

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 液体辅助激光加工硬脆材料及其应用

栾美玲, 郑家鑫, 孙相超, 刘学青

#### 引用本文:

栾美玲, 郑家鑫, 孙相超, 等. 液体辅助激光加工硬脆材料及其应用[J]. *光电工程*, 2023, 50(3): 220328.

Luan M L, Zheng J X, Sun X C, et al. Liquid-assisted laser fabrication of hard materials and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220328.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220328>

收稿日期: 2022-12-05; 修改日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-02-10

### 相关论文

#### 仿生超滑表面的飞秒激光微纳制造及应用

杨青, 成扬, 方政, 张嘉亮, 侯洵, 陈烽

*光电工程* 2022, 49(1): 210326 doi: 10.12086/oe.2022.210326

#### Large-area straight, regular periodic surface structures produced on fused silica by the interference of two femtosecond laser beams through cylindrical lens

Long Chen, Kaiqiang Cao, Yanli Li, Jukun Liu, Shian Zhang, Donghai Feng, Zhenrong Sun, Tianqing Jia

*Opto-Electronic Advances* 2021, 4(12): 200036 doi: 10.29026/oea.2021.200036

#### Circular cladding waveguides in Pr:YAG fabricated by femtosecond laser inscription: Raman, luminescence properties and guiding performance

Quanxin Yang, Hongliang Liu, Shan He, Qingyu Tian, Bin Xu, Pengfei Wu

*Opto-Electronic Advances* 2021, 4(2): 200005 doi: 10.29026/oea.2021.200005

#### Etching-assisted femtosecond laser modification of hard materials

Xue-Qing Liu, Ben-Feng Bai, Qi-Dai Chen, Hong-Bo Sun

*Opto-Electronic Advances* 2019, 2(9): 190021 doi: 10.29026/oea.2019.190021

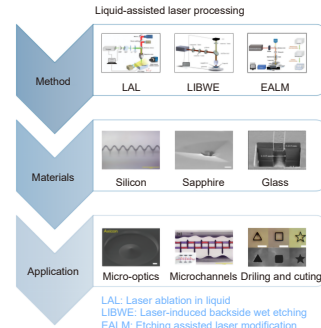
更多相关论文见光电期刊集群网站 



DOI: 10.12086/oe.2023.220328

## 液体辅助激光加工 硬脆材料及其应用

栾美玲, 郑家鑫, 孙相超, 刘学青\*

吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子学  
国家重点实验室, 吉林 长春 130012

**摘要:** 硬脆材料由于具有稳定的机械和化学性能、优良的光电特性等优势,在航空航天、光电工业等领域具有广泛的应用。激光加工由于具有高精度、高能量、非接触式加工等特点,是实现硬脆材料加工的理想技术。为了实现硬脆材料的去除加工,通常需要较高的激光能量,使得加工的结构精度较低,而且表面质量较差。本综述介绍了液体辅助激光加工技术在硬脆材料加工方面的研究进展,分别介绍了液相激光烧蚀、激光诱导背部湿法刻蚀和刻蚀辅助激光改性等三种液体辅助激光加工技术的原理,对比了各自的优势和不足,以及不同加工技术、辅助液体种类以及加工参数等对不同硬脆材料加工质量的影响,介绍了液体辅助激光加工技术目前主要的应用,最后,简要阐述了该技术存在的问题和未来的潜在发展。

**关键词:** 激光加工; 硬脆材料; 液体辅助制造; 微/纳米结构

**中图分类号:** TN249

**文献标志码:** A

栾美玲, 郑家鑫, 孙相超, 等. 液体辅助激光加工硬脆材料及其应用 [J]. 光电工程, 2023, 50(3): 220328

Luan M L, Zheng J X, Sun X C, et al. Liquid-assisted laser fabrication of hard materials and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220328

## Liquid-assisted laser fabrication of hard materials and applications

Luan Meiling, Zheng Jiaxin, Sun Xiangchao, Liu Xueqing\*

State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

**Abstract:** Due to the stable mechanical and chemical properties, excellent photoelectric properties, and other advantages, hard and brittle materials have been widely used in aerospace, the photoelectric industry, and other fields. Laser fabrication is an ideal technology for hard and brittle materials processing due to its high precision, high energy, and non-contact properties. In order to achieve the removal of hard and brittle materials, high laser energy is usually required, resulting in low structural accuracy and poor surface quality. This review introduces the advances of liquid-assisted laser fabrication technology in the processing of hard and brittle materials, introduces the principles of three liquid-assisted laser fabrication technologies, and compares their advantages and disadvantages. The effects of different processing technologies, types of auxiliary liquids, and processing

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62105117); 吉林省教育厅科学技术研究项目 (JKH20221005KJ)

\*通信作者: 刘学青, liuxueqing@jlu.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

parameters on the quality of different materials were summarized in detail. The main applications of liquid-assisted laser fabrication technology were summarized, and the existing problems and potential development of this technology were discussed.

**Keywords:** laser fabrication; hard and brittle materials; liquid assisted fabrication; micro/nano structures

## 1 引言

激光加工由于具有高精度、高能量、非接触式加工等特点, 广泛应用于国防和工业领域, 包括光纤通信、信息处理、生物医学等<sup>[1-3]</sup>。利用激光实现材料去除的基本原理为: 将较高能量的激光聚焦到材料表面或内部, 被辐照的局部材料在极短的时间内吸收激光能量, 经过一系列复杂的能量弛豫过程实现材料的去除。由于高能量的激光脉冲对材料的强烈非线性作用使得加工的结构精度较低, 而且表面质量较差, 难以满足微纳器件对结构高精度和高表面质量的迫切需求。

为了解决以上问题, 国内外研究人员提出了液体辅助激光加工技术, 依据原理的不同, 可将其主要分为三种技术, 分别为液相激光烧蚀 (laser ablation in liquid, LAL), 激光诱导背部湿法刻蚀 (laser-induced backside wet etching, LIBWE) 和刻蚀辅助激光改性 (etching assisted laser modification, EALM) 加工技术。

其中, 液相激光烧蚀技术和激光诱导背部湿法刻蚀技术是在固-液界面对材料进行加工, 能够有效降低材料表面的热影响区, 有效减少激光直接烧蚀对材料表面造成的诸如重铸层<sup>[4]</sup>和微裂纹<sup>[5]</sup>等损伤。因此, 这种技术具有更高的精度、更低的表面粗糙度和更小的热影响区等优点, 可用于加工金属、陶瓷和透明介质等各种材料<sup>[6-8]</sup>。而刻蚀辅助激光改性技术是利用近阈值的激光脉冲对材料进行物性调控, 提升或降低改性区材料的刻蚀速率, 从而实现对材料的选择性去除, 因此, EALM 技术在材料表面或内部三维微纳结构制备方面具有显著的优势。

本文首先概述了三种液体辅助激光加工的基本原理, 各自的优缺点, 详细对比了利用液体辅助激光加工技术制备一些典型硬质材料的工艺参数, 介绍了利用液体辅助激光加工在制备微光学元件、微流控器件和钻孔切割等方面的应用, 最后对液体辅助激光加工技术的进一步发展做了展望。图 1 展示了本综述的结构简图。

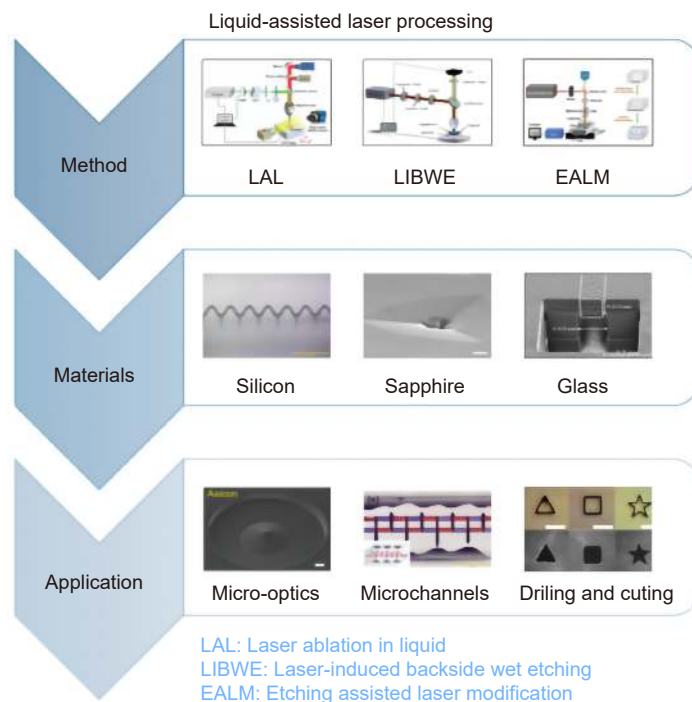


图 1 液体辅助激光加工技术框架简图

Fig. 1 Outline of the review about liquid-assisted laser fabrication

## 2 液体辅助激光加工的基本原理

传统激光加工是在固体-空气界面对材料进行烧蚀去除, 强烈的非线性作用和较大的热影响区使得对硬质材料进行高精度、高质量加工极其困难。而液体辅助激光加工方法基于两种方案能够解决硬质材料加工的问题, 一种方案是在激光加工的过程中, 借助液体环境, 在固-液交界面进行加工。根据激光穿过的是材料本身或是液体的不同又分为液相激光烧蚀<sup>[9]</sup>和激光诱导背部湿法刻蚀<sup>[10]</sup>。另一种方案是刻蚀辅助激光改性加工, 利用近阈值的激光脉冲对固体材料进行

改性, 等效为在固体-固体界面对材料进行加工, 由于固体-固体材料间的紧束缚作用, 有利于加工精度的提升, 避免了碎屑的产生。随后对激光改性的结构进行选择性刻蚀, 从而实现微纳结构的制备。下面详细介绍这三种加工技术。

### 2.1 液相激光烧蚀

液相激光烧蚀技术是将样品材料放入水中或其他液体中, 入射激光束穿过液体聚焦照射淹没的物体进行加工的方法。液相激光烧蚀大体可以分为三个主要步骤<sup>[11-12]</sup>, 如示意图 2(a) 所示: 首先, 当激光聚焦在

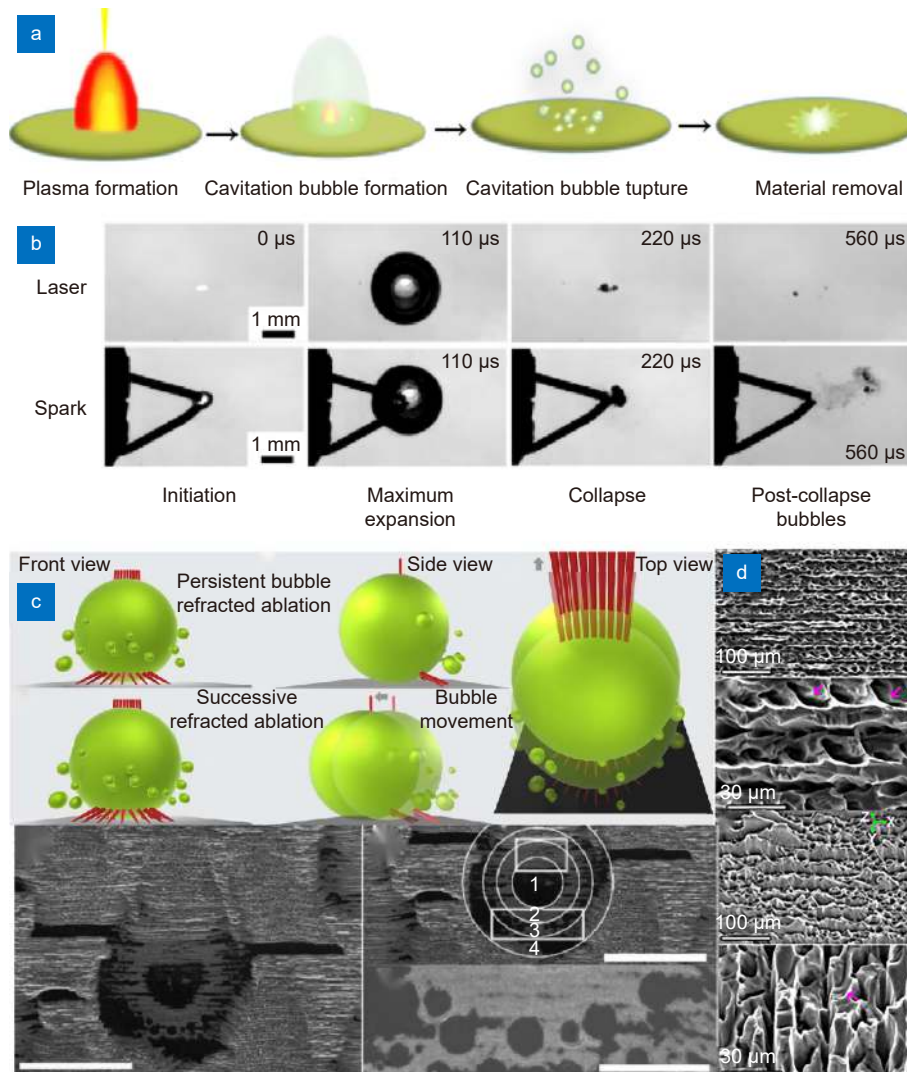


图 2 (a) 液相激光加工原理图; (b) 基于液相激光烧蚀产生的空化气泡的产生、膨胀、坍塌以及持久性气泡产生<sup>[11]</sup>; (c) 基于水下持续气泡辅助飞秒激光烧蚀技术制备尾部同心圆宏观结构<sup>[18]</sup>; (d) 基于飞秒激光冲击喷丸液体烧蚀技术制备孔状裂纹结构的不同角度形貌展示<sup>[19]</sup>

