态化学刻蚀一般不存在化学结构缺陷的次生问题,因此提出将两者相复合的思想,先利用反应离子束刻蚀去除熔石英亚表面的物理结构缺陷,再利用动态化学刻蚀去除次生的化学结构缺陷。邵婷、孙来喜等通过改变不同刻蚀深度配比,系统研究了复合刻蚀过程中各个环节对熔石英元件损伤性能及表面质量的影响规律,有效复合反应离子刻蚀和动态化学刻蚀技术,在较浅刻蚀深度下获得了高阈值、低粗糙度的熔石英光学元件表面,实现了熔石英损伤阈值的显著提升,如图9所示^[59-60]。

3.4 其他代表性技术

除了前文所述的用于直接提高熔石英表面损伤阈值的新技术,以及基于熔石英材料发展出的高阈值器件外,近年来还涌现出一系列为熔石英元件循环使用提供支撑的关键技术。例如,蒋晓龙等基于离子束刻蚀探索了相应的表面干法除膜与处理技术,为下架元件的预处理奠定基础^[61-62]。刘太祥等在氢氟酸表面刻蚀技术的基础上进一步研究了刻蚀对熔石英损伤点的钝化效果,如图10所示,未来有望与CO₂激光损伤修复技术形成互补,进一步增强循环元件的使用寿命^[63]。

4 结论

负载问题是国内外高功率固体激光装置的共同挑战,熔石英的损伤受到光学元件、光束质量和系统环境的影响。基于先进延缓技术获得高性能表面、利用激光损伤修复技术抑

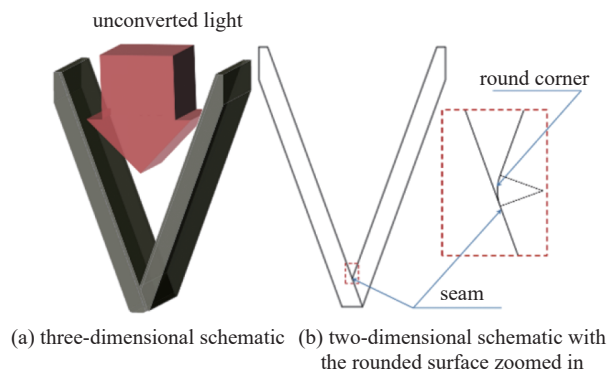


Fig. 8 Basic structure of a V-type beam dump^[57]

图8 V形结构的光收集器^[57]

对改性后的样品以氢氟酸与碱液分别刻蚀进行对比,以激光共聚焦显微镜观测刻蚀前后改性区域的深度变化。在元件表面改性后的深度约2 mm,而进行刻蚀后改性区域深度迅速增加,元件未改性区域基本无变化。对刻蚀溶液及刻蚀时间进行不断优化改进,测试刻蚀深度可达500 μm左右,基本达到损伤点修复需求。

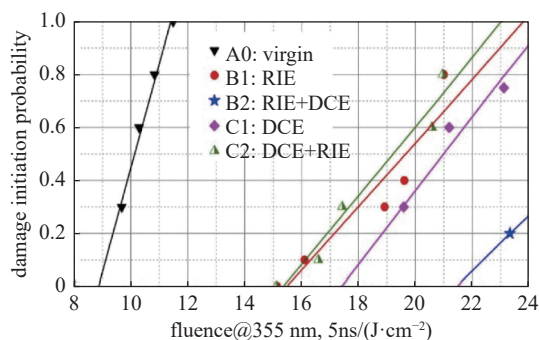


Fig. 9 Damage initiation probability versus laser fluence at 355 nm, 5 ns for the virgin sample and the samples treated with different processes^[60]

图9 不同表面处理工艺下的熔石英初始损伤概率^[60]

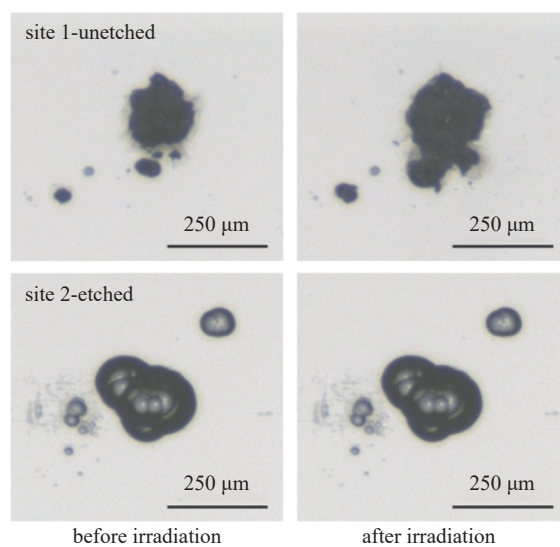


Fig. 10 Laser damage growth of an unetched site (site 1) and an etched site (site 2) on a same optics after flat-top-shaped ultraviolet laser irradiation with the wavelength of 351 nm, the duration of 5.0 ns and the fluence of 8.0 J/cm². The Site 2 is etched 24.0 h by using HF-based solution^[63]

