

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2615097

熔融石英深紫外光学稳定性原位检测*

覃赵胤¹, 黎俊宏², 夏郭俊³, 程书博², 陈晓明¹

(1. 大连理工大学光电工程与仪器科学学院 大连 116024; 2. 长江大学物理与光电工程学院 荆州 434023;
3. 先进光学石英材料技术湖北省重点实验室(湖北菲利华石英玻璃股份有限公司) 荆州 434000)

摘要:熔融石英因具备宽光谱透射、高损伤阈值与优异稳定性,被广泛用作深紫外曝光与高功率激光系统的关键光学材料,但在 193 nm 高能脉冲辐照下仍可能出现透过率漂移、散射增强与表面损伤等退化现象,亟需在接近实际工况的条件下对其光学稳定性进行定量评估。为此,构建了一套基于 193 nm 准分子激光的熔融石英原位检测系统,系统集成激光准直、匀光光路、基于氟化镁分光片的双通道光功率监测光路、三轴扫描样品台以及红光辅助对准光路,并开发了包含设备控制、环境调控与数据分析的软硬件一体化平台。系统通过功率归一化、滤波、突变检测与趋势拟合以及空间统计采样等方法,实现熔融石英在 193 nm 辐照下透过率演变与损伤行为的实时追踪,可支持单点逐次辐照、多点序列辐照及长时连续辐照测试。实验结果表明,在单脉冲能量 8 mJ、脉冲频率 1 000 Hz、单点辐照时间约 30 min 条件下,系统能够有效抑制激光预热与热累积引起的测量漂移;与分光光度计的交叉验证显示,单点透过率退化量的最大误差为 0.29%,平均误差为 0.12%。针对 160 mm×160 mm 大尺寸样品的空间扫描测试进一步表明,样品平均透过率衰减为 4.04%,且面内分布具有较好的宏观一致性。该系统为深紫外光学材料的设计优化、寿命评估与工程筛选提供了一种可靠的原位测量手段。

关键词: 熔融石英; 193 nm 深紫外激光; 光学特性演变; 老化与损伤; 实时检测系统

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 413.1040

In situ detection of deep ultraviolet optical stability of fused silica

Qin Zhaoyin¹, Li Junhong², Xia Guojun³, Cheng Shubo², Chen Xiaoming¹

(1. School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 3. Hubei Key Laboratory
of Advanced Optical Quartz Materials Technology (Hubei Feilihua Quartz Glass Co., Ltd.), Jingzhou 434000, China)

Abstract: Fused silica is widely used as a key optical material in deep-ultraviolet exposure and high-power laser systems owing to its broad spectral transmission, high damage threshold, and excellent stability. However, under high-energy pulsed irradiation at 193 nm, it can still exhibit degradation phenomena such as transmittance drift, enhanced scattering, and surface damage, making it urgent to quantitatively evaluate its optical stability under conditions close to actual operation. To address this, we construct an in situ detection system for fused silica based on a 193 nm excimer laser. The system integrates a laser collimation optical path, a homogenization optical path, a dual-channel optical power monitoring path based on magnesium fluoride beam splitter, a three-axis motorized scanning stage, and a red-light auxiliary alignment optical path, alongside an integrated hardware and software platform for equipment control, environmental regulation, and data analysis. By utilizing power normalization and filtering, change-point detection and trend fitting, as well as spatial statistical sampling, the system enables real-time tracking of the transmittance evolution and damage behavior of fused silica under 193 nm irradiation, supporting single-point successive, multi-point sequential, and long-term continuous irradiation tests. Experimental results demonstrate that under a single-pulse energy of 8 mJ, a repetition rate of 1 000 Hz, and a single-point irradiation time of approximately 30 min, the system can effectively suppress measurement drifts caused by laser preheating and thermal accumulation. Cross-validation with a spectrophotometer shows that the maximum and average errors for single-

收稿日期: 2026-04-02 Received Date: 2026-04-02

* 基金项目: 国家自然科学基金(U24A20309)项目资助

point transmittance degradation are 0.29% and 0.12%, respectively. Spatial scanning tests on a 160 mm×160 mm large-area sample further show that the average transmittance attenuation of the sample is 4.04% and that the in-plane distribution has good macroscopic consistency. This system provides a reliable in situ measurement method for design optimization, lifetime assessment, and engineering screening of deep-ultraviolet optical materials.