Fig. 2 (a) Schematic diagram of liquid phase laser processing; (b) Generation, expansion, and persistent bubble generation based on cavitation bubbles generated by liquid phase laser ablation<sup>[11]</sup>; (c) Preparation of tail concentric circle macrostructure based on underwater sustained bubble-assisted femtosecond laser ablation technology<sup>[18]</sup>; (d) Preparation of porous crack structure based on femtosecond laser impact shot peening liquid ablation technology with different angles and morphology display<sup>[19]</sup>

固-液界面时, 极高强度的激光脉冲导致固-液界面处迅速升温, 达到足够高的温度时, 诱导材料发生电离形成等离子体。然后, 随着等离子体的膨胀, 一方面形成冲击波对融化的固体材料造成冲击和损伤, 另一方面通过热扩散, 传递到液体, 之后液体受热汽化, 形成空化气泡。这些前期产生的空化气泡会因液体密度而影响形成速度, 并且液体本身表面张力和粘度也会影响气泡对周围液体的压力<sup>[13]</sup>。当气泡在等离子体区域形成时, 激光诱导材料产生的纳米颗粒在气泡膨胀过程中被带入空化气泡内, 随着气泡膨胀并破裂, 进入到液体中。最后, 空化气泡的破裂导致等离子体区域温度和压力改变, 产生的机械力和应力造成材料的进一步损伤和去除, 实现结构的加工。气泡间由于相互碰撞相互作用而形成持久性气泡<sup>[14]</sup>。这种持久性气泡是影响后续激光功率利用率的关键因素。图 2(b) 为上述加工过程的显微镜照片。

基于上述原理, 利用激光加工可以实现多种材料微结构和纳米材料的制备<sup>[15-17]</sup>。例如, Tian 等<sup>[11]</sup>利用这种方法在硅晶片表面实现了具有高表面质量的微凹槽结构。与在空气中切割凹槽相比, 表面没有重新沉积的粒子存在。在微凹槽的侧面观察到环形波纹结构, 这是由于持久性气泡坍塌引起的冲击波爆炸和液体对激光的散焦造成的。为解决这一问题, Hoppius 等<sup>[18]</sup>从控制液体层厚度的角度研究了不同脉冲时间对样品表面的烧蚀作用, 当液体层厚度控制在大于持久性气泡直径, 且小于自聚焦距离时, 能有效减少气泡坍塌引起的液体表面震荡对激光脉冲的影响。在这一问题的研究中, Guo 等<sup>[19]</sup>基于微射流理论, 综合液相激光烧蚀过程中固液界面反应的特殊性, 构建了微射流理论模型, 并命名为激光诱导微射流辅助消融 (laser-induced microjet-assisted ablation, LIMJAA)。基于这种理论他们建立了飞秒激光加工系统, 证实了在薄液层加工条件下, 激光烧蚀的瞬间将会产生高速单向的微射流, 可以帮助去除气泡带来的影响, 实现高质量微凹槽的加工。Ren 等<sup>[20]</sup>也在总结前人的基础上, 研究了飞秒激光水下钻孔问题, 结果表明, 与在空气中钻孔相比, 在水辅助下钻孔效率和表面质量更高。通过调控液体层厚度, 避免了水的流动和振荡对激光束的散射和吸收。除此之外, 激光加工参数对微孔的形貌具有重要的影响, 实验表明在低重频的情况下, 水辅助激光钻孔的表面质量更好。此外, Zhang 等<sup>[21]</sup>研究了液相激光烧蚀过程中产生的气泡运动,

提出了一种水下持续气泡辅助飞秒激光烧蚀技术 (underwater persistent bubble assisted femtosecond laser ablation in liquids, UPB-fs-LAL), 该技术能够在硅表面制造毫米级同心圆状微观结构, 如图 2(c) 示, 为后续学者研究通过激光烧蚀构建分层纳米结构提供了强有力的技术手段。在这种微纳米分层结构的研究中, Zhang 等<sup>[22]</sup>提出了一种飞秒激光冲击喷丸液体烧蚀技术 (femtosecond laser shock peening ablation in liquids, fs-LSPAL), 通过研究气泡诱导光折射/反射而形成的孔状裂纹交错结构, 如图 2(d) 所示, 这种分层的裂纹结构对生物医学领域微细胞生物的研究有着重要作用。

虽然, 液相激光烧蚀技术具有隔绝空气、减少热影响区、减少碎屑堆积等优势, 但是液体层吸收会带来激光能量的较大损失, 另外, 液体层厚度难以精确控制造成结构表面质量均匀性较差。

## 2.2 激光诱导背部湿法刻蚀

为了解决液体层对激光的吸收问题, 研究人员提出了激光诱导背部湿法刻蚀技术。该技术同样是在液体环境下对材料进行烧蚀去除, 但与液相激光烧蚀不同的是, 激光是穿过材料聚焦到固液界面上实现材料的去除。这不仅避免了液体层对激光能量的吸收, 而且利用界面处液体对光的吸收, 使得固液界面迅速升温, 降低了激光烧蚀的阈值。同时, 由于加工过程中会产生气泡, 气泡的运动带来的液体扰动能够及时带走加工产生的碎屑, 提高结构表面的质量。早在 2000 年, Wang 等<sup>[23]</sup>对这一加工过程的基本原理进行了研究, 提出了激光在固液界面发生反应的两种机制: 一种是过热液体的加热过程 (相爆炸, 爆炸沸腾), 另一种是高温和高压的攻击过程。典型的激光诱导背部湿法刻蚀加工装置如图 3(a)<sup>[24]</sup>所示, 该装置由激光器、光路、样品材料、成像装置四部分组成。Sun 等<sup>[25]</sup>分别在空气、蒸馏水和乙醇环境中制备了熔融石英微孔结构, 如图 3(b) 所示孔。通过对比可以看出, 在激光脉冲尚未达到空气中熔融石英烧蚀阈值时, 在液体环境下的材料表面已经被损伤, 出现小孔结构。同时随着脉冲能量的增加, 水和乙醇环境中形成的孔内部的表面相对平滑并且直径较大, 进一步说明了激光诱导背部湿法刻蚀能够降低材料的烧蚀阈值。

通过对激光诱导背部湿法刻蚀技术的不断深入研究, 很多研究人员对加工的原理提出了不同的观点。Kopitkovas 等<sup>[26]</sup>认为激光诱导背部湿法刻蚀加工是通

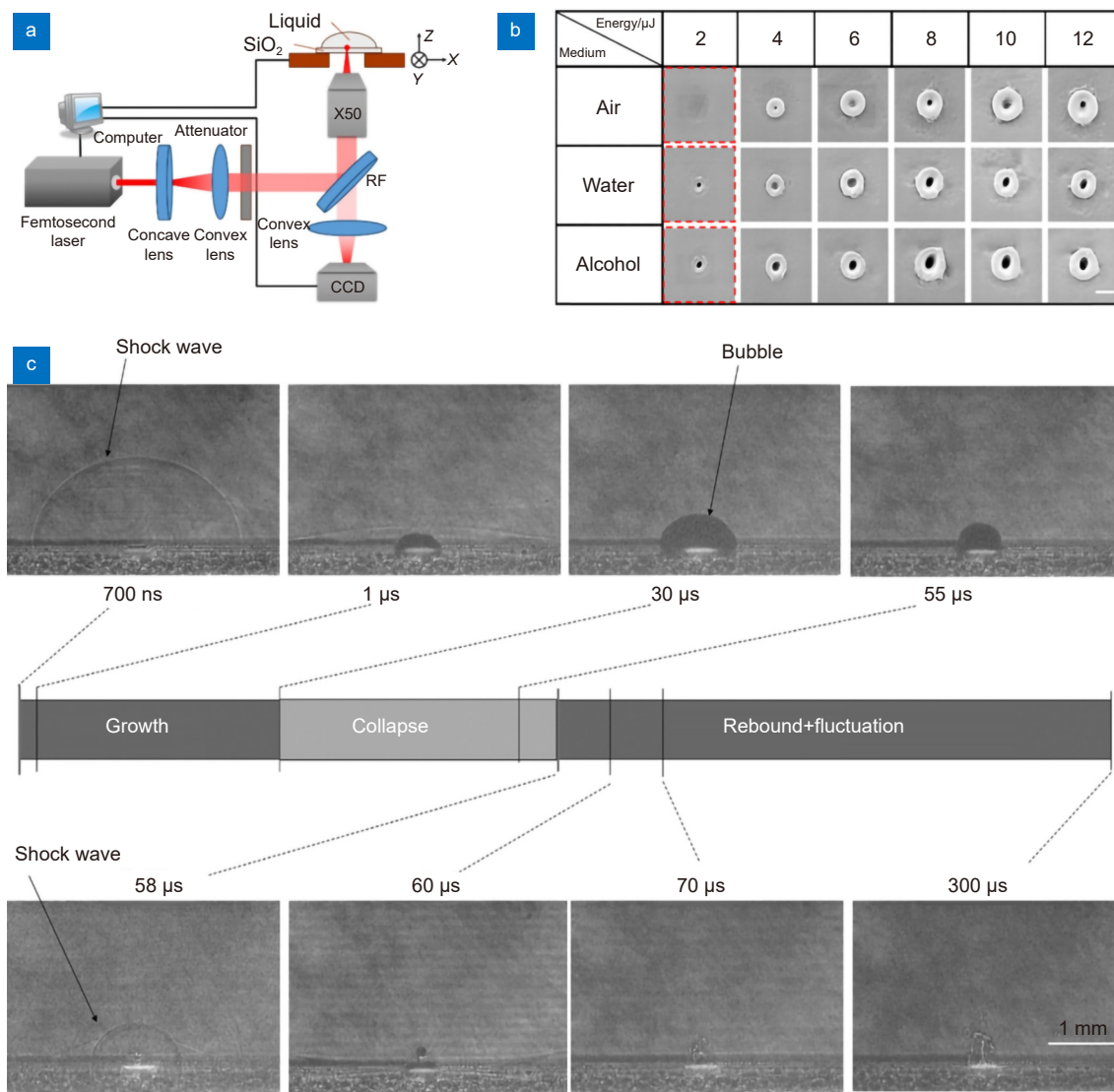


图 3 (a) 基于飞秒激光的激光诱导背部湿法刻蚀光路系统示意图<sup>[24]</sup>; (b) 利用激光诱导背部湿法刻蚀技术在不同环境下制备的孔的形貌对比<sup>[25]</sup>; (c) 激光诱导背部湿法刻蚀产生空化气泡的流体动力学的阴影图<sup>[26]</sup>  
 Fig. 3 (a) Schematic diagram of laser induced back wet etching optical path system based on femtosecond laser<sup>[24]</sup>; (b) Comparison of the morphologies of the holes prepared by laser-induced wet back etching under different environments<sup>[25]</sup>; (c) Shadow diagram of the hydrodynamics of cavitation bubbles produced by laser-induced wet back etching<sup>[26]</sup>

过吸收剂汽化膨胀破裂的物理变化来实现材料的去除, 提出了“微射流”理论。即随着激光能量逐渐变大, 固液界面的温度也随之升高, 但激光能量还没有达到材料的损伤阈值, 此时固液界面的温度已超过辅助液体的汽化临界温度, 液体开始汽化产生大量气泡, 气泡迅速汇聚膨胀并破裂, 形成指向材料的微射流, 如图 3(c) 所示, 微射流冲击材料造成损伤和去除, 同时气泡破裂带来的液体扰动能够带走激光加工局部区域产生的碎屑。

