

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

飞秒激光加工微纳光学器件

董彬, 张娟, 王达伟, 张亦元, 张乐然, 李瑞, 辛晨, 刘顺利, 张子航, 吴昊, 蒋绍军, 朱苏皖, 刘炳瑞, 吴东

引用本文:

董彬, 张娟, 王达伟, 等. 飞秒激光加工微纳光学器件[J]. 光电工程, 2023, 50(3): 220073.

Dong B, Zhang J, Wang D W, et al. Femtosecond laser micromachining optical devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220073.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220073>

收稿日期: 2022-05-05; 修改日期: 2022-06-25; 录用日期: 2022-07-07

相关论文

Advances in femtosecond laser direct writing of fiber Bragg gratings in multicore fibers: technology, sensor and laser applications

Alexey Wolf, Alexander Dostovalov, Kirill Bronnikov, Mikhail Skvortsov, Stefan Wabnitz, Sergey Babin

Opto-Electronic Advances 2022, 5(4): 210055 doi: [10.29026/oea.2022.210055](https://doi.org/10.29026/oea.2022.210055)

激光直写制备金属与碳材料微纳结构与器件研究进展

周伟平, 白石, 谢祖武, 刘明伟, 胡安明

光电工程 2022, 49(1): 210330 doi: [10.12086/oe.2022.210330](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210330)

飞秒激光制备柔性电子器件进展

廖嘉宁, 张东石, 李铸国

光电工程 2022, 49(2): 210388 doi: [10.12086/oe.2022.210388](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210388)

微结构传感器的激光制造技术研究进展

陈锐, 王锦成, 章文卓, 计东生, 朱鑫宁, 罗涛, 王菁, 周伟

光电工程 2022, (): doi: [10.12086/oe.2023.220041](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220041)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

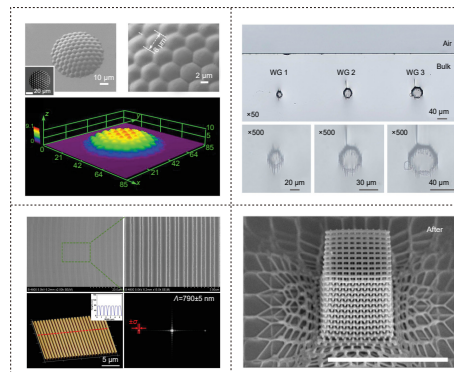
DOI: 10.12086/oe.2023.220073

飞秒激光加工微纳光学器件

董彬¹, 张娟², 王达伟¹, 张亦元¹, 张乐然¹,
李瑞¹, 辛晨¹, 刘顺利¹, 张子航¹, 吴昊¹,
蒋绍军¹, 朱苏皖¹, 刘炳瑞^{1*}, 吴东^{1*}

¹中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽省高等学校精密科学仪器重点实验室, 安徽合肥 230026;

²中国科学技术大学第一附属医院, 生命科学与医学部, 安徽合肥 230001



摘要: 光学器件正在向着小型化、集成化以及柔性可变形等方向发展, 基于集成微纳光学器件的光学系统以其较低的功耗、快速的响应时间以及高信息容量等优势脱颖而出。然而目前的高精度微纳加工手段如聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 刻蚀、半导体光刻等工艺复杂, 且缺乏灵活性。飞秒激光作为一种非接触、高精度、高脉冲强度的“冷”加工工具在微纳加工方面受到格外青睐。本文首先阐述了飞秒激光加工微纳光学器件的背景及相关机理, 然后讨论了提高飞秒激光加工分辨率的各种方法, 接着综述了基于飞秒激光的多种先进加工手段, 其后总结了近年来飞秒激光加工微透镜、光栅、光波导以及光子晶体方面的代表性研究进展。最后, 本文概括了飞秒激光加工微纳光学器件研究领域所面临的挑战以及未来发展方向。

关键词: 飞秒激光; 高精度; 微纳结构; 光学器件

中图分类号: TB383.1; TN249

文献标志码: A

董彬, 张娟, 王达伟, 等. 飞秒激光加工微纳光学器件 [J]. 光电工程, 2023, 50(3): 220073

Dong B, Zhang J, Wang D W, et al. Femtosecond laser micromachining optical devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220073

Femtosecond laser micromachining optical devices

Dong Bin¹, Zhang Juan², Wang Dawei¹, Zhang Yiyuan¹, Zhang Leran¹, Li Rui¹, Xin Chen¹,
Liu Shunli¹, Zhang Zihang¹, Wu Hao¹, Jiang Shaojun¹, Zhu Suwan¹, Liu Bingrui^{1*}, Wu Dong^{1*}

¹CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Key Laboratory of Precision Scientific Instrumentation of Anhui Higher Education Institutes, Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Department of Clinical Laboratory, the First Affiliated Hospital of USTC, Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230001, China

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-25; 录用日期: 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61927814, 52122511, 91963127, 52075516, U20A20290, 52175396); 安徽省重大科技专项 (201903a05020005)

*通信作者: 刘炳瑞, brliu@ustc.edu.cn; 吴东, dongwu@ustc.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Abstract: Miniaturization, integration, and flexible deformation are the future development trends of optical devices. Meanwhile, optical systems based on integrated micro-optical devices stand out for their low power consumption, fast response, and high information storage capacity. However, current high-precision micro/nano processing methods, such as FIB (Focused Ion Beam) and semiconductor lithography, are far too complex and in lack of flexibility. Femtosecond laser, as a non-contact, high-precision, high-intensity tool for "cold" processing, is particularly favored in micro/nano processing. This review first elucidated the background and mechanism of femtosecond laser micromachining used in optical device. After that, we discussed a number of methods employed to improve the resolution of femtosecond micromachining. Then we listed various advanced processing means based on femtosecond laser and systematically summarized recent representative research developments of femtosecond laser micromachining used in microlens, gratings, optical waveguides, and photonic crystals. Finally, we concluded the challenges and the directions for further development of femtosecond laser machining in the field of micro-optical devices.