Keywords: fused silica; 193 nm deep-ultraviolet laser; optical property evolution; aging and damage; real-time measurement system

0 引 言

熔融石英因其在深紫外至红外波段的高透射率、低双折射、高折射率均匀性以及优异的热稳定性和化学稳定性,已成为 193 nm 深紫外 (deep ultraviolet, DUV) 光学系统、高功率激光装置及相关光学窗口、掩模基底和光学元件中的核心材料^[1-2]。在准分子光刻、深紫外曝光以及高峰值功率激光应用中,材料的透过率稳定性、损伤阈值和长期可靠性会直接影响系统能量利用效率、成像质量与服役寿命^[3-4]。因此,建立一种能够在 193 nm 真实辐照条件下持续表征熔融石英光学性能演变的检测方法,具有明确的工程意义。

熔融石英在深紫外激光辐照下可能发生色心生成、致密化、表面微结构损伤等复杂过程^[2,5-9]。这些效应会导致透过率下降、散射增强和局部场分布改变,影响光学系统工作稳定性。围绕损伤机理与材料改性行为,相关文献已进行了较为充分的基础研究^[10-16],相关无损检测方法也为材料老化与缺陷损伤表征提供了参考^[17]。在工程应用层面,大尺寸光学系统测试和材料性能测试平台已有一定研究基础^[18-19],但面向 193 nm 辐照透过率退化的相关测量方法仍需进一步完善。

传统离线表征方法通常依赖辐照前后对样品进行单次比对,难以捕捉退化过程信息,也难以兼顾大尺寸样品面内均匀性的快速评估。此外,辐照装置在长时间运行过程中往往伴随功率波动、热漂移等问题,引入测量误差,需要对光路稳定性和信号采集过程进行综合控制^[20]。因此,能够在受控环境中实现在线监测^[21]、动态补偿和空间统计分析的一体化检测平台对于深紫外材料的可靠性研究而言具有重要意义。

针对上述问题,本文以 193 nm 深紫外辐照下熔融石英透过率退化原位测量和大尺寸样品均匀性评估为目标,构建了一套面向大尺寸熔融石英、光源波动补偿和环境稳定控制的深紫外原位检测系统。该系统通过双功率监测与归一化补偿实现对透过率演变的稳定追踪,通过三轴扫描平台与统计采样策略实现对大尺寸样品面内均匀性的定量评估,并通过氮气保护与液冷控制提升长时辐照过程中的测量稳定性。本文搭建并验证了一套适用于 193 nm 条件下原位表征的工程化测试平台;建立了面向透过率退化与突变识别的数据处理方法;在 160 mm×

160 mm 熔融石英样品上验证了该平台在单点退化评估和空间均匀性分析中的有效性。

1 透过率退化表征与原位测量原理

1.1 193 nm 辐照下熔融石英退化的透过率表征

本文研究讨论的熔融石英光学稳定性,主要指样品在 193 nm 脉冲激光作用下维持透过率的能力。在检测中,透过率随辐照过程的变化可作为评价材料光学性能退化的直接指标。

其原因在于多脉冲深紫外辐照过程中,熔融石英样品会随辐照脉冲数增加产生累积效应,样品中存在的缺陷、杂质或局部结构不均匀区域,均可能在 193 nm 光作用下参与能量吸收和结构响应过程,进而引起诱导吸收、散射增强或局部微损伤等附加损耗;随着辐照剂量增加,这类附加损耗逐渐累积,使样品对 193 nm 光的有效传输能力下降,最终表现为透过率衰减。

为描述辐照输入与透过率退化之间的关系,设样品表面入射平均光功率为 P_{in} ,脉冲重复频率为 f ,光斑面积为 A ,则单脉冲能量密度如式(1)所示。

$$F = \frac{P_{in}}{fA} \quad (1)$$

经时间 t 后,单位面积总辐照剂量如式(2)所示。

$$D(t) = F \times f \times t = \frac{P_{in} t}{A} \quad (2)$$

在稳定输入光的实验条件下,累计剂量随辐照时间增加而增加。193 nm 辐照作用下,累计辐照剂量 $D(t)$ 与材料的辐照响应高度相关,发生诱导吸收、散射增强及局部微损伤等因素引起的综合退化现象。累积辐照剂量下的表征关系如式(3)所示。

$$\Delta\alpha(t) = g[D(t)] \quad (3)$$

式中: $\Delta\alpha(t)$ 为辐照后相对于初始状态增加的等效附加损耗系数; $g[\cdot]$ 表示熔融石英在 193 nm 辐照下等效损耗响应关系。该表达式用于说明累计辐照剂量与材料附加损耗的关联关系。进一步地,附加损耗的增加会影响样品对 193 nm 光的有效传输能力。在厚度为 L 的样品中,以辐照初始稳定阶段 t_0 的透过率为参考,样品透过率 $T(t)$ 如式(4)所示。

$$T(t) = T(t_0) \exp[-\Delta\alpha(t)L] \quad (4)$$

综上,193 nm 激光入射功率和辐照时间首先决定累

计辐照剂量 $D(t)$, 累计剂量通过等效附加损耗 $\Delta\alpha(t)$ 影响样品透光性能, 最终表现为透过率 $T(t)$ 的衰减。

1.2 透过率退化测量方法

辐照退化检测中, 传统离线检测方法的测量光路与辐照光路相互独立, 需先测量样品初始透过率, 再将样品移至辐照装置完成设定剂量辐照, 辐照后复测透过率。该方法只能得到辐照前后的对比结果, 无法连续记录退化过程。本文将透过率测量功能集成到辐照光路中, 采用辐照光路的原位功率比值测量方法。该方法在自建辐照光路中完成测量, 便于结合样品台开展大尺寸样品的面内多点测量。在此基础上, 系统通过双通道功率比值计算透过率, 实现退化过程跟踪, 并对激光输入功率波动进行归一化补偿。其测量原理如图1所示。