Zhigalina 等<sup>[27]</sup> 提出了“等离子羽流”机制。在聚焦激光辐照的影响下, 固液界面处温度迅速升高,

辅助液体产生雪崩电离效应<sup>[28]</sup>, 同时,  $\text{AgNO}_3$  中的银离子被还原成银原子, 原子的不断积累形成大量的银纳米颗粒, 银纳米粒子的等离子体增强效应极大提升了对光子能量的吸收, 从而加速了材料的去除。Olenin 等<sup>[29]</sup> 提供了银还原反应原理, 使用激光连续照射硝酸银溶液或含银离子样品, 激光辐射产生光化学反应, 引发溶液中活性中间体的形成, 从而诱导银原子产生。

Ding 等<sup>[30]</sup> 在利用激光诱导背部湿法刻蚀蓝宝石时, 采用纯甲苯或饱和苧/丙酮混合溶液作为辅助液体, 提出了一种新的机制: “吸收膜”理论。在对固

液界面进行一定脉冲能量的照射时, 辅助液体的分解产物在材料表面沉积一层黑色薄膜, 增加了激光脉冲在材料表面的吸收, 材料和吸收膜开始以不同的膨胀系数吸热膨胀, 导致表面产生机械应力, 当达到吸收膜损伤阈值时, 发生爆炸<sup>[31]</sup>, 大量的热量使材料迅速达到熔点, 发生去除。这一理论在 2022 年被 Yan 等<sup>[32]</sup>解释为碳热还原反应。在实验最初照射阶段, 激光能量被油墨吸收, 形成沉积的碳层。当碳层沉积到一定厚度时, 开始第二个激光照射阶段, 蓝宝石温度逐渐升高, 触发碳热还原反应, 蓝宝石被刻蚀。较厚的碳层吸收更多的脉冲能量, 并将蓝宝石加热到更高的温度。

激光诱导背部湿法刻蚀技术能够降低激光加工阈值, 减少能量损伤、减少碎屑沉积, 但大部分研究工作集中在纳秒激光加工上, 加工机制也主要是针对纳秒激光加工的。然而纳秒激光由于长脉冲宽度和低激光脉冲峰值功率对材料造成的热影响区较大, 并不能够从本质上提高加工的精度。因此, 开发基于飞秒激光的背部湿法刻蚀技术具有重要的意义。例如 Luong 等<sup>[33]</sup>利用波长为 1552.5 nm 的飞秒激光器在硅表面进行背部湿法刻蚀加工, 实现了最大刻蚀深度为 6  $\mu\text{m}$  凹槽结构的制备, 但相关的研究仍然较少。

### 2.3 刻蚀辅助激光改性加工

激光诱导背部湿法刻蚀技术能够实现多种材料的高质量加工, 但由于加工工艺的局限性, 在三维微纳结构制备方面遇到了很大的问题, 而且表面平滑度仍然难以满足光学器件的要求。刻蚀辅助激光改性加工技术可有效解决这些问题。刻蚀辅助激光改性加工技术是一种激光诱导材料改性与化学腐蚀选择性去除相结合的加工技术。其基本原理为: 在合适的激光参数条件下, 当激光辐照材料时, 受到辐照的区域晶格结构发生改变, 产生刻蚀速率差, 再将样品放入腐蚀液中刻蚀, 完成结构的制备。基于腐蚀液体能否和样品材料本体发生反应, 又能将刻蚀辅助激光改性加工分为两种。

一种是材料本身和改性区域都会与腐蚀液体进行反应。但因为反应速率不同, 能够进行选择刻蚀, 同时腐蚀液体能够去除加工过程中的碎屑, 起到平滑表面的作用, 实现高效高精度结构的制备。利用这种刻蚀辅助激光改性加工技术, 可以实现微透镜阵列、光波导等微光学元件以及微流控芯片等微纳器件的制备<sup>[34-36]</sup>。早在 2000 年, Kim<sup>[36]</sup>等利用这一技术, 制备

了粗糙度低于 10 nm 的砷化镓微透镜。初步证明了刻蚀辅助激光改性加工技术在制备微光学元件应用上有着重要的应用价值。在此基础上, 2003 年 Atuchin 等<sup>[37]</sup>结合深紫外光刻技术, 在二氧化硅表面制备了高衍射效率的微透镜阵列, 进一步验证了刻蚀辅助激光改性加工在微光学器件制备方面的应用潜力。近年来随着飞秒激光加工的不断发展和, 这种技术被应用来实现更精细的加工。Cao 等<sup>[38]</sup>利用磷酸和硫酸的混合溶液作为腐蚀液体, 结合飞秒激光全息处理系统在蓝宝石上制备了尺寸和间距可调的微透镜阵列, 他们首先利用飞秒激光加工系统通过并行加工的方式在蓝宝石表面加工点阵列, 然后将样品放入腐蚀液体中进行腐蚀, 最后制备出表面光滑并具有良好成像性能的微透镜阵列, 实现了高平滑微光学器件的高效制备。此外, Deng 等<sup>[34]</sup>受到空腔生物猪笼草的启发, 利用这一技术, 在玻璃内部制备了如图 4(a) 所示的微空腔阵列, 这种结构具有光滑均匀的表面, 能够实现自清洁等功能。2022 年 Chen 等<sup>[35]</sup>利用飞秒激光刻蚀辅助激光改性加工结合硫化物玻璃压印转写, 制备了具有低像差和大视场的红外人工复眼。对提高微光学元件的制备效率提供了思路。

另一种刻蚀辅助激光改性加工技术是腐蚀液只与材料改性区域反应, 如图 4(b) 所示, 在这种情况下, 只需要控制激光对特定的区域进行改性, 再进行腐蚀就可以实现结构的制备。因为激光能量并没有对样品材料表面造成破坏, 不会产生碎屑影响后续加工, 因此在制备高纵宽比结构上具有极大的优势。Gao 等<sup>[39]</sup>利用这一原理, 选择氢氟酸作为腐蚀液体, 在硅表面制备了纵宽比约为 11 的微孔阵列结构。VanthanhKhuat 等<sup>[40]</sup>使用氢氟酸和硝酸的混合溶液制备了厚度为 350  $\mu\text{m}$  的圆形通孔和长宽比为 40 的微凹槽。此外, Meng 等<sup>[41]</sup>在这种方法的基础上, 结合微固化工艺, 制备了具有高纵宽比的圆截面三维螺旋管, 他们采用飞秒激光对硅样品沿着设定的区域进行改性, 之后用氢氟酸去除改性区域材料, 形成微通道, 再将熔融的液态金属注入微通道, 制备出螺旋线圈。以上工作验证了刻蚀辅助激光改性加工在三维微纳结构制备方面具有广泛应用前景。

此外还有一些刻蚀辅助激光加工和其他激光加工技术混合的方法也有重要意义。例如 Wang 等<sup>[42]</sup>人提出的优化混合处理技术, 先利用刻蚀辅助激光加工对材料进行改性腐蚀, 再利用双光子聚合制备不同高度

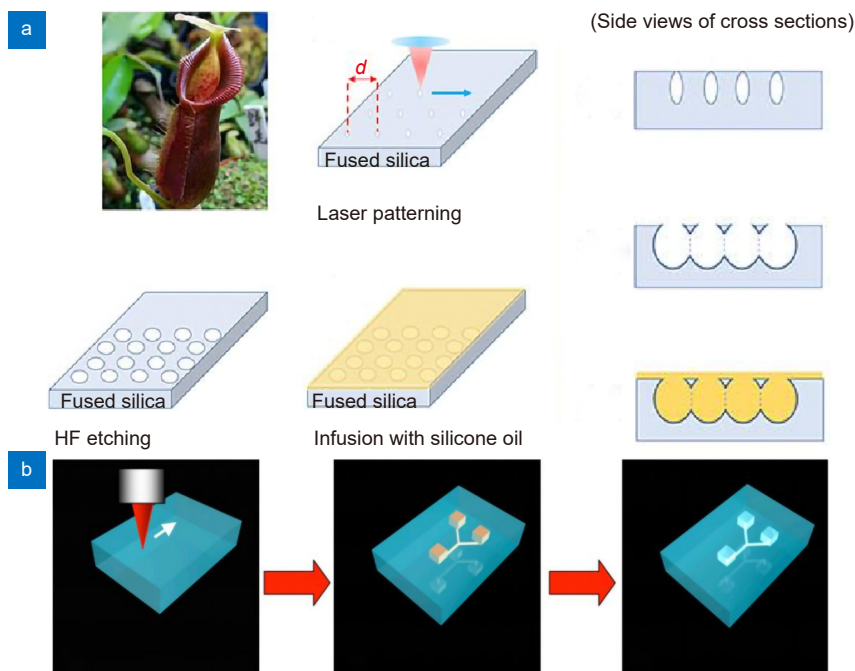


图 4 (a) 利用辅助液体与材料本体和改性区域反应速率不同进行选择性刻蚀的流程图<sup>[34]</sup>;  
(b) 利用辅助液体只与改性区域反应而进行选择性刻蚀的流程图<sup>[35]</sup>

Fig. 4 (a) Flow chart of selective etching using the reaction rates of the auxiliary liquid and the material body and modified area<sup>[34]</sup>;  
(b) Flow chart for selective etching using an auxiliary liquid reacting only with the modified region<sup>[35]</sup>

的高精度三维微结构。此外, Cho 等<sup>[43]</sup>人开发的干法刻蚀和刻蚀辅助激光加工结合的工艺, 改进了太阳能电池表面纹理结构, 使得太阳能电池转换效率显著提高。这些混合激光加工的方法为后续学者的研究提供了新的可能。

刻蚀辅助激光改性加工与前两种方法之间最明显的区别在于, 刻蚀辅助激光改性加工技术中辅助液体在激光改性之后作用于材料上, 而液相激光烧蚀和激光诱导背部湿法刻蚀中辅助液体和激光同时作用, 材料去除机理不同。表 1 针对三种液体辅助激光加工技术的特点进行了比较。

### 3 材料多样性和辅助液体多样性

液体辅助激光加工技术基于不同的加工原理, 可以用于各种透明硬脆材料和金属材料, 针对不同的材料, 选择的辅助液体也并不相同。随着加工结构的小型化和复杂化, 对于加工精度的要求也变得更高。因此引发了很多学者针对不同材料、不同辅助液体加工的研究和探索。表 2 总结了利用不同激光器和辅助液体在各种材料上制备不同结构的研究, 包括光敏玻璃、硅、二氧化硅、蓝宝石等, 以下详细论述几种常见的液体辅助激光加工材料, 还有很

表 1 三种技术优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of three technologies

	液体激光烧蚀	激光诱导背面湿法刻蚀	湿法腐蚀辅助激光改性
优点	1、阻隔加工过程中空气对材料的影响, 尤其是避免对金属的氧化; 2、液体起到冷却作用, 减少热影响区; 3、液体的流动有效减少碎屑堆积, 减少沉积层和重铸层的产生, 提高表面质量。	1、易于去除产生的碎屑, 加工过程不受碎屑影响; 2、流体同样起着冷却的作用, 可以提高加工质量; 3、加工质量和精度较高, 损伤较小。	1、容易进行三维加工; 2、加工能量低, 易提高加工精度; 3、分布进行, 加工过程不受液体的影响。
不足	1、激光穿过辅助液体, 增加了激光能量损耗, 包括液体中的光吸收和散射等; 2、加工过程中液体的扰动对聚焦光束产生影响, 导致光束质量下降, 结构表面质量较差。	1、吸收液一般是丙酮、甲苯、苊等有毒物质, 具有环境和安全问题; 2、难以制备复杂的三维结构。	1、对于各向同性腐蚀, 难以制备棱角分明的结构; 2、难以对化学稳定性良好或耐腐蚀材料进行刻蚀。