Keywords: femtosecond laser; high-precision; micro/nano structure; optical device

1 引言

目前, 以电子为载体的半导体技术发展已趋物理极限, 同时半导体器件尺寸的进一步减小会带来功耗过大等问题。针对上述问题, 以光子为载体的信息技术凭借快速响应时间、高信息容量、强并行处理能力以及低功耗等优势脱颖而出。随着研究人员的不断努力, 光学器件的材料性能、加工工艺以及光学调制的能力都得到了大幅度的提高。然而, 传统光学器件一般尺寸较大, 故由其组成的光学系统十分笨重, 灵活性差, 极大地增大了光学系统的集成难度。微光学理论的发展使得光学器件的集成成为可能, 多种尺度上的光学器件均展现出了不亚于传统光学器件的性能, 这极大地促进了光学系统的微型化发展, 同时也对加工精度提出了更高的要求。

激光加工作为一种非接触、高能量、无污染、便于自动化控制的加工方式, 在材料加工、通信、光学器件、数据存储等重要工业领域有着极其广泛的应用, 受到了业内人士的广泛关注。与传统的长脉冲或连续激光加工技术相比, 飞秒激光具有超短脉宽、超高峰值功率、热效应低等一系列优势, 是一种更加先进的微纳加工工具。早在 1997 年, 飞秒激光就被用来替代紫外光源, 研究人员开始利用飞秒激光诱导双光子聚合加工三维微纳结构^[1]。双光子聚合具有阈值效应, 而飞秒激光在经过物镜的聚焦后一般表现为高斯分布。如果保证焦斑中心处的光强仅略大于双光子电离阈值^[2], 理论上双光子聚合可以实现超出衍射极限的三维分辨率, 在逐点扫描的情况下, 飞秒激光实际上具有了加工任意三维结构的能力。目前, 基于双光子聚

合已经可以实现 100 nm 以下的加工精度^[3-4]。

超短脉冲激光加工金属或半导体材料过程中电子和离子亚系统之间的相互作用主要通过双温模型来解释。基于此模型, 早在 1996 年, 飞秒激光就被用于在金属表面钻孔^[5]。目前, 绝大多数金属材料的高精度切割、钻孔、或表面图案化都可以通过飞秒激光烧蚀来实现。而当超短脉冲激光与介质材料相互作用时, 通过多光子电离或者隧穿电离所引发的“雪崩电离”可以实现精确的减材加工^[6]。早在 1996 年, 飞秒激光就被用于在玻璃中加工波导^[7], 在透明材料中实现三维光学存储^[8]。具有超短脉冲的飞秒激光还可以在两块紧密堆叠的玻璃界面上产生非线性相互作用, 从而允许多种玻璃界面间的局部熔融和焊接^[9]。不仅在科研加工方面, 在医学应用中, 飞秒激光甚至还可以加工生物组织。正是由于飞秒激光所具有的超高脉冲能量, 超短脉冲宽度以及超低热效应, 近视矫正手术才可以成为其最成功的商业应用之一。

因此, 本文对飞秒激光三维微纳加工的原理、优势以及其在光学器件加工方面进行了详细的论述。文章主要分为四节, 第二节介绍了飞秒激光的机理及加工特点, 第三节讨论了提高飞秒激光加工分辨率的多种方法, 第四节聚焦于飞秒激光的加工工艺, 第五节介绍飞秒激光在加工光学器件方面的应用, 包括微透镜, 光波导、光栅以及光子晶体, 最后进行了相关总结及展望。

2 飞秒激光加工分辨率

飞秒激光微纳加工根据加工方法可分为飞秒激光

直写加工、飞秒激光光场调制技术以及飞秒激光干涉加工等, 而根据加工原理可以分为飞秒激光双光子聚合和飞秒激光改性/烧蚀。根据聚焦光斑直径公式 $1.22\lambda/NA$ (λ 代表光波长, NA 代表物镜的数值孔径), 飞秒激光微纳加工的横向分辨率与物镜的数值孔径成正比, 加工分辨率随着数值孔径的增加而增加。在双光子聚合中只需要加工微米级的结构, 这时可以采用大数值孔径的油镜来提高双光子聚合加工的分辨率 (100 倍油镜, 对应的数值孔径为 1.4^[3-4], 分辨率低于 100 nm)。对于毫米乃至厘米级的结构 (如光波导^[10]、微流体通道^[11] 等) 加工, 可以选用数值孔径偏低的物镜 (0.46^[11] 或 0.65^[12], 分辨率位于微米量级)。针对分辨率与加工结构尺寸这一“矛”与“盾”的关系, 在特定的应用中, 研究人员应当在二者之间实现一个平衡, 在保证加工面积的同时尽量提高分辨率。