图10 损伤点刻蚀后对8 J/cm²辐照损伤增长的抑制效果演示^[63]

制损伤增长,是元件循环使用策略的关键环节,对延长元件使用寿命、降低装置运行成本具有重要意义。同时,发展新材料、新技术持续提升装置负载能力,也将是未来的一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. *Nature*, 2022, 601(7894): 542-548.
- [2] 郑万国, 祖小涛, 袁晓东, 等. 高功率激光装置的负载能力及其相关物理问题[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (Zheng Wanguo, Zu Xiaotao, Yuan Xiaodong, et al. Damage resistance and physical problems of high power laser facilities[M]. Beijing: Science Press, 2014)
- [3] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [4] Nicolaizeau M, Miquel J L. LMJ status: fifth bundle commissioning and PW class laser coupling[C]//Proceedings of the SPIE 10898, High Power Lasers for Fusion Research V. 2019: 1089802.
- [5] Bass M. When everything damaged and we didn't know why[C]//Proceedings of the SPIE 10805, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018: 50th Anniversary Conference. 2018: 1080504.
- [6] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, et al. Large optics for the National Ignition Facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 295-351.
- [7] Hallo G, Lacombe C, Néauport J, et al. Detection and tracking of laser damage on LMJ vacuum windows by digital image correlation[C]//Proceedings of the SPIE 11732, Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications X. 2021: 117320C.
- [8] 韩伟, 冯斌, 郑奎兴, 等. 高功率激光装置熔石英紫外损伤增长研究[J]. *物理学报*, 2016, 65: 246102. (Han Wei, Feng Bin, Zheng Kuixing, et al. Laser-induced damage growth of fused silica at 351 nm on a large-aperture high-power laser facility[J]. *Acta Physics Sinica*, 2016, 65: 246102)
- [9] 杨李茗, 黄进, 刘红婕, 等. 熔石英元件紫外脉冲激光辐照损伤特性研究进展综述[J]. *光学学报*, 2022, 42: 1714004. (Yang Liming, Huang Jin, Liu Hongjie, et al. Review of research progress on damage characteristics of fused silica optics under ultraviolet pulsed laser irradiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42: 1714004)
- [10] Wong J, Ferreira J L, Lindsey E F, et al. Morphology and microstructure in fused silica induced by high fluence ultraviolet 3ω (355 nm) laser pulses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(3): 255-272.
- [11] Wang Ke, Ma Bin, Han Jiaqi, et al. Morphological and damage growth characteristics of shell-type damage of fused silica optics induced by ultraviolet laser pulses[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(32): 8882-8888.
- [12] 翟玲玲, 冯国英, 高翔, 等. 杂质诱导熔石英激光的损伤机理[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(11): 2836-2840. (Zhai Lingling, Feng Guoying, Gao Xiang, et al. Mechanism of laser damage induced by inclusions in fused silica[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(11): 2836-2840)
- [13] 高翔, 邱荣, 周国瑞, 等. 熔石英亚表面杂质对激光损伤概率的影响[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46: 0406002. (Gao Xiang, Qiu Rong, Zhou Guorui, et al. Effect of subsurface impurities of fused silica on laser induced damage probability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46: 0406002)
- [14] 石峰, 万稳, 戴一帆, 等. 磁流变抛光对熔石英激光损伤特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2931-2937. (Shi Feng, Wan Wen, Dai Yifan, et al. Effect of magnetorheological finishing on laser damage properties of fused silica[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2931-2937)
- [15] Carr C W, Bude J D, DeMange P. Laser-supported solid-state absorption fronts in silica[J]. *Physical Review B*, 2010, 82: 184304.
- [16] Carr C W, Radousky H B, Rubenchik A M, et al. Localized dynamics during laser-induced damage in optical materials[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92: 087401.
- [17] Demos S G, Raman R N, Negres R A. Time-resolved imaging of processes associated with exit-surface damage growth in fused silica following exposure to nanosecond laser pulses[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 4875-4888.
- [18] DeMange P, Negres R A, Raman R N, et al. Role of phase instabilities in the early response of bulk fused silica during laser-induced breakdown[J]. *Physical Review B*, 2011, 84: 054118.
- [19] Zhu Chengyu, Liang Lingxi, Peng Ge, et al. Explosion plume on the exit surface of fused silica during UV laser-induced damage[J]. *Results in Physics*, 2022, 32: 105094.
- [20] Liang Lingxi, Zhu Chengyu, Yuan Hang, et al. Study of the effects of stress wave behavior in laser-induced exit-surface damage of fused silica using time-resolved multi-polariscopic imaging[J]. *Journal of Laser Applications*, 2021, 33: 022018.
- [21] Jiang Yong, Liu Hufeng, Zhang Fawang, et al. Influence of ejected SiO₂ particles on the laser damage thresholds of fused silica[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 173: 112956.
- [22] Su Rui, Xiang Meizhen, Chen Jun, et al. Molecular dynamics simulation of shock induced ejection on fused silica surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115: 193508.
- [23] Tian Ye, Du Jincheng, Hu Dongxia, et al. Densification effects on porous silica: a molecular dynamics study[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 149: 58-61.
- [24] Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, 239(1/3): 16-48.
- [25] Lu Pengfei, Wu Liyuan, Yang Yang, et al. Stable structure and optical properties of fused silica with NBOHC-E' defect[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25: 086801.
- [26] Feng Qingyi, Deng Hongxiang, Huang Sizhao, et al. Strong UV laser absorption source near 355 nm in fused silica and its origination[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31849-31858.
- [27] Liu Hongjie, Wang Fengrui, Huang Jin, et al. Experimental study of 355 nm laser damage ignited by Fe and Ce impurities on fused silica surface[J]. *Optical*

