

抑制缺陷：激光助力熔石英元件低缺陷制造

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24299.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

抑制缺陷：激光助力熔石英元件低缺陷制造。熔石英玻璃

熔石英玻璃由于其化学性能稳定、软化温度高、热膨胀系数低、抗辐射性强和从紫外波段到红外波段都有较好的透光性能等，被广泛应用于航空航天、聚变能源、激光攻防、高能物理等国家重大光学工程和国防领域。以美国国家点火装置（NIF）为代表的激光聚变装置对核爆模拟、聚变能源和前沿科学研究具有重大的战略意义，一直是世界强国主力推动的大科学装置之一。

在NIF中，由熔石英玻璃制备的窗口、透镜和衍射元件等总数达两千多片。然而，低激光通量下（ $\sim 8\text{J}/\text{cm}^2$ ，3w，3ns）由加工缺陷引发的紫外激光诱导损伤问题严重影响熔石英元件的性能和寿命，尽管熔石英本征表面的激光诱导损伤阈值（LIDT）达 $>100\text{J}/\text{cm}^2$ 。为提升熔石英元件的抗损伤性能，劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）等研究机构在过去几十年中从激光诱导表面损伤机制、传统加工工艺改进、后处理技术引入、新的加工理念和方法等方面并行入手，进行了大量的缺陷消除/抑制工作，但是直到现在，LLNL仍必须采用光学循环策略来确保NIF的运行。

制备具有高紫外LIDT的熔石英元件的主要难点在于：

- 1、作为一种典型的硬脆材料，当前基于机械划擦机理以材料脆性和塑性去除为主的接触式加工方法不可避免地会在元件表面/亚表面引入裂纹、划痕等加工缺陷。
- 2、研磨阶段缺乏三维全口径亚表面缺陷表征方法，当前定量的亚表面缺陷表征方法多是局部检测，且只能通过试样间接检测，难以准确反映实际加工中的最大亚表面缺陷深度。缺乏对最大亚表面缺陷深度的准确预估会导致材料去除不足，抛光后残留有亚表面缺陷，难以掌握最后加工质量。
- 3、残留的亚表面缺陷及抛光引入的抛光污染需要后处理，然而当前的后处理技术在去除/钝化缺陷的同时，本身会引入新的缺陷。

针对高抗紫外激光诱导损伤熔石英元件制备难题，中国科学院上海光学精密机械研究所魏朝阳团队提出基于激光的缺陷表征和去除工艺，并通过全链路激光非接触加工，实现了高抗紫外激光诱导损伤熔石英元件的制造。通过微秒脉冲CO₂激光层析烧蚀技术克服了熔石英元件亚表面缺陷三维全口径表征难题，并进一步提出了CO₂激光工艺链，所制备的样品的紫外激光诱导损伤阈值分别比传统工艺链制备的样品高41%（0%概率）和65.7%（100%概率）。这种基于激光的缺陷表征和去除方法为指导传统研磨加工工艺的优化和高抗激光损伤熔石英元件的制备提供了一个新的工具和方向。

该成果以Laser-based defect characterization and removal process for manufacturing fused silica optic with high ultraviolet laser damage threshold为题发表在Light Advanced Manufacturing。

为了制备具有高紫外LIDT的熔石英元件，必须对研磨过程中产生的亚表面缺陷进行有效管理。如何准确获取亚表面缺陷的空间分布和最大深度是其中的关键。考虑到现有亚表面缺陷表征方法的局限性，研究人员先基于理论与实验相结合的方式获得了微秒脉冲CO₂激光均匀烧蚀方法，进而提出了微秒脉冲CO₂激光层析烧蚀技术来表征亚表面缺陷。该技术通过逐层烧蚀去除材料，使亚表面缺陷直接暴露在可观测表面，进而获得亚表面缺陷分布随深度演变情况。该技术可以实现从nm到um的纵向烧蚀分辨率，最小纵向烧蚀分辨率<5nm。通过对亚表面缺陷随深度演变的过程图像进行对比分析，验证了激光烧蚀过程不会导致裂纹扩展也不会引入新的微裂纹，可实现亚表面缺陷信息的准确获取。同时，由于烧蚀口径和深度不受限制，该技术可实现亚表面缺陷的三维全口径表征。为验证该方法的实用性，研究人员还对不同研磨加工工艺下的亚表面缺陷进行了表征分析。