同时, 飞秒激光焦点处的横截面通常为椭圆形, 高宽比很大 (~2.7)^[13], 轴向, 即高度方向上的分辨率较低。为了提高加工的分辨率, 目前有两个方向, 第一是光束整形, 第二是超分辨技术。光束整形又有狭缝光束整形、时空聚焦以及贝塞尔光束整形等各种方法, 这些方法也可以结合起来共同提高飞秒激光加工的分辨率。

为了尽可能地提高轴向分辨率, 即使得焦点的高宽比尽可能接近 1, 上海光机所的程亚团队就在聚焦透镜前插入了一个平行于激光扫描方向的狭缝, 利用光的衍射特性将焦点的高宽比从 3 降低到 1.3^[14]。法国纳米技术研究所的 Osellame 团队则使用圆柱形望远镜来进行光束整形, 成功地加工出了具有圆形截面的光波导^[15]。但是, 上述两种加工方法只能适用于焦点位置不动, 移动台带动工件做三维运动的情况, 而现在的飞秒激光三维加工系统为了保证加工速度, 一般选择振镜进行面扫描, 此时激光光束会进行一定程度的偏转, 狭缝或者圆柱形望远镜便需要做到随动, 这显然是很具有挑战性的。为此, 程亚团队选择通过时空同步聚焦来控制微流控通道的截面^[16], 也就是在飞秒激光脉冲进入物镜前对其光谱分量进行空间分离, 然后在物镜的焦点处进行不同频率分量的空间叠加。由于空间叠加仅仅发生在焦点附近, 所以焦点处脉冲持续时间最短, 强度最高, 如此便能够全面地提高加工分辨率。当然, 并不是焦点的高宽比越接近 1 越好, 增大焦点的高宽比在钻孔、微流控和并行加工等方面也具有实际

意义。南洋理工大学的 Zhang 团队就利用轴棱锥透镜生成的贝塞尔光进行扫描, 成功地加工出了直径可控的水凝胶纤维、管道和支架^[17]。内布拉斯加大学林肯分校的陆永枫团队将时域上的双脉冲和空域上的飞秒激光贝塞尔光束相结合, 通过调整脉冲延时, 将微通道的刻蚀深度提高了 13 倍^[18]。

除了上述提到的加工方法的改进, 基于光抑制原理的超分辨技术也可以有效地提升双光子聚合的分辨率。超分辨系统包含两束光, 一束为加工光束, 一束为抑制光束, 在加工过程中环形的抑制光束可以抑制环中心部分加工光束所诱导的光聚合, 从而减小特征尺寸并提高分辨率, 目前基于此项原理已研发出受激发射减损显微镜 (stimulated emission depletion microscopy, STED)。上海科技大学的顾敏团队先后利用 BPE-100 光刻胶加工出直径为 40 nm 的单点和线宽为 130 nm 的线^[3], 利用自研的高机械强度的光刻胶实现了 9 nm 的线宽与 52 nm 的线间距^[4], 如图 1 所示。

3 飞秒激光微纳加工方法

3.1 飞秒激光直写加工

飞秒激光直写加工三维微结构通常有两种方法: 一种是三维平台的移动, 另一种是一维移动平台结合振镜的平面扫描实现三维运动。在第二种情况下, 振镜会与移动平台之间相互配合, 振镜每加工完一层, 移动平台就会移动一段距离, 振镜再接着加工下一层, 如此往复。

两种方法各有优势, 研究人员可以根据自己的需求选择合适的加工方法。第一种方法的问题是加工速度慢, 因为振镜的响应速度远比移动平台快, 所以对于同样的结构第二种方法的加工速度要远远快于第一种。第二种方法的问题是加工面积小, 因为振镜的二维加工是通过光束的偏转来实现平面扫描的, 在此过程中焦点的形貌会出现畸变, 且焦点偏离中心点的距离越大, 畸变越大。而三维移动平台的加工则不会出现这种原理性的误差, 所以第一种方法的加工范围更大。

结合双光子聚合技术, 飞秒激光直写已经可以便捷地加工出具有纳米级精度的复杂三维微结构, 如纳米牛^[19]、中空微机械^[20]、相位板^[21-22] 以及手性微结构^[23-24] 等。近年来, 飞秒激光加工技术与生物医疗方面的联系越来越紧密, 但是原有的飞秒激光加工材料