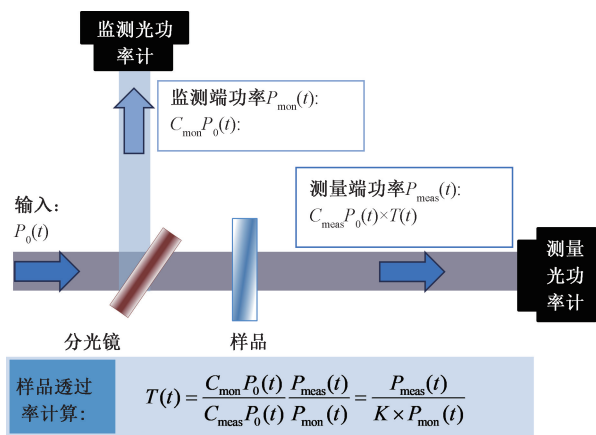


图1 双通道原位透过率测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of dual-channel in-situ transmittance measurement principle

激光器在 t 时刻瞬时功率为 $P_0(t)$ 、 $P_{\text{mon}}(t)$ 和 $P_{\text{meas}}(t)$ 分别表示监测端和测量端采集到的功率信号, C_{mon} 和 C_{meas} 分别表示监测光路和测量光路的传输效率。定义系统校准系数 $K = C_{\text{meas}}/C_{\text{mon}}$, 即可计算得到样品透过率 $T(t)$ 。样品辐照过程中透过率衰减量如式(5)所示。

$$\Delta T = T(t_0) - T(t) \quad (5)$$

式中: $T(t_0)$ 为辐照初始稳定阶段的透过率。通过该归一化方式, 共同波动项在比值计算中被削弱, 从而降低光源波动和光路漂移对透过率计算的影响。

2 系统组成

基于上述理论模型, 本文构建了 193 nm 深紫外原位检测系统。该系统采用模块化设计理念, 围绕深紫外光与可见红光双波段协同工作模式, 构建了检测光路、环境调控以及软件控制与计算 3 大核心模块, 整体架构如图2所示。

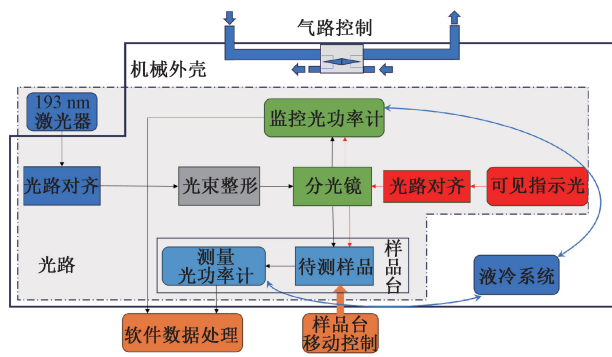


图2 熔融石英光学特性检测系统

Fig. 2 Framework diagram of the fused silica optical property detection system

2.1 检测光路

深紫外光下的熔融石英光学特性检测光路设计如图3所示。系统光路主要分为4个区域, 激光准直区、能量调节与匀光区、合束与监控区和样品区。

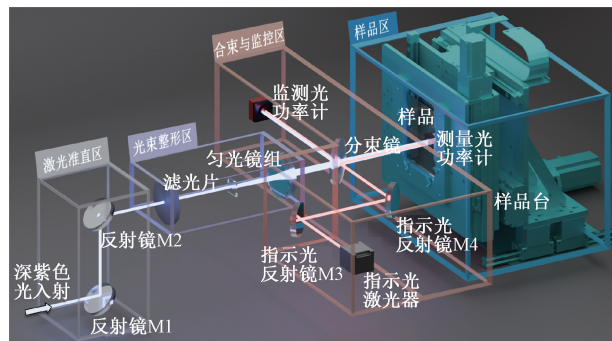


图3 深紫外原位检测光路

Fig. 3 Optical path of the DUV in situ detection system

1) 激光准直区

激光准直模块由爬高架和反射镜组组成。193 nm 准分子激光由激光器出口输出后, 经反射镜组完成高度匹配和传播方向调节, 使主光路与样品测试区域保持同轴。反射镜安装在可调镜架上, 用于修正光束角度, 同时对回返杂散光具有一定阻拦作用, 可降低激光器受损风险。

2) 能量调节与光束匀化区

该区域用于调节入射的 193 nm 激光能量, 改善测量面空间能量分布, 降低光斑非均匀性对结果的影响。

本文的匀化方案为微透镜阵列与凸透镜组合的匀光镜组, 微透镜阵列实物如图4所示。193 nm 激光通过微透镜阵列后被分解为多个子光束, 再经凸透镜在测试平面叠加, 形成均匀度较高的平顶光斑。