表 2 不同材料不同辅助液体加工  
Table 2 Different materials assist in liquid processing

材料	辅助液体	加工方法	激光器类型 (波长/nm, 脉冲宽度)	制备结构	时间	引用
光敏玻璃	10%HF	退火+湿法腐蚀	fs激光器(775, 150 fs)	三维垂直微流控结构	2004	[44]
光敏玻璃	10%HF	湿法腐蚀	fs激光器(515, 260 fs)	微透镜	2022	[45]
光敏玻璃	10%HF	湿法腐蚀	fs激光器	芯片内三维结构	2011	[46]
光敏玻璃	化学电镀液	FS激光直接烧蚀+化学电镀	fs激光器(1045, 457 fs)	微器件	2013	[47]
光敏玻璃和SU-8	10%HF	湿法腐蚀+双光子聚合	fs激光器(1045, 360 fs)	三维微流控结构	2014	[48]
二氧化硅	10%HF	湿法腐蚀		罗氏线圈电流换能器	2016	[49]
二氧化硅	高锰酸钾	背部湿法刻蚀	fs激光器(515, 500 fs)	LIPSS	2018	[50]
二氧化硅	磷酸/硫酸铜	背部湿法刻蚀	掺镱光纤激光器(1064, 100 ns)	高纵深比通道	2020	[51]
二氧化硅	HF	湿法腐蚀	fs激光器(800, 50 fs)	三维螺旋管微线圈	2014	[41]
硅	5%HF	两步湿法腐蚀	fs激光器(800, 35 fs)	深纳米光栅	2022	[52]
硅	KOH(20wt%):异丙醇=4:1	湿法腐蚀	fs激光器(800, 35 fs)	纳米间隙结构	2021	[53]
硅	5%HF	湿法腐蚀+聚合物转写	fs激光器(800, 30 fs)	微透镜阵列模板	2012	[54]
硅	氢氧化钾(20%):异丙醇(IPA, 4%)=4:1	湿法腐蚀	fs激光器(800, 35 fs)	大面积微纳米结构	2017	[55]
硅	40%KOH	背部湿法刻蚀	fs激光器(1552.5, 900 fs)	深凹槽	2022	[33]
硅	40%KOH	背部湿法刻蚀	fs激光器(1552.5, 900 fs)	LIPSS	2020	[56]
硅	水	液体辅助激光加工	fs激光器(790, 30 fs)	LIPSS	2014	[12]
--	--	液体辅助激光加工	--	LIPSS		[57-60]
硅	水	UPB-fs-LAL	fs激光器(1030, 223 fs)	尾部同心圆结构	2020	[21]
硅	水	fs-LSPAL	fs激光器(1030, 223 fs)	裂纹结构	2020	[22]
硅	水, 乙醇	背部湿法刻蚀	fs激光器(800, 120 fs)	孔	2019	[25]
硅	饱和茛/丙酮	背部湿法刻蚀	KrF准分子激光器(248, 20 ns)	倾斜微沟槽	2010	[61]
硅	水/乙醇	液体辅助激光加工	Yb: KGW飞秒激光器(515, 217 fs)	切割硅晶片	2022	[11]
硅	20%HF	湿法腐蚀	fs激光器(800, 50 fs)	孔阵列	2015	[39]
熔融石英	10%HF	湿法腐蚀	fs激光器	谐振器	2022	[62]
熔融石英	10 mol/L的KOH	湿法腐蚀	fs激光器	微轴棱锥	2022	[63]
熔融石英	5%HF	湿法腐蚀	fs激光器(800, 120 fs)	大面积微透镜阵列	2018	[64]
熔融石英	5%HF	湿法腐蚀	fs激光器(1030, 230 fs)	凹槽	2019	[65]
熔融石英	KOH	湿法腐蚀	fs激光器	芯片内三维结构	2011	[46]
熔融石英	0.5 mol的茛/甲苯和甲苯	背部湿法刻蚀	ps激光器(355, 10 ps) ps激光器(266, 10 ps)	LIPSS	2010	[66]
熔融石英	0.5 mol茛/甲苯	ns背部刻蚀+fs烧蚀	fs激光器(248, 500 ps) Ti:蓝宝石激光器(775, 130 fs)	LIPSS	2006	[67]
熔融石英	丙酮/茛	背部湿法刻蚀	XeCl准分子激光器(308, 30 ns)	微透镜阵列	2004	[26]
蓝宝石	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =1:3	湿法腐蚀+掩膜		压力传感器	2021	[68]
蓝宝石	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =1:3	湿法腐蚀	fs激光器(1028, 190 fs)	微透镜阵列	2018	[38]
蓝宝石	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =1:3	湿法腐蚀	fs激光器(800, 120 fs)	SWS减反结构	2017	[69]
蓝宝石	5%HF	湿法腐蚀	fs激光器	无锥度通孔	2022	[61]
蓝宝石	40%KOH	湿法腐蚀	fs激光器(800, 120 fs)	大面积微透镜阵列	2018	[64]
蓝宝石	氯苯	背部湿法刻蚀	ps激光器(266, 150 ps)	光栅	2007	[70]

续表 2

材料	辅助液体	加工方法	激光器类型 (波长/nm, 脉冲宽度)	制备结构	时间	引用
蓝宝石	甲苯	背部湿法刻蚀	ps激光器(355, 10 ps)	凹槽	2010	[71]
蓝宝石	硫酸铜	背部湿法刻蚀	Nd:YAG激光器(1064, 120 ns)	凹槽	2017	[31]
4H-SiC	正丁醇溶液	背部湿法刻蚀-微射流	fs激光器(520, 300 fs)	孔和凹槽	2022	[19]
硒化锌ZnSe	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (26%): NH <sub>4</sub> OH(28%)=1:3	湿法腐蚀	fs激光器(800, 130 fs)	脊形波导	2022	[72]
硼硅酸盐玻璃	8.5 mol/L的KOH	湿法腐蚀		三维自由形状	2021	[73]
氟化物	甲苯	背部湿法刻蚀	ps激光器(355, 10 ps)	凹槽	2010	[71]
钠钙玻璃	硫酸铜	背部湿法刻蚀+液相沉积	掺镱光纤激光器(1064, 100 ps)	微铜图案	2020	[74]
锗晶片	水/乙醇	液体辅助激光加工	Nd: YAG激光器(1064, 10 ps)	切割锗晶片	2016	[75]
K9玻璃	8%HF	湿法腐蚀+转写硫族玻璃	fs激光器(800, 50 fs)	复眼	2022	[35]

多材料也适用于液体辅助激光加工技术并没有详细介绍, 仅在表中列出。

### 3.1 硅

硅是微电子领域重要的半导体材料, 其物理性质和化学性质均很稳定, 传统的半导体工艺通常用来制备平面结构<sup>[76]</sup>, 对于一些三维微纳结构难以加工<sup>[77-78]</sup>。为此, 研究人员探索了液体辅助激光加工技术在硅材料上实现复杂结构的制备。根据反应机理的不同, 常用的辅助液体分为酸性溶液和碱性溶液两种。早在2000年, Koker等<sup>[79]</sup>提出基于二氧化碳激光和准分子激光的液体辅助激光加工技术制备硅表面微纳结构, 将硅浸没在HF溶液中, 经过两种激光的辐照发生各向异性蚀刻和各向同性蚀刻, 从而形成多孔硅薄膜结构。首次证明了液体辅助激光加工技术是制备多孔硅LED和硅集成的可行应用。此后, 不断有学者研究酸与硅晶体的刻蚀作用, 制备出半球形点阵列、光栅等多种不同的微纳结构<sup>[80-81]</sup>。基于以上研究, Immanuel<sup>[82]</sup>在2021年从激光能量控制反应速率和孔结构的角度, 构建了“带隙能量吸收理论”。为使用氢氟酸进行电化学刻蚀进而制备纳米多孔硅提供了理论依据。证实了纳米多孔硅层的形成受激光功率的控制。

与上述硅晶体与酸的反应不同, 碱性条件下的硅腐蚀属于各向异性腐蚀, 所用的化学试剂相对于酸性溶剂成本较低, 常用于硅材料激光加工的辅助液体是氢氧化钾溶液。2017年, Li等<sup>[55]</sup>基于刻蚀辅助激光改性加工技术实现了硅表面微纳结构阵列的可控制备, 具体为利用飞秒激光诱导硅表面的非晶化, 再利用氢氧化钾溶液的选择性腐蚀在硅表面生成了圆柱形、平

顶形、尖峰形三种不同形貌的微纳米结构, 如图5(a)所示。为了提高加工的精度, Zhou等<sup>[53]</sup>提出了基于空间整形飞秒激光加工结合刻蚀技术, 实现了硅片上特征尺寸为9 nm的纳米间隙结构制备。

### 3.2 二氧化硅

二氧化硅作为一种透明硬脆材料, 化学性质稳定, 不溶于水, 具有耐高温、耐腐蚀等特点, 并且具有压电效应、谐振效应等独特的物理特性, 在微纳光学领域具有重要的应用<sup>[82]</sup>。基于刻蚀辅助激光改性技术能够实现二氧化硅三维微纳结构的可控制备, 在微纳光学领域具有广泛的应用<sup>[83]</sup>。2004年, Chen等<sup>[84]</sup>展示了一种在二氧化硅上制造大面积凹面微透镜阵列的新方法。基于氢氟酸溶液对二氧化硅的各向同性腐蚀, 实现了直径分别为67.05 μm和30.54 μm的矩形和六角形微透镜阵列的制备。通过成像测试, 证明了这种技术能够实现表面质量良好, 成像均匀的微透镜阵列的制备。为了进一步提高微透镜阵列的制备效率, 2012年, Bian等<sup>[54]</sup>在前人的研究基础上结合复制转写工艺实现了聚合物微透镜阵列的高效制备。首先, 采用刻蚀辅助激光改性加工技术进行高表面质量的凹形微透镜结构的制备, 之后将制备好的二氧化硅微透镜阵列作为模板, 实现PDMS微凸透镜阵列的快速制备, 为低成本快速制备聚合物微透镜阵列提供了技术支持。除了微透镜阵列之外, 二氧化硅由于其高均匀性以及出色的热稳定性, 是制备三维微通道结构的首选材料<sup>[41,85]</sup>。例如, Petra等<sup>[86]</sup>利用刻蚀辅助激光改性加工技术制备了微流控网络结构, 实现了三维离子聚焦功能。然而, 传统的湿法辅助激光加工的方法中, 辅助液体的刻蚀总是从通道的两端开始, 因此总会形

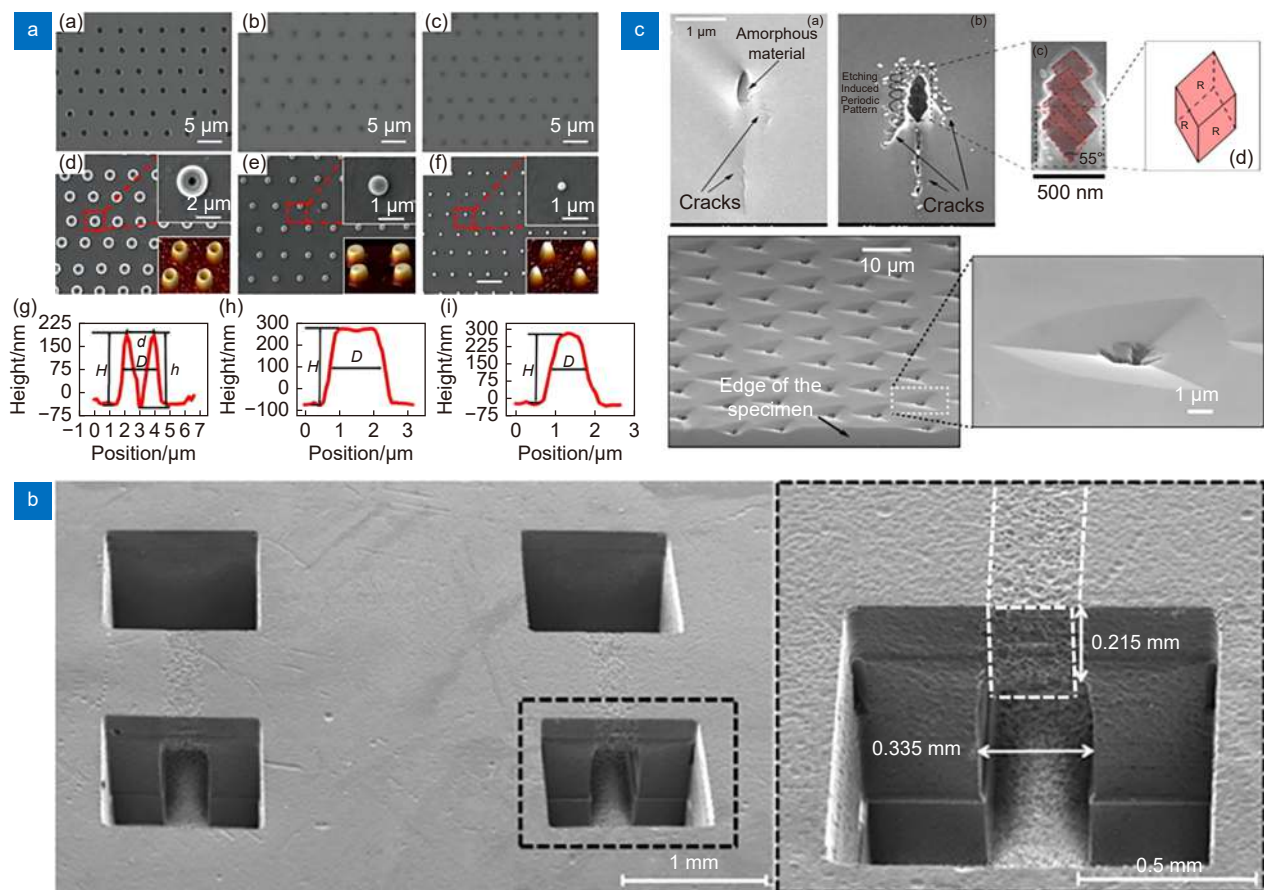


图 5 (a) 在硅表面生成了三种不同的微纳米结构<sup>[56]</sup>; (b) 在光敏玻璃内波制备出微通道结构<sup>[88]</sup>; (c) 在蓝宝石表面通过各向异性刻蚀制备的三角形凹坑结构<sup>[89]</sup>