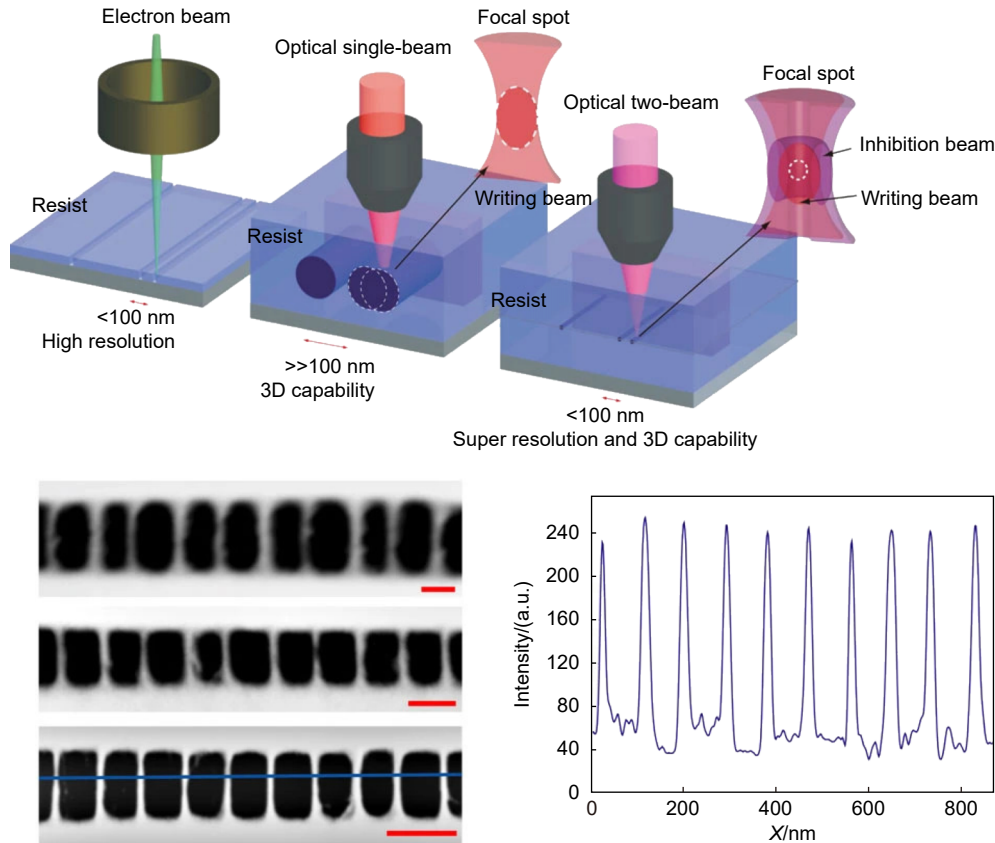
图 1 超分辨的加工原理示意图及加工效果^[4]Fig. 1 Schematic diagram of the super-resolution processing principle and characteristics after processing^[4].

Figure reproduced with permission from ref. [4] © Springer Nature

如 SU-8^[25]、SCR500^[19]、SZ2080^[21-23]、IP 系列^[20] 等生物兼容性较差, 因此其在生物医学方面的应用受到了很大的限制, 亟待改进光刻胶的成分。而水凝胶作为一种具有生物兼容性的材料, 在结合了飞秒激光双光子聚合之后, 已被广泛应用于 4D 智能传感器^[26-28]、驱动器和微机器人^[29] 的加工。中国科学技术大学的吴东团队利用 pH 响应水凝胶加工出了仿生微笼, 并实现了其各向同性膨胀, 利用扫描密度的不同, 加工出了仿生叶片, 实现了其定向旋转^[26]。基于同样的原理, 吉林大学孙洪波团队利用飞秒激光双光子聚合实现了加工微结构对不同液体环境的响应变形^[27], 以及不同水凝胶材料对于湿度的响应不同实现了信息的加密与隐藏^[28]。北京大学的段慧玲团队通过控制飞秒激光对水凝胶材料的加工功率来控制交联密度, 使得不同的位置具有不同的刚度, 在酸碱刺激响应下产生变形或者运动, 如微牵引装置的定向运动^[30], 微笼、微支架和微伞的定向膨胀与收缩^[31], 以及“变形金刚”两种形态之间的切换等^[32]。

除了双光子聚合, 飞秒激光直写还可以对多种材

料进行烧蚀和改性, 形成超润滑^[33-35]、超润湿表面^[36]、多功能微板阵列^[37-38]、纳米沟槽^[39-40]、纳米孔^[41]和光学微腔^[42-43]等微结构, 这些经过激光修饰的材料被广泛应用于液滴运输、气泡运输、亲疏水、亲疏气处理、光通信、传感器^[44]与生物医学等。北京理工大学的姜澜团队将飞秒激光扫描硅片改性结合化学刻蚀, 可以在硅片上制备出高度均匀化的光栅结构, 通过控制化学刻蚀的时间有效地控制光栅的形貌, 且加工出的结构在白光下显示出鲜艳的结构色^[45], 如图 2 所示。吉林大学的研究团队利用飞秒激光脉冲在铜片上加工出周期性沟槽结构, 通过控制激光能量, 扫描速度以及沟槽间的距离, 同时实现了超疏水和结构色^[46]。

3.2 光学调制加工

为了提升三维结构的加工效率, 研究人员在进行加工时充分地考虑到了加工结构的对称性特点, 对于光束进行光学调制从而实现多焦点、面曝光加工, 这时便需要用到衍射光学元件 (diffractive optical element,