匀化后光斑在短轴和长轴方向的归一化能量分布曲线如图5所示。经实测, 匀光镜组自身会引入约 20% 的额外能量衰减。

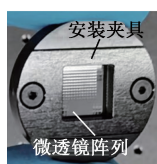


图4 微透镜阵列器件实物

Fig. 4 Physical diagram of microlens array device

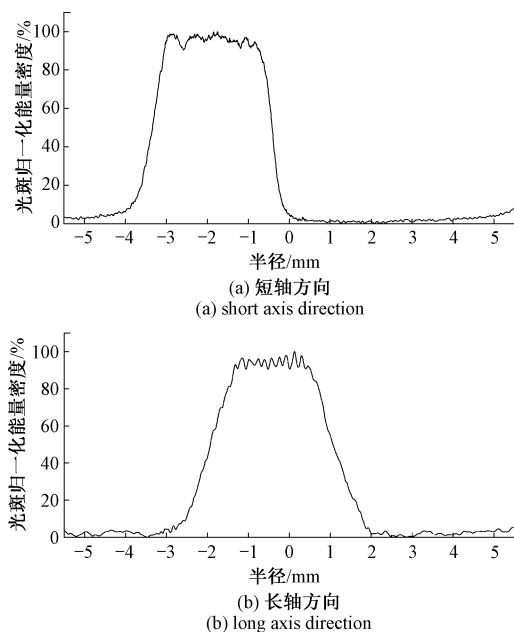


图5 匀化后激光剖面归一化能量分布曲线

Fig. 5 Normalized energy distribution curve of the laser profile after homogenization

3) 合束与监控区

该区域核心元件为氟化镁分光片,其将 193 nm 主光束分为透射光和反射光,透射光传输至样品区进行辐照测量,反射光由监测端光功率计实时采集,用于激光输入波动记录,为后续透过率归一化计算提供参考信号。

由于 193 nm 光不可见,系统引入低功率红色指示激光,通过合束光路辅助样品位置和光斑区域调节。指示激光仅用于对准,不参与透过率计算。

4) 样品区

样品区用于实现大尺寸熔融石英样品的定位、扫描辐照与透过光功率采集。平台可承载最大尺寸为 170 mm×170 mm×10 mm 的矩形体,由于限位设计,三轴平台在测量平面可实现约 158 mm×158 mm 的移动范围,能够覆盖样品有效区域。测量光功率计探头固定在样品后方与主光束同轴,用于记录透过样品后的光功率。通过三轴平台的移动,可将统一光束依次辐照样品不同区域,实现多点光学性能测试。平台各轴采用光电限位传

感器,避免运行过程中与周边器件碰撞。样品台结构如图 6(a)所示。

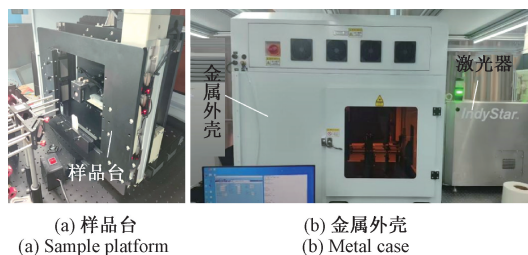


图6 实验装置图像

Fig. 6 Experimental device image

2.2 环境调控

该模块旨在为工件测试提供稳定可控的内部环境并保障测试精度和实验安全,主要由 4 部分组成。

1) 半密封金属外壳

外壳如图 6(b)所示,其采用金属框架结构,具备较高机械强度,可提供物理隔离,防止外界扰动进入光路区域,并阻挡激光外泄。整机外形尺寸约为 1 300 mm×950 mm×1 200 mm,上层用于安装液冷机、工控机和气路控制模块,下层为半密闭箱体,用于容纳光学及检测设备。箱体设有激光入口、观察窗和气路接口。外壳外部集成显示操作设备、急停按钮、安全门监测和三色警示灯,以满足实验操作和安全需求。

2) 气路系统与环境监控系统

气路系统由氮气入口、单向排气出口、电磁阀及管路构成,环境监控模块实时监测箱体内的温湿度与含氧量,并与气路系统形成闭环。系统引入压力>0.5 MPa 的氮气填充,在环境监控系统反馈下自动开启或关闭电磁阀,使腔内含氧量维持在设定范围内,有效抑制臭氧生成和器件腐蚀。

3) 液冷系统

针对光功率计在长时间高功率辐照下工作的热累积问题,系统引入 CS-ARC-Q420A110 水冷机,通过控温算法对光功率计外壳进行主动散热,使光功率计外壳温度保持在设定范围内,抑制温度导致的测量零点漂移。

4) 系统主机

系统主机内置实验控制与数据处理软件,通过外接显示器与键鼠实现整机统一调度与操作管理。

2.3 软件控制与计算

该软件模块主要完成 193 nm 激光器功率与模式控制、光功率计数据采集、三轴样品台运动控制、指示激光开关,以及环境监测与数据存储计算等功能。

软件模块主要涵盖硬件调控与数据分析,逻辑上划分为 3 大核心子模块:

1) 实验控制子模块

该模块实现对激光器、光功率计、三轴移动台与指示激光器的独立启停和参数设置。支持实验实时监控、激光工作模式调节和平台多点自动扫描路径预设,并能实时绘制测量光功率、监测光功率及相关计算数据的动态演变曲线。