Fig. 5 (a) Three different micro-nano structures are generated on the silicon surface<sup>[56]</sup>; (b) Microchannel structures are prepared by internal waves in photosensitive glass<sup>[88]</sup>; (c) Triangular pits prepared by anisotropic etching on the sapphire surface<sup>[89]</sup>

成两端开口的直径与中心直径不同的现象, 制备的微通道结构不均匀。为了解决这一问题, He 等<sup>[87]</sup>提出了将刻蚀辅助激光改性加工技术与玻璃拉丝技术相结合, 实现了熔融石英中具有光滑内表面的厘米级均匀微流体通道的制备, 微流体通道的纵横比大于 1000。

### 3.3 光敏玻璃

光敏玻璃一般是由掺杂了一些金属的锂铝硅酸盐玻璃组成, 在化学稳定性和耐热性方面具有独特的优势, 同时光敏玻璃的高透明度有利于集成微光学元件进行生物传感应用, 是制备微光学器件以及三维微流控器件的重要材料。与二氧化硅相比, 光敏玻璃具有较低的软化点, 通过一步退火, 可以实现液体辅助激光加工制备的中空微结构的显著平滑, 如图 5(b) 所示。2004 年, Sugioka 等<sup>[44]</sup>利用近红外飞秒激光实现了在光敏玻璃中微通道的制备。该工作开辟了飞秒激光微加工技术在微流控芯片研制方面的应用。2011 年,

Sugioka 等<sup>[46]</sup>在此基础上, 利用液体辅助激光加工技术, 在光敏玻璃内部成功制备了复杂的三维微流体芯片, 集成了纳米水族箱器件, 用于对微生物和细菌进行动态观察, 实现了在生物分析领域的应用。2014 年, Wu 等<sup>[88]</sup>进一步提出了一种刻蚀辅助激光改性加工和双光子聚合结合的飞秒激光微加工技术, 将聚合物微结构集成到玻璃微流控器件中, 实现玻璃/聚合物复合的 3D 生物芯片的制备, 扩展了微流控芯片的功能。

### 3.4 蓝宝石

蓝宝石具有高硬度、耐腐蚀、耐高温等特点, 可以在极端恶劣的条件下工作<sup>[38]</sup>。而且蓝宝石在紫外到中红外的光谱范围内透光性良好<sup>[25,27]</sup>, 是一种重要的光学材料, 在航空航天、军事军工等极端工作环境领域有着广泛的应用。但由于蓝宝石脆性高、韧性差, 导致对其加工比较困难, 而液体辅助激光加工有望解

决这一问题。

对于蓝宝石材料, 通常情况下腐蚀速率具有晶向依赖性。当采用磷酸和硫酸的混合溶液进行腐蚀蓝宝石时, 会出现明显的各向异性, 2022年 Capuano 等<sup>[89]</sup>利用刻蚀辅助激光改性加工技术, 在蓝宝石表面制备了由菱形堆积的腐蚀图案和三角形凹坑结构, 如图 5(c) 所示。基于这种各向异性的腐蚀, Pissadakis 等<sup>[70]</sup>首次提出了利用激光诱导背部刻蚀辅助激光改性加工技术在蓝宝石表面实现周期性光栅结构的制备。然而受限于热效应和脉冲能量密度, 这种光栅结构的高度和衍射效率十分有限。通过选择合适的腐蚀液, 也可以实现蓝宝石的各向同性腐蚀。例如, 2018年, Zhang 等<sup>[64]</sup>利用飞秒激光单脉冲扫描完成点阵的改性, 再利用氢氧化钾溶液腐蚀实现了凹形微透镜阵列的制备。通过调节点阵的周期和脉冲的能量密度可以实现对微透镜阵列形貌和尺寸特征的控制。

## 4 应用

在微纳米加工技术的快速发展过程中, 激光加工起到了不可或缺的作用, 但同时也对加工的精度以及结构的功能有了越来越高的要求。到目前为止, 液体辅助激光加工技术在微纳米尺度结构加工各领域应用还处于快速发展阶段, 尤其是在微光学元件、微流控器件和钻孔切割等方面。

### 4.1 微光学元件

随着信息化智能时代的不断发展, 人们对光学系统的微型化提出了更高的要求, 来应对国防科技领域、军事领域和工业领域等多个行业中不断增长的应用需求。因此如何利用更低的成本, 制备出更小尺寸、更高精度, 实现更复杂、多样化的应用, 成为关键问题。这些问题推动了微光学元件加工技术的发展。飞秒激光直写虽然对材料无选择性、对环境要求低, 但是通过单一飞秒激光直写制备的结构表面粗糙度往往较高, 无法满足光学元件对表面平滑度的要求。液体辅助激光加工技术能够显著改善结构表面的平滑度, 因此, 近些年研究人员利用此方法在多种材料表面以及内部制备出了功能多样的微光学元件, 使得微光学领域得到了迅猛的发展。

通过对微透镜面型和形貌的设计, 预先编写激光加工程序, 并将程序写入加工系统中, 就可以通过液体辅助激光加工技术实现任意形貌的微透镜结构制备, 利用这种方法可有效提高制备结构的表面质量。Hua

等<sup>[90]</sup>利用光学相位控制, 结合空化辅助烧蚀和后续的退火工艺, 实现了粗糙度低至 2 nm 的微透镜的制备, 制备的透镜符合设计的表面轮廓并且具有优异的成像特性, 如图 6(a) 所示。此外, Gao 等<sup>[91]</sup>通过刻蚀辅助激光改性加工技术, 利用混合酸在 80°环境下能去除金刚石表面在激光烧蚀过程中产生的石墨团簇这一原理, 在金刚石表面制备了不同拓扑荷数的微型涡旋光发生器, 如图 6(b) 所示, 证明了这种技术在超硬材料金刚石表面光学元件制备中应用前景。2022年, Liu 等<sup>[92]</sup>使用同样的方法在镀膜蓝宝石表面设计并制备了均匀排布的仿生蛾眼增透结构, 如图 6(c) 所示。在短波红外波段内实现了高达 98% 的透过率, 与未经过加工的蓝宝石相比, 透过率显著增加。同年, Wang 等<sup>[35]</sup>利用刻蚀辅助激光改性加工和两步压印相结合, 制备了具有和设计形貌完全吻合的高均匀性人工复眼结构, 不仅能够实现高分辨率和低像差的成像, 还能实现 60°的大视场成像。而转写出的硫化物人工复眼结构更是在红外波段显示出巨大的应用潜力, 如图 6(d) 所示。

### 4.2 微流控器件

微流控器件在细胞学、化学微反应器、药物筛选等领域具有重要的应用。基于液体辅助激光加工技术的三维加工优势, 能够实现复杂微流控器件的制备。早在 2004 年就有学者通过激光加工和后续的氢氟酸腐蚀, 在光敏玻璃中实现了三维微流控系统的制备, 并且利用中间微腔结构内的微阀门, 控制通道内部液体流动的方向<sup>[93]</sup>。Sungil 等<sup>[94]</sup>使用切片线和阴影线优化了结构, 成功制造了在不同  $z$  高度通道上有多个分支的三维微流控通道, 如图 7(a)、7(b) 所示。之后不断有学者基于这一技术实现了各种各样微流控器件的制备及应用。Shen<sup>[95]</sup>采用刻蚀辅助激光改性加工方法, 在熔融石英内部制备了微腔和微球的嵌套结构, 如图 7(c) 所示, 同年, Kim 等<sup>[85]</sup>利用同样的方法在玻璃上集成了具有多个通道的复杂微流控器件, 该器件有三个微流体通道, 这些通道通过一个微腔相连。微流体阀门结构和旋转叶轮位于腔室内, 每个器件的阀塞和叶轮都能成功地移动和旋转。该实验证明了在玻璃内部制造高精度度和高分辨率的微流控器件的可行性和有效性。此外, 为了能够实现超长和任意形状的微通道系统, Yang 等<sup>[96]</sup>提出了一种利用液体激光消融制备微流体通道的新方案: 通过激光加工浸没在水中的玻璃。基于这种方法, 他们实现了方波形微通道和

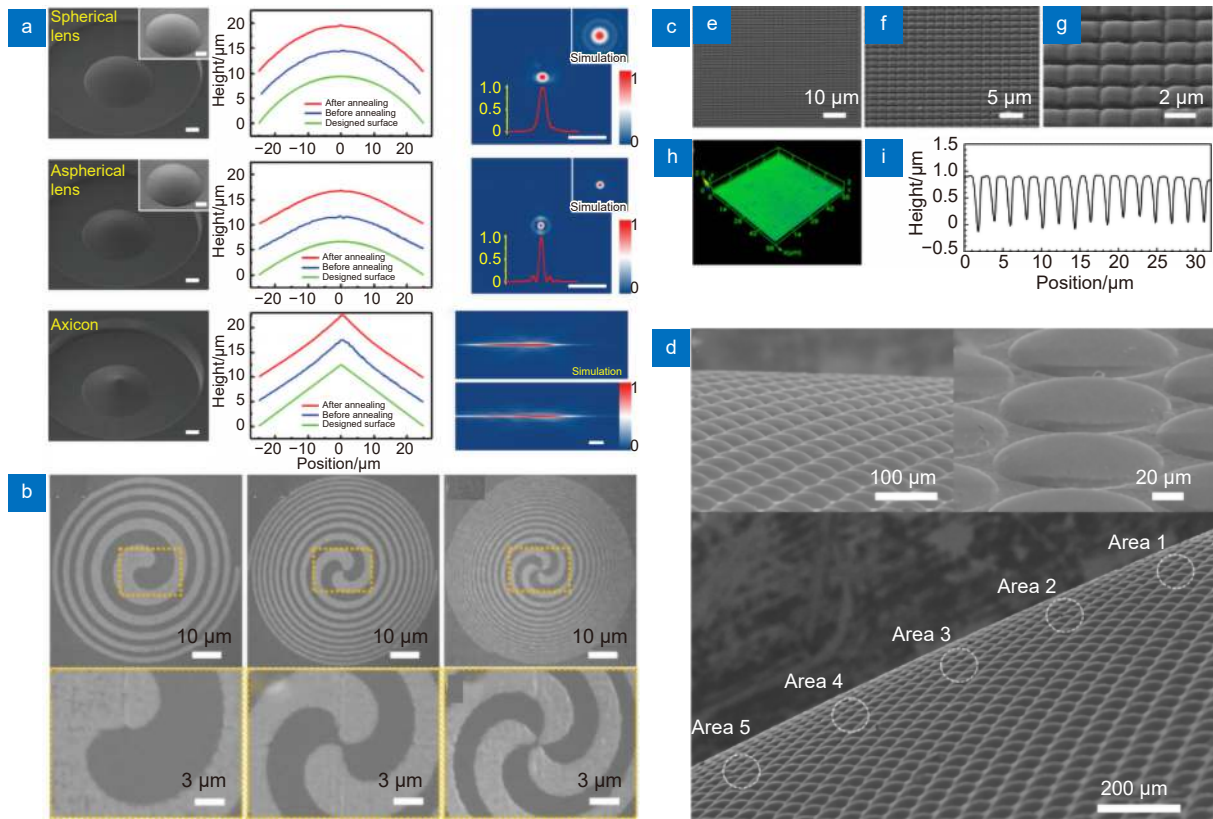


图 6 (a) 在蓝宝石表面制备单个任意形貌微透镜<sup>[90]</sup>; (b) 金刚石表面制备不同形貌的微光涡旋发生器<sup>[91]</sup>;