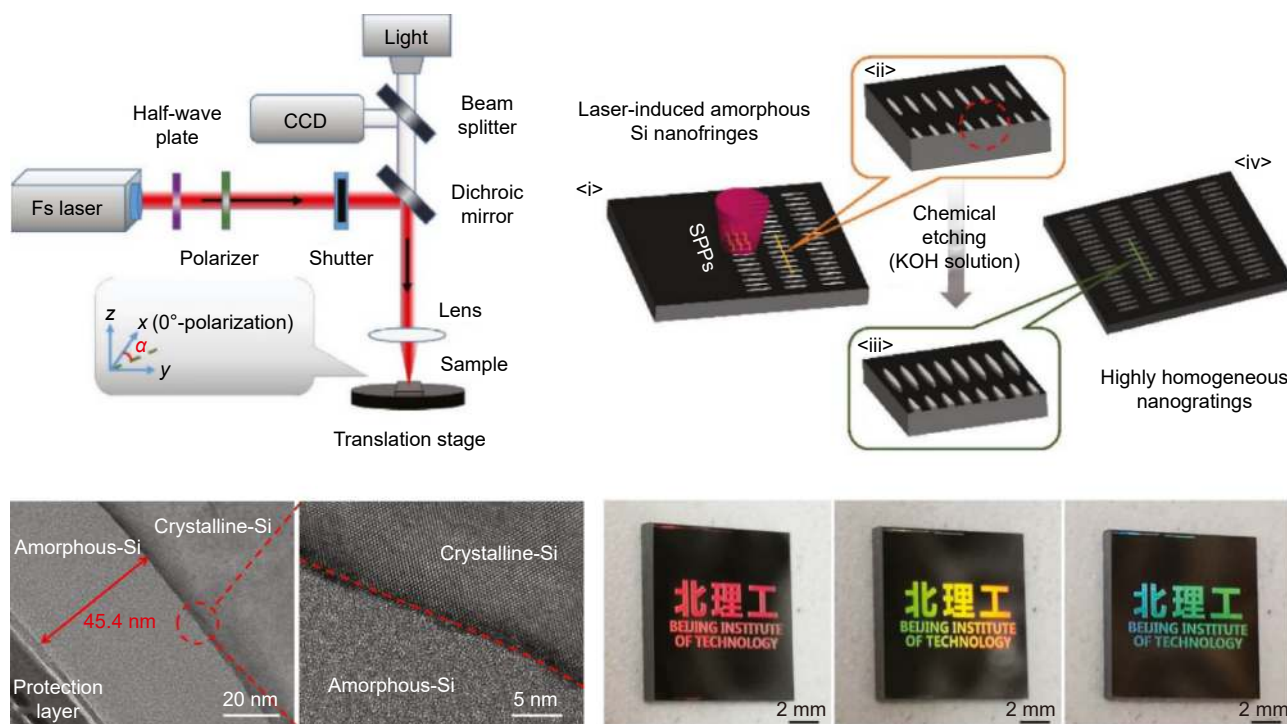
图2 飞秒激光直写加工^[45]

Fig. 2 Femtosecond laser direct writing^[45]. Figure reproduced with permission from ref. [45] © De Gruyter

DOE)、数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 以及空间光调制器 (spatial light modulator, SLM)。

3.2.1 DOE

除了之前利用 SLM 或者 DMD 通过调制多焦点来实现并行加工, 通过 DOE 实现多光束并行加工也是一个行之有效的方法。早在 2004 年, 多级相位型 DOE 就被用于在指定位置加工局部周期性结构, 并成功在 SiO₂ 玻璃表面和玻璃内部精确地加工出微结构^[47], 并同时指出可以通过选择合适的 DOE 焦距以及 DOE 与物镜之间的距离来减小色散效应。但是在高精度飞秒激光多光束加工中, 色差以及脉冲拉伸的影响不可忽略, 此时可以通过添加色散补偿模块来改善, 而此模块还可以有效地增加加工面积, 西班牙海梅一世大学的 Lancis 团队就利用衍射-折射混合光学系统成功在不锈钢表面同时加工出 52 个盲孔^[48]。

除了被用于加工玻璃和金属, 基于 DOE 的飞秒激光多光束加工也可以基于双光子聚合进行增材制造。国际伊比利亚纳米技术实验所的 Nieder 等利用一个固定的 DOE 实现了九束平行光的并行加工, 将加工的时间缩短为原来的 1/9, 如图 3 所示。所加工的周期性阵列被用于细胞和三维微结构之间相互作用的研

究, 且证实三维微结构的存在可以有效促进细胞的增殖, 改变细胞的形貌^[49]。

3.2.2 DMD

均匀的平面光通过 DMD 系统后可以被调制成任意的二维图案, 从而实现大尺寸结构的高速面曝光。同时, 由于飞秒激光所具有的单色性和相干性, DMD 上的微镜阵列也可以作为衍射光栅, 在对分辨率要求不高的应用中, 可以选择中等数值孔径的物镜来获得更大的视场和加工区域^[50]。

首先, DMD 系统可以被用于光场调制。香港中文大学的 Chen 团队设计的基于 DMD 的超高速脉冲整形器 (DMD-based ultrafast pulse shaper, DUPS) 可以调制频率高达 32 kHz 的激光光源, 具有任意的相位整形能力, 能量利用率达到 1.7%^[51]。该团队设计的基于 DMD 的超高速光束整形器 (DMD-based ultrafast beam shaper, DUBS) 则可以以 4.2 kHz 的频率产生分辨率为 1140 pixels×912 pixels 的任意光束模态, 并利用二值全息原理分别生成了艾里光、贝塞尔光、拉盖尔高斯光以及类似“和平鸽”的光束模态, 系统的能量利用效率达到了 4.7%^[52]。无论是在 DUPS 还是在 DUBS 中, 该团队均使用透射光栅和高反射率反射镜共同补偿 DMD 引入的角色散。DMD