2) 环境控制子模块

环境控制模块负责含氧量调节和光功率计温度管理。含氧量控制通过恒压氮气源、电磁阀和排气阀实现:在气密环境下持续通入氮气,当监测到含氧量低于设定值时自动关闭电磁阀,维持腔内环境。液冷控制则根据光功率计外壳温度自动调节水冷机工作功率,有效抑制辐照导致的测量值异常增长。

3) 数据处理子模块

数据处理模块对存储的光功率计数据进行滤波、归一化与透过率计算。通过阈值判据和趋势分析,标记透过率突变点,为激光损伤阈值或老化速率的提取提供基础。

3 实验与方法

3.1 实验设置

实验辐照光源为 Coherent IndyStar 193 nm 准分子激光器,实验设置输出单脉冲能量 8 mJ,脉冲频率 1 000 Hz,辐照光斑尺寸 3 mm×3 mm。样品通过三轴移动台实现多点扫描,测量光功率计与监测光功率计同步采集数据,采样频率 1 Hz。实验环境温度在 22℃±1℃,辐照稳定后能维持在 24℃±1℃,为降低环境波动对光路的影响,整个实验在充氮环境(氧气浓度约 0.4 vol%)下进行。

3.2 实验流程

本文研究的激光辐照实验流程如图 7 所示,其中部分点位可以在激光辐照前后使用分光光度计检测透过率,对实验结果进行交叉验证。

3.3 透过率计算与数据处理

为了在长时间 193 nm 辐照条件下稳定、准确地追踪熔融石英光学特性的演变,本文系统在数据处理端构建了一套从原始功率信号到工程指标的分析流程,主要包括信号预处理、透过率计算与归一化补偿、突变检测与趋势拟合以及空间统计分析 4 个阶段。

1) 在信号预处理阶段,测量端与监测端光功率计的时间序列数据会同步读取,并经过小波、滑动平均等滤波算法抑制高频随机噪声。同时,针对激光器启动初期存在的短时预热过程,系统将识别前几分钟内的明显上升段并予以标记或剔除,只保留输出功率进入

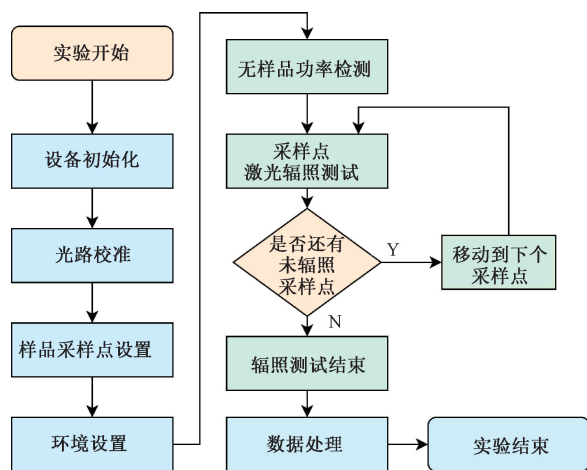


图7 辐照实验流程

Fig. 7 Irradiation experiment flowchart

稳态后的有效数据,避免该阶段对后续透过率计算造成系统性偏差。

2) 在透过率计算与功率归一化补偿方面,根据 1.2 节建立的透过率计算模型,系统利用无样品条件下监测端与测量端光功率的比值作为标定系数 K ,在有样品实验中实时计算瞬时透过率。通过该方式,降低光源与光路环境的波动对测量结果造成的影响。

3) 为了从长时间序列中提取具有工程意义的指标,系统在突变检测与趋势分析中结合了阈值判据与统计方法。一方面,基于透过率一阶差分或滑动斜率构造灵敏度函数,当其超过设定阈值时标记为候选突变点,对应于潜在的损伤起始或局部结构剧变;另一方面,对稳态段进行线性或指数拟合,提取透过率下降速率、稳态透过率偏移量等参数,分别对应材料缓慢致密化、色心累积或散射中心增多等不同机制。对于单点逐次辐照(1-on-1)、多点序列辐照(S-on-1)损伤阈值测试,设置好光路条件后,系统还可统计多次试验中首次出现突变点的能量密度分布,从而估算激光损伤阈值及其置信区间。

4) 在空间统计分析层面,透过率随时间的变化量与损伤起始时间等特征参数被映射到样品实际位置上,进行区域分析。结合前述采样法的无偏性与精度分析,可以在有限点位测试的前提下,给出整块样品在特定辐照剂量下的平均透过率衰减、空间均匀性指标以及边缘区性能裕量等工程量。

综合而言,上述数据处理流程使本检测平台不仅能够对单一测试点的透过率退化过程给出较高时间分辨率的描述,也能够对大尺寸熔融石英组件的整体光学稳定性与寿命相关特征进行统计评估,为后续组件筛选与工艺优化提供量化依据。

4 结果与讨论

4.1 单采样点辐照测试结果

1) 数据预处理

采用小波变换滤除高频噪声,利用监测光功率数据对测量值归一化,消除激光器输出波动影响,并根据设计给予系统波动补偿。

2) 透过率计算

无样品实验中,测量光功率计读数为 4.05 W,监测光功率计读数为 0.34 W,对应系统校准系数 $K \approx 11.9$ 。该系数用于将辐照过程中测得的功率信号转换为归一化透过率,以减小激光输出波动带来的系统误差。