(c) 在镀膜蓝宝石表面制备均匀排布的仿生蛾眼增透结构<sup>[92]</sup>; (d) 在硫化物表面制备的高均匀性的人工复眼结构<sup>[35]</sup>

Fig. 6 (a) A single microlens with arbitrary morphology was prepared on the sapphire surface<sup>[90]</sup>; (b) Preparation of low-light level vortex generators with different morphologies on the diamond surface<sup>[91]</sup>; (c) The bionic moth-eye anti-reflection structure was prepared uniformly on the surface of the coated sapphire<sup>[92]</sup>; (d) Highly homogenous artificial compound eye structures prepared on the surface of sulfide<sup>[35]</sup>

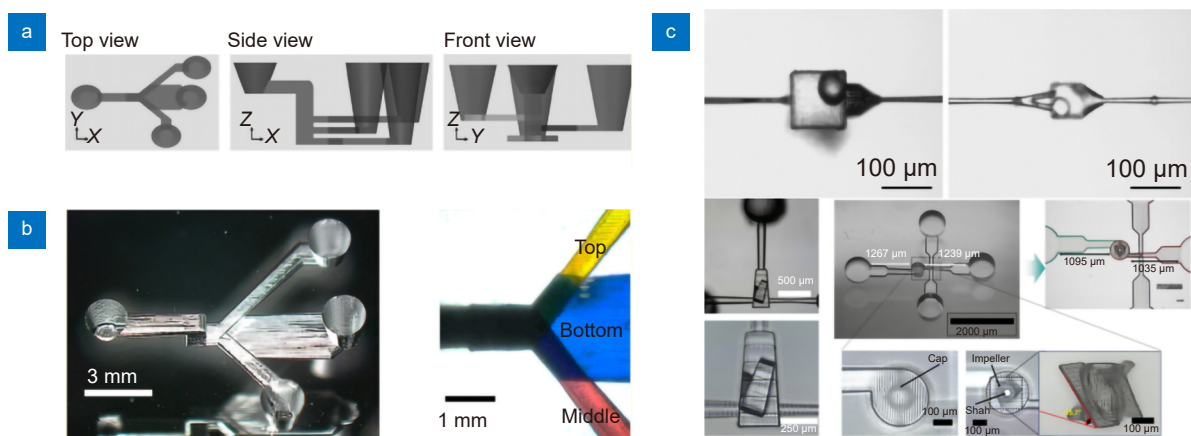


图 7 (a) 三层多分支的微流控系统<sup>[94]</sup>; (b) 叶轮可旋转的辅助微通道系统<sup>[94]</sup>;

(c) 能够控制液体流动方向的微腔和微球嵌套系统结构<sup>[95]</sup>

Fig. 7 (a) Three-layer multi-branch microfluidic system<sup>[94]</sup>; (b) Auxiliary microchannel system with rotating impeller<sup>[94]</sup>;

(c) A nested system structure of microcavities and microspheres that can control the direction of liquid flow<sup>[95]</sup>

大容量微流体腔的制备, 并且实现了更高的混合效率。

由此可见, 液体辅助激光加工与微流控系统的制备相结合, 可以实现具有优异表面形貌的微流体通道, 并且在保证加工精度的同时提高了微流体系统制备的效率。此外, 通过预先设计结构形貌, 能够对结构进行调整, 提高加工的灵活性。

### 4.3 钻孔切割

激光钻孔与切割在半导体器件、三维封装、航空航天惯性器件等领域具有重要应用<sup>[97]</sup>。传统的激光烧蚀钻孔和切割会产生大量的热和机械应力, 这些因素造成的重铸层和沉积层会对孔的形貌和切割边缘的表面质量造成极大的影响, 并且会产生微裂纹等表面损伤。而液体辅助激光加工则可以避免上述问题, 实现硬质材料的高质量钻孔与切割。例如, Guo 等<sup>[9]</sup>控制液层厚度, 在薄液层下进行激光加工, 形成的连续和定向的高速微射流有助于实现材料去除并改善表面质量。通过这一方法, 他们实现了不同热敏材料方形和圆形微通孔阵列的制备, 如图 8(a) 所示。并且加工出来的通孔表面无需再进行额外的步骤去除沉积层。尽管这种方法能够制备较高精度的通孔阵列, 然而通孔

边缘还存在变形, 难以实现垂直度高的通孔制备。为了解决这一问题, Lu 等<sup>[98]</sup>通过空间光调制器将飞秒激光的高斯光束调制为贝塞尔光束, 实现不同形貌, 不同尺寸的微孔, 如图 8(b) 所示。利用这种方法可实现无锥度加工微孔, 并且加工出来的微孔不仅深度高, 而且表面光滑一致性良好, 实现了微孔的可控制造。除了钻孔之外, 液体辅助激光加工在激光切割方面也有着重要作用, Guo 等<sup>[19]</sup>利用同样的方法, 他们在传统激光加工和化学刻蚀难以加工的 4H-SiC 表面上制造的高质量微通道阵列结构, 如图 8(c) 所示。这种微通道阵列能够作为制冷系统, 在半导体集成领域和微流控领域具有广泛的应用前景。此外, 液体辅助激光加工技术还可以实现大面积、深度范围广的凹槽。Yuvraj 等<sup>[99]</sup>利用水辅助在硅表面切割, 制备了无飞溅、无重铸层和无微裂纹的凹槽结构, 凹槽最深可达 520  $\mu\text{m}$ , 底部平坦并且在 14~520  $\mu\text{m}$  深度范围内具有良好的均匀性。

### 4.4 其他应用

除了以上介绍的常见应用外, 液体辅助激光加工在一些新型光电器件方面也具有重要的应用, 例如光波导、传感器等<sup>[68,100-101]</sup>。利于这一技术能够显著提升

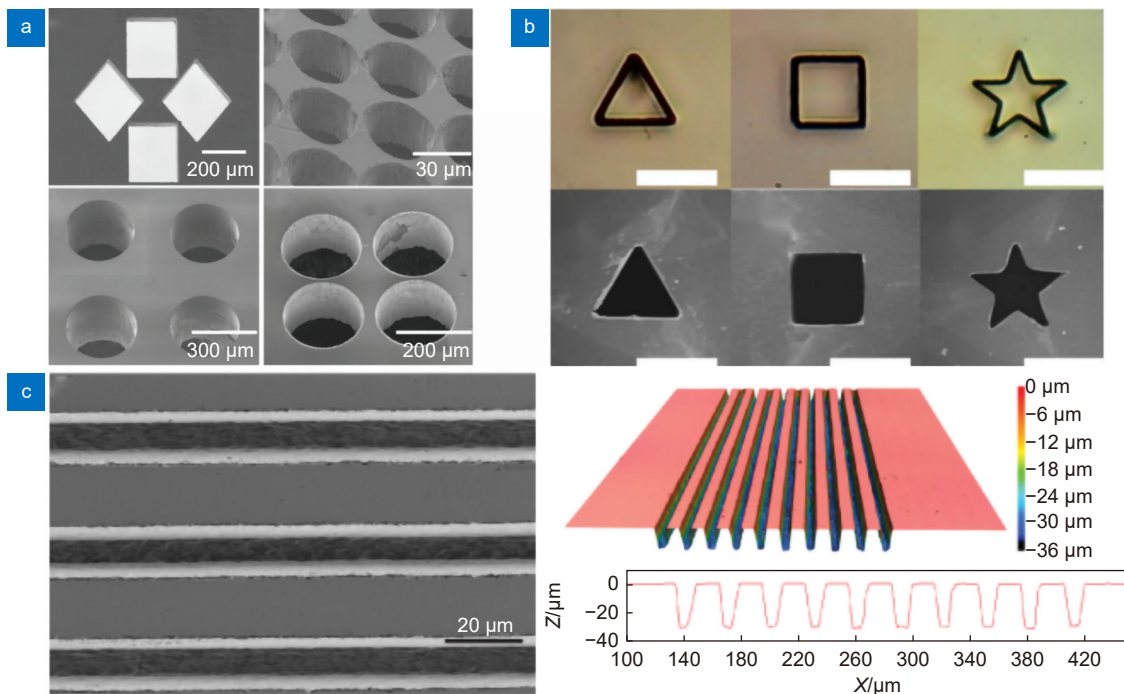


图 8 (a) 激光诱导微射流辅助消融方法制备的通孔阵列<sup>[19]</sup>; (b) 不同形貌的无锥度微孔<sup>[98]</sup>; (c) 激光诱导微射流辅助消融方法制备的微通道阵列<sup>[19]</sup>

Fig. 8 (a) Through hole array prepared by laser-induced micro-jet assisted ablation<sup>[19]</sup>; (b) Non-taper pores with different morphologies<sup>[98]</sup>; (c) Microchannel array prepared by laser-induced microjet assisted ablation<sup>[19]</sup>

光器件的性能, 例如, 对于光波导器件, 结构的平滑度是影响波导传输损耗的重要因素之一, 而利用液体辅助激光加工技术能够显著降低结构表面的粗糙度。为了减低波导的传播损耗, Li 等<sup>[100]</sup>利用液体辅助激光加工技术在氮化镓上制备了较为光滑的波导结构, 具有非常低的吸收损耗, 相对于电感耦合等离子体刻蚀技术制备后的结构损耗降低了大约  $2 \text{ dB mm}^{-1}$ 。此外, 液体辅助激光加工技术可以通过降低结构表面粗糙度来提高光纤传感器的灵敏度。Shao 等<sup>[101]</sup>利用液体辅助激光加工技术制备了表面粗糙度约为  $0.33 \text{ nm}$  的蓝宝石压力传感器, 并且测试了从室温到  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  的压力灵敏度, 在  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 压力灵敏度最高可达  $25 \text{ nm/MPa}$ , 在军事领域和航空航天等高温高压极端环境的压力检测中具有重要的应用价值。总之, 液体辅助激光加工技术在高精度、高表面质量器件制备方面具有重要的应用价值。随着技术的不断发展, 加工精度和加工效率有望进一步提升, 对于液体辅助激光加工技术在各个前沿领域的应用也会越来越多。

## 5 总结和展望

本文总结了液体辅助激光加工技术在微纳器件加工方面的研究进展, 从原理上, 由于液体的作用能够带走加工表面产生的碎屑, 同时起到减少热影响区的作用, 与其他激光加工工艺相比, 这种方法制备出的结构表面质量相对较好。同时, 这一技术去除材料的机理具体取决于加工方式以及使用辅助液体种类, 几乎可以实现对任意常见材料的加工, 这也是液体辅助激光技术的巨大优势之一, 为现阶段生产生活基础设施建设领域和国防军事等高端工业制造领域的应用留下了广阔的发展空间。本文对液体辅助激光加工方法的基本流程进行了介绍。着重针对液体辅助激光加工材料去除原理对三种不同的加工方法进行了解释。并对各种方法的优劣进行了对比。之后详细介绍了不同材料中不同辅助液体对加工质量的影响, 并对不同材料和辅助液体的微纳结构制备。最后, 总结了液体辅助激光加工技术在微光学元件、微流控器件和钻孔切割等应用方面的代表性工作, 希望为后续的研究人员提供一个详细的参考。

随着激光加工在工业领域和国防军事中的应用日益广泛, 推动了激光技术与其他加工技术在微纳器件制备领域的不断融合发展和技术突破。特别是微纳光学器件的性能严重依赖结构表面的平滑度以及形貌轮

廓, 对微纳加工技术提出了更高的要求。事实上, 虽然已经有很多学者研究了液体辅助激光加工技术过程的宏观现象和微观现象的机理, 比如化学反应原理、空化气泡的动力学特征、微射流理论等。然而, 液体辅助激光加工技术的机制并不系统, 具体的材料去除机制还有待进一步研究, 对这些机制的进一步探究有助于更精确的选择合适的加工技术和加工参数来提高加工质量。此外, 液体辅助激光加工技术在加工性能提升和应用领域扩展方面的研究将是未来发展的重要方向之一。在加工性能方面, 如何高效制造能够突破光学衍射极限的高精度结构方面仍有很大的改进空间。在应用上, 随着技术的不断进步, 液体辅助激光加工技术也应该继续寻找更多的创新应用。例如, 在微光学元件方面可以拓展宽光谱应用, 向紫外、红外、太赫兹波段等波段做出新的贡献。在材料方面, 金刚石、碳化硅等超硬材料在微机械、微电子和微纳光学等领域的需求迅速增长, 液体辅助激光加工技术或许可以发挥重要作用。