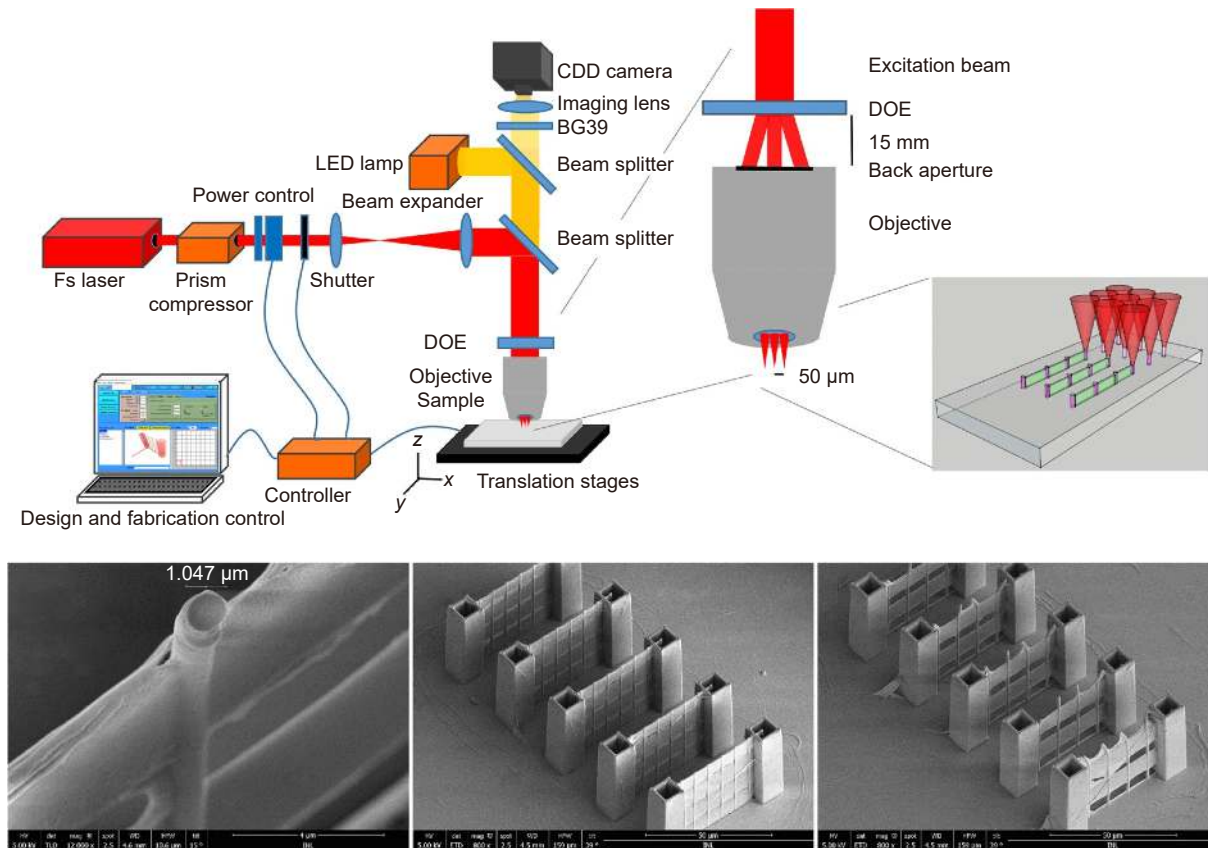
图3 基于DOE的飞秒激光加工示意图及加工效果^[49]

Fig. 3 Schematic diagram of the femtosecond laser fabrication based on diffractive optical elements and characteristics after processing^[49]. Figure reproduced with permission from ref. [49] © Springer Nature

还可以与数字全息技术相结合,在保证高分辨率的同时实现光振幅和相位的灵活调制^[53]。

基于DMD的飞秒激光加工具有高通量、高速度、高效率的特点,利用单脉冲即可实现复杂的图案化,在提高加工效率的同时,还可以保证加工结构波长级的分辨率^[54]。当飞秒激光DMD系统与时空聚焦、电沉积技术等相配合时^[55-56],可以高效且快速地打印任意形貌的金属三维微结构。将飞秒激光双光子聚合和时空聚焦相结合开发的数字微镜投影加工系统加工速度提高了三个数量级,横向分辨率也可达到175 nm^[57],如图4所示,此加工分辨率不逊于飞秒激光双光子直写。

然而,入射激光在DMD系统中的衍射造成了相当大的能量损失,因此在DMD系统中飞秒激光光源的功率都较高,而能量的利用率偏低。在之前的报道中,当波长为800 nm的入射光入射角度为57°,衍射角为33°,相当于 $m=+4$ 阶,此时该衍射级的能量约占衍射能量的75%,入射光能量的44%^[54]。