单点辐照实验过程的数据如图 8 所示。可以看到,在辐照开始后的约 1 min 内,测量端与监测端光功率计均出现短时上升趋势,说明系统在每次启动后存在预热阶段。该阶段会引起瞬态波动,因此在正式分析中需予以识别并剔除。进入稳态后,测量端读数随辐照时间持续下降,反映样品在深紫外激光辐照下出现逐步退化;曲线未出现突发式剧烈跌落,说明在本文实验条件下样品主要表现为渐进式透过率衰减,而非灾变型损伤。进一步分析表明,监测端光功率计原始数据存在周期性波动,直接计算时会导致透过率曲线出现最大约 $\pm 0.17\%$ 的周期性起伏,但在后续平滑与归一化处理中可显著削弱该影响。

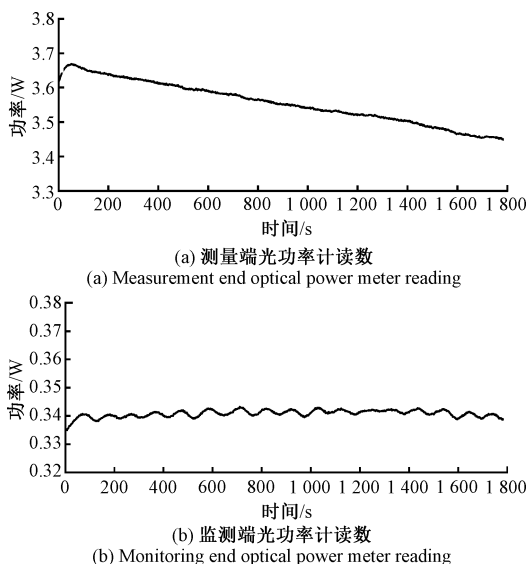


图 8 单采样点辐照实验数据

Fig. 8 Single sampling point irradiation experiment data graph

经处理,样品透过率由约 90.39% 下降至 85.49%,衰减 4.90%;采用分光光度计对辐照前后样品进行独立测

量,得到透过率由 90.44% 下降至 85.47%,衰减 4.97%。两种方法的结果吻合良好,表明本系统能够较准确地追踪单点透过率退化趋势。

4.2 多点扫描测试与透过率空间分布

本文选用一块整体均匀性较好的 160 mm×160 mm 大尺寸熔融石英样品,重点研究对样品中心区域辐照导致的透过率衰减现象。设置中心 150 mm×150 mm 区域作为有效测试区。通过网格将该区域按 3×3 划分为 9 个区域,在每个子区域中设置 4 个采样点。利用三轴样品移动平台控制样品位置依次进行单点辐照实验。每个采样点在相同的脉冲重复频率和单脉冲能量条件下进行持续辐照,并记录测量端与监测端光功率的全过程数据。最后对各点位数据进行处理计算,得到不同位置在辐照过程中的透过率退化数据,最终结果取均值。

综上,单点与多点实验结果表明,所构建的 193 nm 深紫外检测系统不仅能够实现熔融石英在辐照过程中的透过率原位监测,也能够解析不同区域之间的性能差异,为大尺寸熔融石英组件的可靠性评估和寿命预测提供实验基础。

4.3 空间采样与结果分析

为了在有限测试时间内评估大尺寸熔融石英板材在 193 nm 辐照后的整体透过率退化与均匀性,引入基于统计采样法的空间评估策略。

1) 采样点设置

参考光学检测的相关规范,取点布局需满足如下核心条件以规避热效应干扰:相邻测试点间距需 ≥ 2 倍光斑直径,以避免热影响区重叠;测试点距元件边缘需 ≥ 2 倍光斑直径,确保边缘区域的有效检测。

实验选用尺寸为 160 mm×160 mm 熔融石英样品,设置有效测试区为中心 150 mm×150 mm 方形区域。将有效测试区域按 3×3 划分为 9 个区域,每个区域围绕各自的中心点,在其左上、右上、左下、右下 4 个角布设采样点,同一区域 4 个采样点均值代表该区域的平均透过率衰减值。区域内,采样点与中心点的水平、垂直偏移量均为 15 mm。同一区域中,最小间距为 30 mm;相邻区域之间,最小间距为 20 mm;间距充足,无热影响区重叠风险。

2) 统计结果分析

熔融石英样品 9 个区域中所有采样点辐照实验后透过率衰减结果及其区域平均值如表 1 所示,用于评估整块样品在深紫外辐照后的面内均匀性。由表 1 可以看出,样品整体透过率衰减均值为 4.04%,区域间变异系数为 2.0%,表明辐照区域透过率衰减在宏观尺度上具有较好的均匀性。该结果说明,在研究所采用的辐照条件下,样品不同区域的平均透过率退化程

度接近,材料整体表现出较稳定的深紫外抗辐照特性。

表 1 熔融石英样品透过率衰减采样测量结果
Table 1 The attenuation measurement results of the transmittance of the fused silica sample (%)