## 参考文献

- [1] Gao B, Chen T, Khuat V, et al. Fabrication of grating structures on silicon carbide by femtosecond laser irradiation and wet etching[J]. *Chin Opt Lett*, 2016, **14**(2): 021407.
- [2] Bharadwaj V, Wang Y C, Fernandez T T, et al. Femtosecond laser written diamond waveguides: a step towards integrated photonics in the far infrared[J]. *Opt Mater*, 2018, **85**: 183–185.
- [3] Cao J J, Hou Z S, Tian Z N, et al. Bioinspired zoom compound eyes enable variable-focus imaging[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(9): 10107–10117.
- [4] Feng S C, Zhang R, Huang C Z, et al. An investigation of recast behavior in laser ablation of 4H-silicon carbide wafer[J]. *Mater Sci Semicond Process*, 2020, **105**: 104701.
- [5] Saini S K, Dubey A K. Study of material characteristics in laser trepan drilling of ZTA[J]. *J Manuf Process*, 2019, **44**: 349–358.
- [6] Chang H F, Yeung W K, Kao W C, et al. Surface micromachining on a polymethylmethacrylate substrate using visible laser-induced backside wet etching with a  $\text{KMnO}_4$  solution as an absorber[J]. *J Laser Appl*, 2020, **32**(2): 022014.
- [7] Feng W H, Guo J, Yan W J, et al. Deep channel fabrication on copper by multi-scan underwater laser machining[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **111**: 653–663.
- [8] Kim K, Song M K, Lee S J, et al. Fundamental study on underwater cutting of 50 mm-thick stainless steel plates using a fiber laser for nuclear decommissioning[J]. *Appl Sci*, 2022, **12**(1): 495.
- [9] Frias Batista L M, Nag A, Meader V K, et al. Generation of nanomaterials by reactive laser-synthesis in liquid[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2022, **65**(7): 274202.
- [10] Wang J, Niino H, Yabe A. One-step microfabrication of fused silica by laser ablation of an organic solution[J]. *Appl Phys A*, 1999, **68**(1): 111–113.
- [11] Tian W T, Wang Z W, Wang C J, et al. Effects of bubble

- behaviors in femtosecond laser machining of silicon wafer in liquids[J]. *J Manuf Process*, 2022, **83**: 502–511.
- [12] Derrien T J Y, Koter R, Krüger J, et al. Plasmonic formation mechanism of periodic 100-nm-structures upon femtosecond laser irradiation of silicon in water[J]. *J Appl Phys*, 2014, **116**(7): 074902.
- [13] Long J Y, Eliceiri M, Vangelatos Z, et al. Early dynamics of cavitation bubbles generated during ns laser ablation of submerged targets[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(10): 14300–14309.
- [14] Kalus M R, Bärsch N, Streubel R, et al. How persistent microbubbles shield nanoparticle productivity in laser synthesis of colloids - quantification of their volume, dwell dynamics, and gas composition[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2017, **19**(10): 7112–7123.
- [15] Zhang D S, Li Z G, Sugioka K. Laser ablation in liquids for nanomaterial synthesis: diversities of targets and liquids[J]. *J Phys Photonics*, 2021, **3**(4): 042002.
- [16] Zhang D S, Li Z G, Liang C H. Diverse nanomaterials synthesized by laser ablation of pure metals in liquids[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2022, **65**(7): 274203.
- [17] Chen L W, Hong M H. Functional nonlinear optical nanoparticles synthesized by laser ablation[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(5): 210007.
- [18] Hoppius J S, Maragkaki S, Kanitz A, et al. Optimization of femtosecond laser processing in liquids[J]. *Appl Surf Sci*, 2019, **467–468**: 255–260.
- [19] Guo Y, Qiu P, Xu S L, et al. Laser-induced microjet-assisted ablation for high-quality microfabrication[J]. *Int J Extrem Manuf*, 2022, **4**(3): 035101.
- [20] Ren N F, Xia K B, Yang H Y, et al. Water-assisted femtosecond laser drilling of alumina ceramics[J]. *Ceram Int*, 2021, **47**(8): 11465–11473.
- [21] Zhang D S, Ranjan B, Tanaka T, et al. Underwater persistent bubble-assisted femtosecond laser ablation for hierarchical micro/nanostructuring[J]. *Int J Extrem Manuf*, 2020, **2**(1): 015001.
- [22] Zhang D S, Wu L C, Ueki M, et al. Femtosecond laser shockwave peening ablation in liquids for hierarchical micro/nanostructuring of brittle silicon and its biological application[J]. *Int J Extrem Manuf*, 2020, **2**(4): 045001.
- [23] Wang J, Niino H, Yabe A. Micromachining of transparent materials with super-heated liquid generated by multiphotonic absorption of organic molecule[J]. *Appl Surf Sci*, 2000, **154–155**: 571–576.
- [24] Cao X W, Chen Q D, Fan H, et al. Liquid-assisted femtosecond laser precision-machining of silica[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2018, **8**(5): 287.
- [25] Sun X Y, Yu J L, Hu Y W, et al. Study on ablation threshold of fused silica by liquid-assisted femtosecond laser processing[J]. *Appl Opt*, 2019, **58**(33): 9027–9032.
- [26] Kopitkovas G, Lippert T, David C, et al. Fabrication of beam homogenizers in quartz by laser micromachining[J]. *J Photochem Photobiol A: Chem*, 2004, **166**(1–3): 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2004.05.001>.
- [27] Zhigalina O M, Khmelenin D N, Atanova A V, et al. A nanoscale modification of materials at thermoplasmonic laser-induced backside wet etching of sapphire[J]. *Plasmonics*, 2020, **15**(3): 599–608.
- [28] Long J Y, Zhou C X, Cao Z Q, et al. Incubation effect during laser-induced backside wet etching of sapphire using high-repetition-rate near-infrared nanosecond lasers[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **109**: 61–70.
- [29] Olenin A Y, Lisichkin G V. Metal nanoparticles in condensed media: preparation and the bulk and surface structural dynamics[J]. *Russ Chem Rev*, 2011, **80**(7): 605–630.
- [30] Ding X M, Sato T, Kawaguchi Y, et al. Laser-induced backside wet etching of sapphire[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2003, **42**(2B): L176–L178.
- [31] Xie X Z, Huang X D, Jiang W, et al. Three dimensional material removal model of laser-induced backside wet etching of sapphire substrate with CuSO<sub>4</sub> solutions[J]. *Opt Laser Technol*, 2017, **89**: 59–68.
- [32] Yan T Y, Ji L F, Hong M H. Backside wet etching of sapphire substrate by laser-induced carbothermal reduction[J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **149**: 107900.
- [33] Luong K P, Tanabe-Yamagishi R, Yamada N, et al. Laser-assisted wet etching of silicon back surfaces using 1552 nm femtosecond laser[J]. *Int J Electr Mach*, 2020, **25**: 7.
- [34] Deng C, Ki H. Tunable wetting surfaces with interacting cavities via femtosecond laser patterning and wet etching[J]. *J Appl Phys*, 2020, **128**(1): 015306.
- [35] Wang S K, Zhang F, Yang Q, et al. Chalcogenide glass IR artificial compound eyes based on femtosecond laser microfabrication[J]. *Adv Mater Technol*, 2022, **8**(2): 2200741.
- [36] Kim Y S, Kim J, Choe J S, et al. Semiconductor microlenses fabricated by one-step wet etching[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000, **12**(5): 507–509.
- [37] Atuchin V V, Soldatenkov I S, Kirpichnikov A V, et al. Multilevel kinoform microlens arrays in fused silica for high-power laser optics[J]. *Proc SPIE*, 2004, **5481**: 43–46.
- [38] Cao X W, Lu Y M, Fan H, et al. Wet-etching-assisted femtosecond laser holographic processing of a sapphire concave microlens array[J]. *Appl Opt*, 2018, **57**(32): 9604–9608.
- [39] Gao B, Chen T, Chen Y, et al. Fabrication of through micro-hole arrays in silicon using femtosecond laser irradiation and selective chemical etching[J]. *Chin Phys Lett*, 2015, **32**(10): 107901.
- [40] Khuat V, Ma Y C, Si J H, et al. Fabrication of through holes in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching[J]. *Appl Surf Sci*, 2014, **289**: 529–532.
- [41] Meng X W, Yang Q, Chen F, et al. Fabrication of 3D solenoid microcoils in silica glass by femtosecond laser wet etch and microsolidics[J]. *Proc SPIE*, 2015, **9449**: 94493N.
- [42] Wang C W, Yang L, Zhang C C, et al. Multilayered skyscraper microchips fabricated by hybrid "all-in-one" femtosecond laser processing[J]. *Microsyst Nanoeng*, 2019, **5**: 17.
- [43] Cho C S, Kong D, Kim B. Wet/dry etching combined microtextured structures for high-efficiency solar cells[J]. *Micro Nano Lett*, 2015, **10**(10): 528–532.
- [44] Sugioka K, Masuda M, Hongo T, et al. Three-dimensional microfluidic structure embedded in photostructurable glass by femtosecond laser for lab-on-chip applications[J]. *Appl Phys A*, 2004, **79**(4–6): 815–817.
- [45] Wang B X, Qi J Y, Lu Y M, et al. Rapid fabrication of smooth micro-optical components on glass by etching-assisted femtosecond laser modification[J]. *Materials (Basel)*, 2022, **15**(2): 678.
- [46] Sugioka K, Cheng Y. Integrated microchips for biological analysis fabricated by femtosecond laser direct writing[J].