3.2.3 SLM

与DMD调整振幅的工作原理不同,SLM,如液晶空间光调制器(liquid crystal-spatial light modulator, LC-SLM),可以通过控制电场的大小进而改变液晶的旋转角度来调节入射光的相位,从而提高光能的利用率,LC-SLM与飞秒激光的结合是由日本德岛大学的研究人员首次提出的^[58]。

为了提高基于SLM的飞秒激光加工的效率 and 分辨率,全息算法和制造方法都进行了相应的改进,以产生能够加工所需图案的光场分布。中国科学技术大学的吴东团队就开发了一种优化的MRAF(mixed region amplitude freedom)算法,可以生成高质量的光场,在240 ms内利用单曝光加工出 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的微结构阵列^[59]。除此之外,还有一些其他的优化算法被提出,如增大全息图有效面积的EVA(effective viewing area)算法^[60],以及加快运算速度的PAS(phase-added stereograms)改进算法^[61]。

目前的SLM并行加工方法主要分为两种,一种

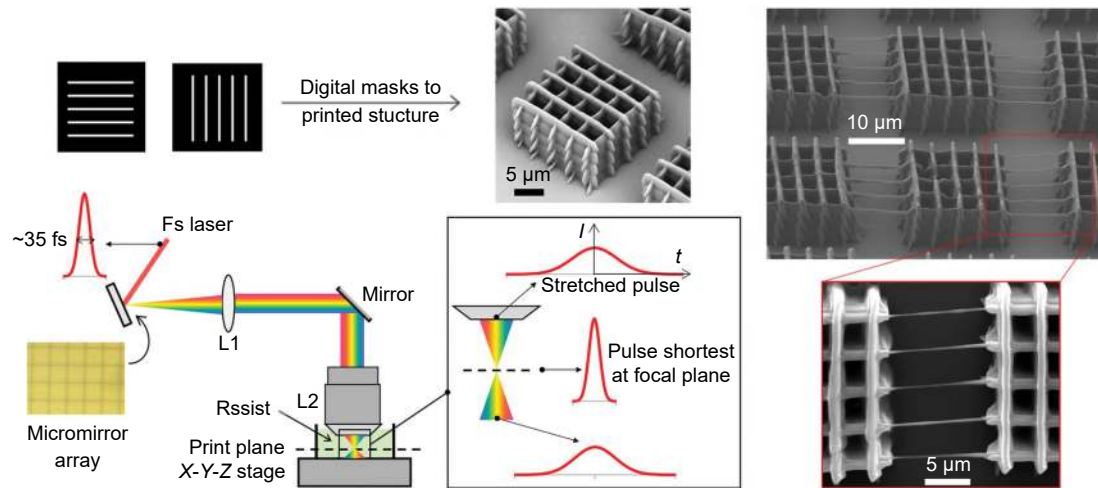


图 4 结合飞秒激光双光子聚合和时空聚焦的数字微镜投影加工系统示意图及加工效果^[57]

Fig. 4 The schematic diagram of the digital micromirror projection system based on femtosecond laser two-photon polymerization and spatio-temporal focusing and characteristics after processing^[57]. Figure reproduced with permission from ref. [57]

©The American Association for the Advancement of Science(AAAS)

为多焦点加工, 另一种为面曝光加工, 面曝光加工又分为横截面和轴向截面曝光加工。2016 年, 中国科学技术大学的吴东团队提出了一种基于 SLM 的飞秒激光多焦点并行扫描技术, 利用生成的 7 个并行焦点在微流道中高效加工出微型过滤器^[62]。2017 年, 该团队利用 SLM 实现了涡旋光束和平面波的同轴干涉光场分布, 通过面曝光加工出了三维手性微结构^[63-64], 并指出其手性由拓扑电荷决定, 此项技术可以被用于光镊、光通信以及超材料的快速制造。2019 年, 该团队利用 SLM 分别调制出飞秒环形涡旋光束和具有有序强度分布和多样化可控参数的 Mathieu 光束, 如图 5(a) 和 5(b) 所示, 从而加工出空心微螺旋结构^[65]和复杂的功能化微笼^[66]。2020 年, 该团队将飞秒激光单点扫描与横截面曝光相结合, 在微流道中加工出捕捉小球和细胞的微“陷阱”^[67]。2018~2020 年间, 该团队多次通过调制贝塞尔光束, 如图 5(c) 所示, 加工出具有高纵横比的微管用以实现特定功能^[68-70]。与上述的多焦点或者横截面曝光技术不同, 北京大学的李焱团队则开发出一种焦场调制 (focal field engineering, FFE) 方法, 即利用 GS 算法生成三维结构的轴向截面, 然后再进行简单的一维扫描, 利用此方法可以加工出表面连续的非涅尔微透镜^[71], 以及其他任意的三维结构, 如立体的字母展示、长城、玫瑰花等^[72], 如图 6 所示。

综上所述, 基于 DMD 或 SLM 的飞秒激光加工可以快速灵活地实现任意微结构的高效图案化加工,

同样地, 基于 DMD、SLM 或 DOE 的多焦点并行加工技术可以快速制备具有高度对称性的微结构。但是加工的结构尺寸较小, 主要集中在微米量级, 实用性不强。为此, 上海光机所的程亚团队利用双光子聚合结合时空同步聚焦技术使得在物镜焦点处激光脉冲的宽度最短、强度最高, 在尽可能保证分辨率 (10 μm~40 μm) 的情况下加工出了毫米级的狮形雕塑和厘米级的微型兵马俑结构^[73-74]。