区域编号	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	平均值
区域 1	4.90	3.28	3.86	4.42	4.12
区域 2	4.04	4.59	4.47	3.29	4.10
区域 3	5.05	3.53	4.32	3.06	3.99
区域 4	3.68	5.03	3.37	3.88	3.99
区域 5	5.14	4.62	3.03	3.46	4.06
区域 6	3.71	4.13	3.13	4.54	3.88
区域 7	3.26	4.41	3.85	5.03	4.14
区域 8	4.14	3.74	4.05	4.29	4.06
区域 9	3.51	4.68	3.12	4.80	4.03

与表 1 对应的各区域透过率衰减均值及区内波动范围如图 9 所示。

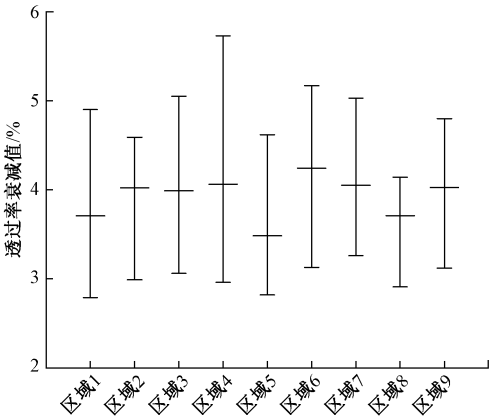


图 9 样品 9 个测试区域透过率衰减及其波动范围
Fig. 9 The attenuation and fluctuation range of the transmittance in 9 test areas of the sample

将样品表面划分为 9 个测试区域后,各区域透过率衰减均值整体接近,但同一区域内不同采样点之间存在较为明显的波动。误差棒显示同一区域内不同采样点之间具有一定离散性,9 个区域内采样点变异系数的平均值约为 17.3%,提示在当前辐照条件下,局部缺陷分布或光斑能量空间不均匀性仍会对单点结果产生影响。因此,大尺寸熔融石英的深紫外稳定性评价不宜仅依赖单点测试结果,还应结合区域平均值和局部波动信息进行综合判断。

与此同时,对部分点位进行的分光光度计交叉验证表明,两种方法在单点透过率衰减量上的平均误差为

0.12%,最大误差约为 0.29%,进一步证实了本文系统的测量准确性与结果可靠性。

5 结 论

本文针对 193 nm 深紫外工况下大尺寸熔融石英的光学稳定性评估需求,构建了一套集光路、环境控制、运动平台与数据分析于一体的原位检测系统,为 193 nm 深紫外条件下大尺寸熔融石英光学稳定性评估提供了一种原位检测方法。该系统通过激光准直与匀光设计、基于氟化镁分光片的双通道功率监测光路以及三轴扫描样品平台,实现了对样品透过率退化过程的连续跟踪与多点测量;同时结合氮气保护、含氧量监测及液冷控温等工程化设计,有效抑制了臭氧吸收、热累积与探测器漂移等因素对结果的影响;为高功率 193 nm 光学组件的寿命预测与工程设计提供了有力支撑。

辐照实验结果表明,在单脉冲能量 8 mJ、脉冲频率 1 000 Hz、单点辐照时间约 30 min 的辐照条件下,本文系统能够稳定获取熔融石英样品的透过率演变曲线,并通过归一化与平滑处理将实时波动控制在可分析范围内。单点测量与分光光度计的交叉验证表明,本文系统在单点透过率衰减量上的平均误差为 0.12%,最大误差为 0.29%。对于大尺寸样品的空间扫描,系统测得样品平均透过率衰减为 4.04%,区域间变异系数为 2.0%,表明样品在宏观尺度上具有较好一致性,而采样点间仍存在一定离散性,反映出局部缺陷分布或光斑能量微小差异对单点退化结果的影响。

本文研究也存在一定局限性,当前样品数量和材料类型较少、测量过程依然受到热漂移影响、系统的测量参数较为单一。后续将进一步完善深紫外辐照下熔融石英光学退化过程的稳定性综合评价体系。

参考文献

[1] Moore L A, Smith C M. Fused silica as an optical material[Invited][J]. Optical Materials Express, 2022, 12(8): 3043-3059.
[2] 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(17): 279-301.
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(17): 279-301.
[3] Guo X, Zhu X H, Jiang R, et al. Short-term damage and its mechanism of a CaF2 window for a DUV lithography machine[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(9): 3705-3717.