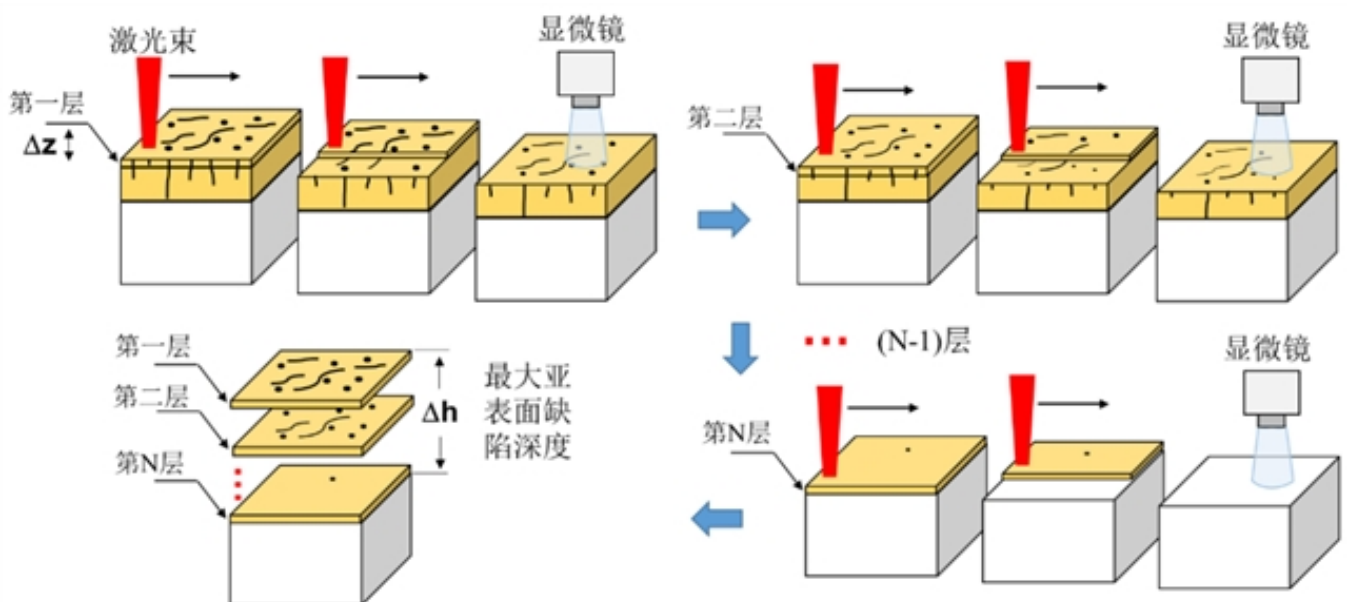


图1：利用微秒脉冲CO₂激光层析烧蚀技术表征亚表面缺陷流程示意图

虽然微秒脉冲CO₂激光层析烧蚀技术也是一种破坏性的表征技术，但其集缺陷表征和材料去除于一体，可作为一种不引入亚表面缺陷的研磨工艺耦合到材料去除过程中。为此，研究人员进一步提出了包含激光烧蚀研磨、激光保形清洗，激光抛光的CO₂激光加工链路。在该工艺链路中，利用激光烧蚀研磨完全去除前级工艺引入的亚表面缺陷，之后利用激光nm级烧蚀（激光保形清洗方法）对激光研磨后残留的再沉积烧蚀产物进行清洗去除，最后利用激光抛光熔融平滑激光研磨产生的烧蚀轨迹。通过全链路对缺陷的抑制，所制备元件的零几率LIDT和百分百几率LIDT相对传统工艺制备的元件的分别提升了41%和65.7%。

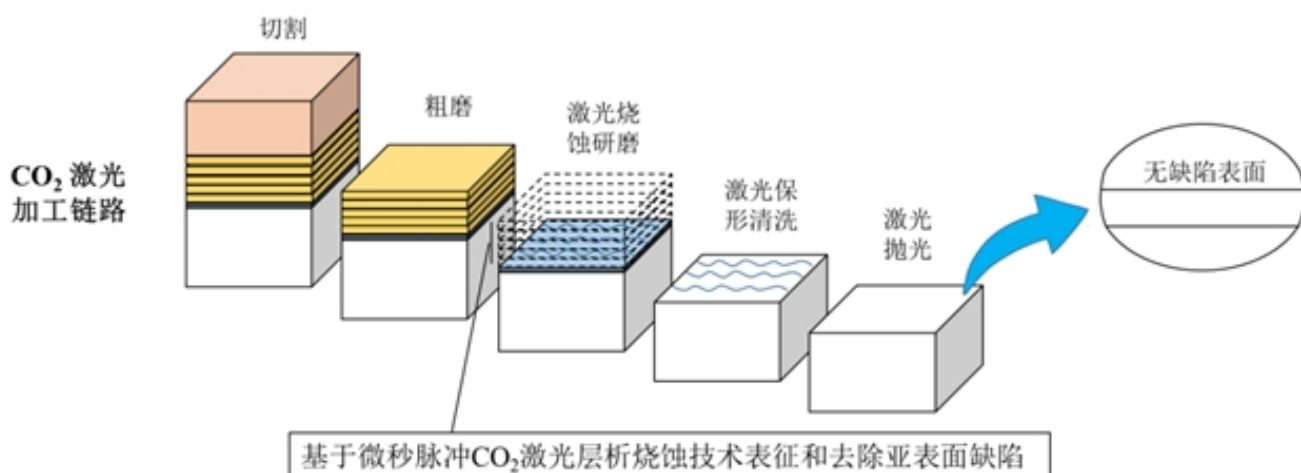


图2：CO₂激光加工链路示意图

微秒脉冲CO₂激光层析烧蚀表征亚表面缺陷技术的三维全口径表征特性可实现对元件全局缺陷信息的获取，这为传统工艺链中亚表面缺陷去除策略的制定提供了有效指导工具。同时该技术集缺陷表征和材料去除于一体的特性更突出了将激光烧蚀研磨工艺运用于大口径元件研磨加工过程中的潜力，机器视觉系统的引入更将实现亚表面缺陷的在线表征和去除。同时，CO₂激光加工链路的提出也为制备高抗紫外激光诱导损伤熔石英元件提供了新的思路。提出的技术和方法也可以扩展到其他有缺陷控制要求的材料加工中。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2023.021>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：魏朝阳等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发