- MRS Bull.*, 2011, **36**(12): 1020–1027.
- [47] Xu J, Wu D, Hanada Y, et al. Electrofluidics fabricated by space-selective metallization in glass microfluidic structures using femtosecond laser direct writing[J]. *Lab Chip*, 2013, **13**(23): 4608–4616.
- [48] Wu D, Wu S Z, Xu J, et al. Hybrid femtosecond laser microfabrication to achieve true 3D glass/polymer composite biochips with multiscale features and high performance: the concept of ship-in-a-bottle biochip[J]. *Laser Photon Rev*, 2014, **8**(3): 458–467.
- [49] Bian H, Shan C, Liu K Y, et al. A miniaturized Rogowski current transducer with wide bandwidth and fast response[J]. *J Micromech Microeng*, 2016, **26**(11): 115015.
- [50] Ehrhardt M, Lorenz P, Han B, et al. Laser-induced backside wet etching of SiO<sub>2</sub> with a visible ultrashort laser pulse by using KMnO<sub>4</sub> solution as an absorber liquid[J]. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2018, **13**(2): 47–54.
- [51] Kwon K K, Kim H, Kim T, et al. High aspect ratio channel fabrication with near-infrared laser-induced backside wet etching[J]. *J Mater Process Technol*, 2020, **278**: 116505.
- [52] Li X Y, Li R Y, Yu Z, et al. Deepening of nanograting structures on Si by a two-step laser spatial-selective amorphization strategy combined with chemical etching[J]. *Appl Surf Sci*, 2022, **589**: 152965.
- [53] Zhou S P, Li X W, Huang J, et al. Fabrication of nanogap structures through spatially shaped femtosecond laser modification with the assistance of wet chemical etching[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(15): 3560–3563.
- [54] Hao B, Liu H W, Chen F, et al. Versatile route to gapless microlens arrays using laser-tunable wet-etched curved surfaces[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(12): 12939–12948.
- [55] Li X W, Xie Q, Jiang L, et al. Controllable Si (100) micro/nanostructures by chemical-etching-assisted femtosecond laser single-pulse irradiation[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(18): 181907.
- [56] Ito Y, Chiah S Y, Luong K P, et al. Formation of fine periodic structures on back surface of Si substrate by a femtosecond laser at 1552 nm[J]. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2020, **15**(2): 111–117.
- [57] Zhang D S, Li X Z, Fu Y, et al. Liquid vortexes and flows induced by femtosecond laser ablation in liquid governing formation of circular and crisscross LIPSS[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(2): 210066.
- [58] Zhang D S, Ranjan B, Tanaka T, et al. Carbonized hybrid micro/nanostructured metasurfaces produced by femtosecond laser ablation in organic solvents for biomimetic antireflective surfaces[J]. *ACS Appl Nano Mater*, 2020, **3**(2): 1855–1871.
- [59] Zhang D S, Sugioka K. Hierarchical microstructures with high spatial frequency laser induced periodic surface structures possessing different orientations created by femtosecond laser ablation of silicon in liquids[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, **2**(3): 190002.
- [60] Ali N, Bashir S, Umm-I-Kalsoom, et al. Effect of liquid environment on the titanium surface modification by laser ablation[J]. *Appl Surf Sci*, 2017, **405**: 298–307.
- [61] Sato T, Kurosaki R, Kawaguchi Y, et al. Fabrication of multiple slanted microstructures on silica glass by laser-induced backside wet etching[J]. *J Laser Micro/Nanoeng*, 2010, **5**(3): 256–262.
- [62] Zhao T, Zhuo M, Zhou X, et al. Fused silica gyroscope resonator manufactured with femtosecond laser assisted wet etching[J]. *J Microelectromech Syst*, 2022, **31**(3): 315–317.
- [63] Skora J L, Gaiffe O, Bargiel S, et al. High-fidelity glass microaxicons fabricated by laser-assisted wet etching[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(3): 3749–3759.
- [64] Zhang F, Wang C, Yin K, et al. Quasi-periodic concave microlens array for liquid refractive index sensing fabricated by femtosecond laser assisted with chemical etching[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 2419.
- [65] Sun X Y, Zheng J F, Liang C, et al. Improvement of rear damage of thin fused silica by liquid-assisted femtosecond laser cutting[J]. *Appl Phys A*, 2019, **125**(7): 461.
- [66] Ehrhardt M, Raciukaitis G, Gecys P, et al. Microstructuring of fused silica by laser-induced backside wet etching using picosecond laser pulses[J]. *Appl Surf Sci*, 2010, **256**(23): 7222–7227.
- [67] Böhme R, Pissadakis S, Ehrhardt M, et al. Ultra-short laser processing of transparent material at the interface to liquid[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2006, **39**(7): 1398–1404.
- [68] Shao Z Q, Wu Y L, Wang S, et al. All-sapphire-based fiber-optic pressure sensor for high-temperature applications based on wet etching[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(3): 4139–4146.
- [69] Li Q K, Cao J J, Yu Y H, et al. Fabrication of an anti-reflective microstructure on sapphire by femtosecond laser direct writing[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(3): 543–546.
- [70] Pissadakis S, Böhme R, Zimmer K. Sub-micron periodic structuring of sapphire by laser induced backside wet etching technique[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(4): 1428–1433.
- [71] Ehrhardt M, Raciukaitis G, Gecys P, et al. Laser-induced backside wet etching of fluoride and sapphire using picosecond laser pulses[J]. *Appl Phys A*, 2010, **101**(2): 399–404.
- [72] Zhou S K, Shen L, Wang F J, et al. High-aspect-ratio ZnSe microstructure generated by spatially shaped femtosecond laser writing assisted with wet chemical etching[J]. *Opt Laser Technol*, 2022, **147**: 107687.
- [73] Bischof D, Kahl M, Michler M. Laser-assisted etching of borosilicate glass in potassium hydroxide[J]. *Opt Mater Express*, 2021, **11**(4): 1185–1195.
- [74] Seo J M, Kwon K K, Song K Y, et al. Deposition of durable micro copper patterns into glass by combining laser-induced backside wet etching and laser-induced chemical liquid phase deposition methods[J]. *Materials (Basel)*, 2020, **13**(13): 2977.
- [75] Zhang D S, Gökce B, Sommer S, et al. Debris-free rear-side picosecond laser ablation of thin germanium wafers in water with ethanol[J]. *Appl Surf Sci*, 2016, **367**: 222–230.
- [76] Miyata Y, Nakamukai Y, Azevedo C T, et al. Photoetching method that provides improved silicon-on-insulator layer thickness uniformity in a defined area[J]. *Microelectron Eng*, 2017, **180**: 93–95.
- [77] Duan M M, Wu J J, Zhang Y B, et al. Ultra-low-reflective, self-cleaning surface by fabrication dual-scale hierarchical optical structures on silicon[J]. *Coatings*, 2021, **11**(12): 1541.
- [78] Kawaguchi Y, Sato T, Narazaki A, et al. Rapid prototyping of silica glass microstructures by the LIBWE method: fabrication of deep microtrenches[J]. *J Photochem Photobiol A:Chem*, 2006, **182**(3): 319–324.
- [79] Koker L, Kolasinski K W. Photoelectrochemical etching of Si and porous Si in aqueous HF[J]. *Phys Chem Chem Phys*,

- 2000, **2**(2): 277–281.
- [80] Gabouze N, Belhousse S, Outemzabet R. Chemical etching of mono and poly-crystalline silicon in HF/K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/H<sub>2</sub>O solutions[J]. *Acta Phys Slovaca*, 2003, **53**(3): 207–214.
- [81] Romano L, Vila-Comamala J, Jefimovs K, et al. High-aspect-ratio grating microfabrication by platinum-assisted chemical etching and gold electroplating[J]. *Adv Eng Mater*, 2020, **22**(10): 2000258.
- [82] Immanuel P N, Chiang C C, Lee T H, et al. Utilization of low wavelength laser linking with electrochemical etching to produce nano-scale porous layer on p-type silicon wafer with high luminous flux[J]. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2021, **10**(1): 016003.
- [83] Chen L, Cao K Q, Li Y L, et al. Large-area straight, regular periodic surface structures produced on fused silica by the interference of two femtosecond laser beams through cylindrical lens[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(12): 200036.
- [84] Chen F, Liu H W, Yang Q, et al. Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(19): 20334–20343.
- [85] Kim J, Kim S I, Joung Y H, et al. Two-step hybrid process of movable part inside glass substrate using ultrafast laser[J]. *Micro Nano Syst Lett*, 2021, **9**(1): 16.
- [86] Paiè P, Bragheri F, Di Carlo D, et al. Particle focusing by 3D inertial microfluidics[J]. *Microsyst Nanoeng*, 2017, **3**: 17027.
- [87] He F, Cheng Y, Xu Z Z, et al. Direct fabrication of homogeneous microfluidic channels embedded in fused silica using a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(3): 282–284.
- [88] Jipa F, Iosub S, Calin B, et al. High repetition rate UV versus VIS picosecond laser fabrication of 3D microfluidic channels embedded in photosensitive glass[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2018, **8**(8): 583.
- [89] Capuano L, Berenschot J W, Tiggelaar R M, et al. Fabrication of microstructures in the bulk and on the surface of sapphire by anisotropic selective wet etching of laser-affected volumes[J]. *J Micromech Microeng*, 2022, **32**(12): 125003.
- [90] Hua J G, Liang S Y, Chen Q D, et al. Free-form micro-optics out of crystals: femtosecond laser 3D sculpturing[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, **32**(26): 2200255.
- [91] Gao S, Li Z Z, Hu Z Y, et al. Diamond optical vortex generator processed by ultraviolet femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(9): 2684–2687.
- [92] Liu X Q, Zhang Y L, Li Q K, et al. Biomimetic sapphire windows enabled by inside-out femtosecond laser deep-describing[J]. *PhotonIX*, 2022, **3**(1): 1.
- [93] Masuda M, Sugioka K, Cheng Y, et al. Direct fabrication of freely movable microplate inside photosensitive glass by femtosecond laser for lab-on-chip application[J]. *Appl Phys A*, 2004, **78**(7): 1029–1032.
- [94] Kim S, Kim J, Joung Y H, et al. Optimization of selective laser-induced etching (SLE) for fabrication of 3D glass microfluidic device with multi-layer micro channels[J]. *Micro Nano Syst Lett*, 2019, **7**(1): 15.
- [95] Shan C, Yang Q, Bian H, et al. Fabrication of three-dimensional microvalves of internal nested structures inside fused silica[J]. *Micromachines (Basel)*, 2021, **12**(1): 43.
- [96] Liao Y, Song J X, Li E, et al. Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing[J]. *Lab Chip*, 2012, **12**(4): 746–749.
- [97] Zhang C, Li M, Ye B C, et al. Electrons dynamics control micro-hole drilling using temporally/spatially shaped femtosecond laser[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(2): 210389. 张超, 李敏, 叶柏臣, 等. 飞秒激光时空整形的电子动态调控微孔加工[J]. *光电工程*, 2022, **49**(2): 210389.
- [98] Lu Y M, Duan Y Z, Liu X Q, et al. High-quality rapid laser drilling of transparent hard materials[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(4): 921–924.
- [99] Madhukar Y K, Mullick S, Nath A K. A study on co-axial water-jet assisted fiber laser grooving of silicon[J]. *J Mater Process Technol*, 2016, **227**: 200–215.
- [100] Li W Y, Luo Y, Xiong B, et al. Fabrication of GaN-based ridge waveguides with very smooth and vertical sidewalls by combined plasma dry etching and wet chemical etching[J]. *Phys Status Solidi A*, 2015, **212**(10): 2341–2344.
- [101] Shao Z Q, Wu Y L, Wang S, et al. All-sapphire fiber-optic pressure sensors for extreme harsh environments[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(3): 3665–3674.

## 作者简介



栾美玲, 女, 吉林大学大学集成电路系统硕士生, 研究方向为飞秒激光微纳加工,  
E-mail: luanml2022@163.com



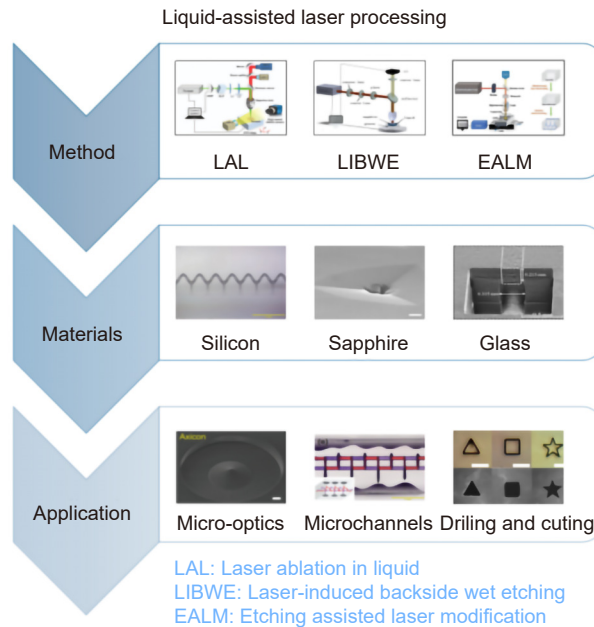
【通信作者】刘学青, 男, 现为吉林大学副教授, 博士生导师, 主要从事超快激光精密加工技术研发及其在硬脆材料光电器件制备中的应用研究。  
E-mail: liuxueqing@jlu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Liquid-assisted laser fabrication of hard materials and applications

Luan Meiling, Zheng Jiaxin, Sun Xiangchao, Liu Xueqing\*



Outline of the review about liquid assisted laser fabrication

**Overview:** With the development of industry, laser fabrication has become one of the important technologies for welding, cutting, surface processing, and other advanced manufacturing areas. At the same time, the pursuit of structures miniaturization, devices integration, and high precision has put forward more stringent requirements for laser fabrication technologies. Due to the advantages of stable mechanical and chemical properties and unique photoelectric properties, hard and brittle materials have been widely used in aerospace, the photoelectric industry, et al. Laser fabrication is an ideal technology for hard and brittle materials processing due to its high precision, high energy, and non-contact properties. In order to achieve the removal of hard and brittle materials, high laser energy is usually required, resulting in low fabrication accuracy and poor surface quality. As an improved laser processing method, liquid-assisted laser fabrication can effectively improve fabrication accuracy and surface quality. The processing characteristics and material removal principles of three different liquid-assisted laser processing technologies are summarized in this review. According to the different functions of the medium through which the laser penetrates and the kinds of liquid, liquid-assisted laser fabrication technology can be divided into Laser ablation in liquid (LAL), laser-induced backside wet etching (LIBWE), and etching-assisted laser modification (EALM). The auxiliary liquid of Laser ablation in liquid is mostly water, which mainly plays the role of cooling and removing debris. The auxiliary liquids used by laser-induced backside wet etching include organic solvents, acid-base solutions, inorganic salts, and other liquids, which play different roles according to different liquids. The etching-assisted laser modification mainly uses an acid or alkaline solution as an auxiliary liquid to remove laser-modified materials. Different methods and auxiliary liquids have different mechanisms in the methods. Therefore, almost any material can be processed by choosing suitable methods and auxiliary liquids, including photosensitive glass, silicon crystal, sapphire, and other transparent hard brittle materials. Here, we summarize the fabrication technologies and fabrication parameters for different materials. The development and applications of liquid-assisted laser fabrication technologies in the fields of micro-optical components, microfluidic devices, and drilling and cutting are introduced. Finally, the challenges of the technology are discussed.

Luan M L, Zheng J X, Sun X C, et al. Liquid-assisted laser fabrication of hard materials and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220328; DOI: 10.12086/oe.2023.220328

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (62105117) and the Scientific Research Project of the Education Department of Jilin Province (JJKH20221005KJ)

State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

\* E-mail: liuxueqing@jlu.edu.cn