- [Materials](#), 2019, 95: 109231.
- [28] Huang Jin, Wang Fengrui, Li Weihua, et al. Assessing the UV-pulse-laser-induced damage density of fused silica optics using photo-thermal absorption distribution probability curves[J]. [Optics Letters](#), 2022, 47(3): 653-656.
- [29] Bude J, Carr C W, Miller P E, et al. Particle damage sources for fused silica optics and their mitigation on high energy laser systems[J]. [Optics Express](#), 2017, 25(10): 11414-11435.
- [30] Suratwala T I, Miller P E, Bude J D, et al. HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces[J]. [Journal of the American Ceramic Society](#), 2011, 94(2): 416-428.
- [31] Cross D A, Carr C W. Creation of high-fluence precursors by 351-nm laser exposure on SiO₂ substrates[J]. [Optical Engineering](#), 2020, 60: 031010.
- [32] Zhu Deyan, Li Ping, Chai Xiangxu, et al. General design and experiment for separated final optics assembly on high energy laser system[J]. [Optics & Laser Technology](#), 2020, 128: 106213.
- [33] Carr C W, Cross D A, Norton M A, et al. The effect of laser pulse shape and duration on the size at which damage sites initiate and the implications to subsequent repair[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(S4): A859-A864.
- [34] Carr C W, Trenholme J B, Spaeth M L. Effect of temporal pulse shape on optical damage[J]. [Applied Physics Letters](#), 2007, 90: 041110.
- [35] Pryatel J A, Gourdin W H, Frieders S C, et al. Cleaning practices and facilities for the National Ignition Facility (NIF)[C]//Proceedings of the 9237, Laser-Induced Damage in Optical Materials. 2014: 92372H.
- [36] 程晓锋, 王洪彬, 苗心向, 等. 高功率固体激光驱动器污染控制及片状放大器洁净度改进[J]. [强激光与粒子束](#), 2013, 25(5): 1147-1151. (Cheng Xiaofeng, Wang Hongbin, Miao Xinxiang, et al. Contamination control for high-power solid-state laser driver and improvement of cleanliness in slab amplifiers[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2013, 25(5): 1147-1151)
- [37] Li Yuhan, Miao Xinxiang, Fang Zhenhua, et al. Damage behaviors of silica microparticles on fused silica optics under 355 nm high fluence laser[J]. [International Journal of Modern Physics B](#), 2022, 36: 2240068.
- [38] Bien-Aimé K, Belin C, Gallais L, et al. Impact of storage induced outgassing organic contamination on laser induced damage of silica optics at 351 nm[J]. [Optics Express](#), 2009, 17(21): 18703-18713.
- [39] Huang Lin, Yan Hongwei, Yan Lianghong, et al. Improvement of the environmental stability of sol-gel silica anti-reflection coatings[J]. [Journal of Sol-Gel Science and Technology](#), 2022, 101(3): 630-636.
- [40] Negres R A, Cross D A, Liao Z M, et al. Growth model for laser-induced damage on the exit surface of fused silica under UV, ns laser irradiation[J]. [Optics Express](#), 2014, 22(4): 3824-3844.
- [41] Liao Z M, Miller C, Cross D A, et al. Analysis of cumulative probability of growth of damage sites at the National Ignition Facility[C]//Proceedings of the SPIE 11910, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2021. 2021: 119100M.
- [42] Liao Z M, Carr C W, Cross D, et al. Damage performance of fused silica debris shield at the National Ignition Facility[C]//Proceedings of the SPIE 11173, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2019. 2019: 111730Y.
- [43] Veinhard M, Bonville O, Courchinoux R, et al. Quantification of laser-induced damage growth using fractal analysis[J]. [Optics Letters](#), 2017, 42(24): 5078-5081.
- [44] Lacombe C, Hallo G, Sozet M, et al. Dealing with LMJ final optics damage: post-processing and models[C]//Proceedings of the SPIE 11514, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2020. 2020: 115140G.
- [45] Huang Wanqing, Han Wei, Wang Fang, et al. Laser-induced damage growth on larger-aperture fused silica optical components at 351 nm[J]. [Chinese Physics Letters](#), 2009, 26: 017901.
- [46] Cormont P, Houee C, Da Costa Fernandes B, et al. Recycle loop deployed for the large optical components of Megajoule laser[C]//Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT). 2019: JT5A. 9.
- [47] Spaeth M L, Wegner P J, Suratwala T I, et al. Optics recycle loop strategy for NIF operations above UV laser-induced damage threshold[J]. [Fusion Science and Technology](#), 2016, 69(1): 265-294.
- [48] Ye Xin, Huang Jin, Liu Hongjie, et al. Advanced mitigation process (AMP) for improving laser damage threshold of fused silica optics[J]. [Scientific Reports](#), 2016, 6: 31111.
- [49] Mendez E, Nowak K M, Baker H J, et al. Localized CO₂ laser damage repair of fused silica optics[J]. [Applied Optics](#), 2006, 45(21): 5358-5367.
- [50] 李熙斌, 吕海兵, 向霞, 等. CO₂激光对熔石英表面小尺寸损伤的修复[J]. [强激光与粒子束](#), 2010, 22(9): 2209-2213. (Li Xibin, Lv Haibing, Xiang Xia, et al. Small size damage mitigation on fused silica surface with CO₂ laser[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2010, 22(9): 2209-2213)
- [51] Matthews M J, Bass I L, Guss G M, et al. Downstream intensification effects associated with CO₂ laser mitigation of fused silica[C]//Proceedings of the SPIE 6720, Laser-Induced Damage in Optical Materials. 2007: 67200A.
- [52] Bass I L, Guss G M, Nostrand M J, et al. An improved method of mitigating laser-induced surface damage growth in fused silica using a rastered pulsed CO₂ laser[C]//Proceedings of the SPIE 7842, Laser-Induced Damage in Optical Materials. 2010: 784220.
- [53] Trummer S, Larkin G, Kegelmeyer L, et al. Automated repair of laser damage on National Ignition Facility optics using machine learning[C]//Proceedings of the SPIE 10805, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2018: 50th Anniversary Conference. 2018: 108050L.
- [54] Zhang Chuanchao, Zhang Lijuan, Jiang Xiaolong, et al. Influence of pulse length on heat affected zones of evaporatively-mitigated damages of fused silica optics by CO₂ laser[J]. [Optics and Lasers in Engineering](#), 2020, 125: 105857.