- [4] Zhang S, Zhang L B, Gai T Y, et al. Aberration analysis and compensate method of a BP neural network and sparrow search algorithm in deep ultraviolet lithography[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(20): 6023-6032.
- [5] Jiang X W, Chen D B, Quan Y CH, et al. The densification characteristics of polished fused silica glass and its scattering characteristics[J]. *Photonics*, 2023, 10(4): 447.
- [6] Skuja L, Ollier N, Kajihara K, et al. Optical absorption of excimer laser-induced dichlorine monoxide in silica glass and excitation of singlet oxygen luminescence by energy transfer from chlorine molecules [J]. *Physica Status Solidi(A)*, 2021, 218(15): 2100009.
- [7] Bogatskaya A, Gulina Y, Smirnov N, et al. An experimental study of multiphoton ionization in fused silica at IR and visible wavelengths [J]. *Photonics*, 2023, 10(5): 515.
- [8] Rehman Z U, Ullah S, Qayyum H, et al. Phase transformations initiated by optical breakdown in bulk of fused silica[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106630.
- [9] Zhu C Y, Liang L X, Peng G, et al. Explosion plume on the exit surface of fused silica during UV laser-induced damage[J]. *Results in Physics*, 2022, 32: 105094.
- [10] Radhakrishnan A, Gateau J, Vlугter P, et al. Femtosecond laser-shockwave induced densification in fused silica [J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(7): 2886-2898.
- [11] Momgaudis B, Vengris M, Melninkaitis A. Time-resolved holographic study of laser-induced fatigue in bulk of sapphire and fused silica[J]. *Optics Continuum*, 2022, 1(4): 759-771.
- [12] Zheng Q J, Ma Y Z, Ni S, et al. Enhanced nanomechanical properties of fused silica surface by wet etching and its implication on laser-induced damage[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2025, 656: 123501.
- [13] Xie Y F, Feng F, Li Y J, et al. Molecular dynamics simulation of shock-induced structural change and permanent densification of silica glass: The effect of initial density[J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 159: 103913.
- [14] Gao X, Qi Y N, Mu Q, et al. Propagation mechanism of E'-center and NBOHC in fused silica induced by gamma-ray irradiation [J]. *Optical Materials Express*, 2024, 14(10): 2472-2487.
- [15] Zhou J N, Li B C. Correlation between 193 nm absorption and photoluminescence-related defects for fused silica materials [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 775-784.
- [16] Li F T, Sun H J, Liu W J, et al. Accurate determination of the low-light-level absorption of DUV-fused silica at 193 nm with laser calorimetry [J]. *Photonics*, 2024, 11(4): 305.
- [17] 郭雪吟,周伟,马连华,等. 含缺陷纤维复合材料热老化后变形与损伤破坏声发射行为[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(14): 172-178.
Guo Xueyin, Zhou Wei, Ma Lianhua, et al. Acoustic emission behavior of deformation and damage of composite materials with defective fibers after thermal aging [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(14): 172-178.
- [18] An Q C, Wang K, Liu X Y, et al. Integrated test system for large-aperture telescopes based on astrophotonics interconnections [J]. *Instrumentation*, 2024, 11(1): 1-9.
- [19] 江子奇,赵锐,郭荣斌,等. 低损耗材料高温介电性能测试系统设计与实现[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(13): 182-186.
Jiang Ziqi, Zhao Rui, Guo Rongbin, et al. Design and implementation of testing system for high temperature dielectric properties of low loss material [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(13): 182-186.
- [20] 夏雨,赵威,曾凯,等. 基于光纤多普勒效应的微半球谐振子测振方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(9): 24-31.
Xia Yu, Zhao Wei, Zeng Kai, et al. Research on the vibration measurement method of micro-hemispherical resonator based on fiber optic Doppler effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(9): 24-31.
- [21] 孟繁悦,韩赞东,石承昊. 多通道在线涡流检测系统研制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(5): 51-57.
Meng Fanyue, Han Zandong, Shi Chenghao. Research on multichannel online eddy current testing system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(5): 51-57.

作者简介



覃赵胤,2023 年于大连理工大学获得学士学位,现为大连理工大学硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计和深紫外激光应用。

E-mail:19977264182@mail.dlut.edu.cn

Qin Zhaoyin received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2023. Now he is an

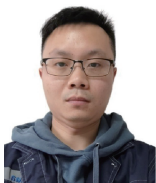
M. Sc. candidate in Dalian University of Technology. His main research interests include optical system design and deep-ultraviolet laser applications.



黎俊宏, 2023 年于长江大学获得学士学位, 现为长江大学硕士研究生, 主要研究方向为光电信息工程。

E-mail: 2023720389@yangtzeu.edu.cn

Li Junhong received his B. Sc. degree from Yangtze University in 2023. Now he is an M. Sc. candidate in Yangtze University. His main research interests include optoelectronic information engineering.



夏郭俊, 2014 年于长江大学获得学士学位, 现为湖北菲利华石英玻璃股份有限公司检测中心主任, 兼任长江大学物理与光电工程学院硕士生导师, 主要研究方向为石英材料基础性能的测试表征和应用性能的试验、分析方法的研究。

E-mail: xiaguojun@feilihua.com

Xia Guojun received his B. Sc. degree from Yangtze University in 2014. Now he is the director of Testing Center at Hubei Feilihua Quartz Glass Co., Ltd., and a master's supervisor at the College of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University. His main research interests include testing and characterization of basic properties of quartz materials, application performance testing and research on analysis methods.



陈晓明 (通信作者), 2006 年于日本富山大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无损检测、智能控制与检测、光学仪器与系统。

E-mail: chen_xm@dlut.edu.cn

Chen Xiaoming (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Toyama in 2006. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Dalian University of Technology. His main research interests include non-destructive testing, intelligent control and detection and optical instruments and systems.