- [55] Demos S G, Ehrmann P R, Qiu S R, et al. Dynamics of defects in Ce³⁺ doped silica affecting its performance as protective filter in ultraviolet high-power lasers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28798-28809.
- [56] Tian Ye, Han Wei, Yuan Xiaodong, et al. Structure and vibrations of cerium in silica glass from molecular dynamics simulations[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2021, 104(1): 208-217.
- [57] Zheng Tianran, Liu Hongjie, Wang Fang, et al. Design of laser beam dump with high laser-induced-damage threshold[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107561.
- [58] 方振华, 陈静, 蒋晓龙, 等. 熔石英元件的飞秒激光改性装置及其损伤点复合修复方法: CN112608035B[P]. 2022-06-07. (Fang Zhenhua, Chen Jing, Jiang Xiaolong, et al. Femtosecond laser modification device of fused quartz element and composite repair method of its damage point: CN112608035B[P]. 2022-06-07)
- [59] Sun Laixi, Huang Jin, Shao Ting, et al. Effects of combined process of reactive ion etching and dynamic chemical etching on UV laser damage resistance and surface quality of fused silica optics[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18006-18018.
- [60] Shao Ting, Shi Zhaohua, Sun Laixi, et al. Role of each step in the combined treatment of reactive ion etching and dynamic chemical etching for improving the laser-induced damage resistance of fused silica[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12365-12380.
- [61] Sun Wenfeng, Xiang Xia, Li Bo, et al. A recycling strategy of ion beam removal and recoating of sol-gel film on fused silica surface[J]. *Optik*, 2021, 242: 167259.
- [62] Jiang Xiaolong, Liao Wei, Li Bo, et al. Removal of antireflection sol-gel SiO₂ coating based on Ar ion beam etching[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 156: 111578.
- [63] Liu Taixiang, Yang Ke, Zhang Zhuo, et al. Hydrofluoric acid-based etching effect on surface pit, crack, and scratch and laser damage site of fused silica optics[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10705-10728.