3.3 激光干涉加工

飞秒激光干涉加工主要分为单脉冲干涉加工和多光束干涉加工。飞秒激光单脉冲干涉加工具有高效率、周期可控等优点, 是构建周期性功能微纳结构的有效工具, 被广泛应用于信息存储、生物医学和超材料等领域。日本东北大学的 Sato 和名古屋大学的 Saitoh 团队提出了一种利用单脉冲飞秒激光干涉制作电子相位全息图的方法, 利用这种相位全息图生成的电子涡旋光束一阶衍射效率超过了 19%^[75]。而为了在短时间内生成任意复杂的图案, 内布拉斯加大学林肯分校的陆永枫团队提出一种基于迈克耳逊干涉仪的飞秒激光单脉冲时空干涉的方法, 相位差分布由 SLM 控制, 干涉强度分布与相位全息图上的几何图形完全一致, 使得相位全息图的生成无需复杂的算法和耗时的计算^[76]。北京理工大学的李欣团队则利用飞秒激光单脉冲干涉冲压技术在 100 nm ZnO 薄膜上一步加工出周期为 5 μm 的精细光栅结构, 同时利用泵浦探针显微镜研究了光栅结构的时空演化^[77]。

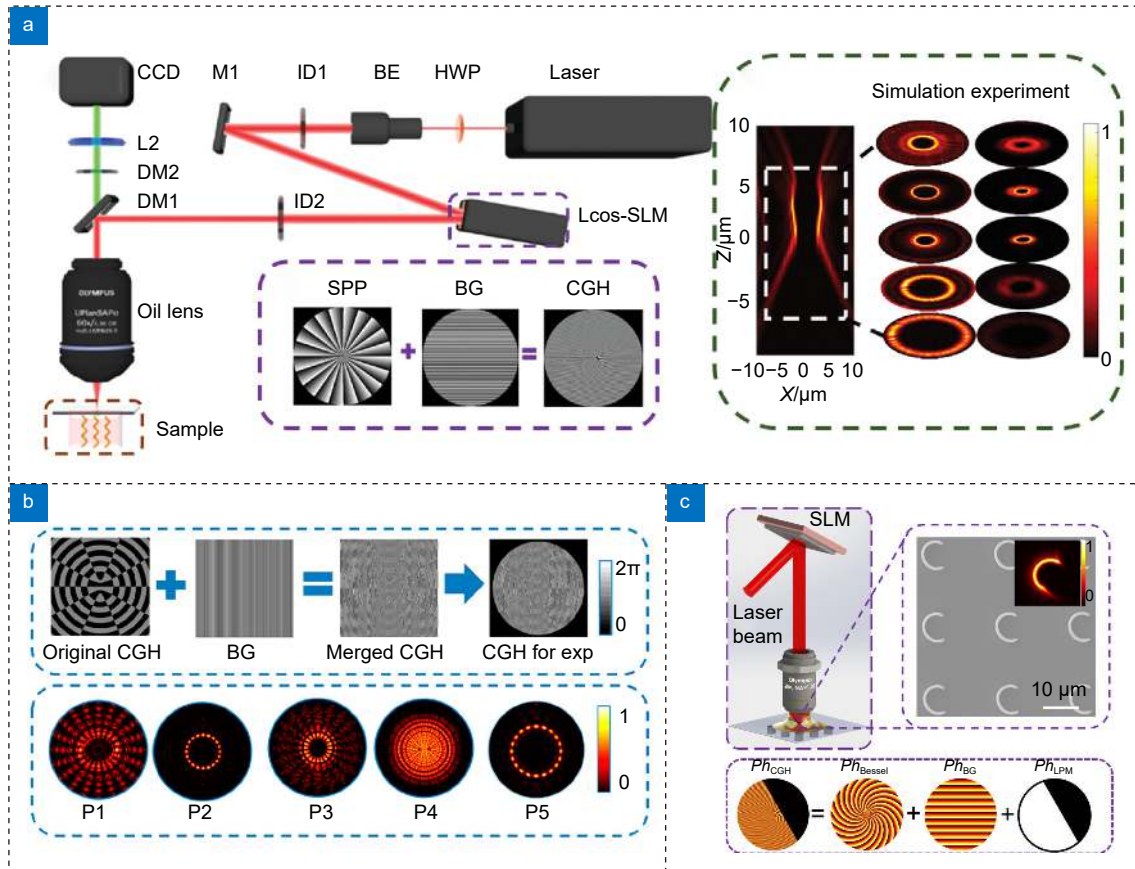


图5 利用 SLM 实现并行加工。(a) 利用 SLM 生成飞秒环形涡旋光束, 用于螺旋扫描加工^[65]; (b) 利用 SLM 生成飞秒 Mathieu 光束^[66]; (c) 利用 SLM 生成 C 形贝塞尔光束, 用于加工微型管道^[68]

Fig. 5 Parallel processing based on spatial light modulator. (a) Helical scanning of femtosecond ring-shaped vortex beam based on spatial light modulator^[65]; (b) Generation of Mathieu beam based on spatial light modulator^[66]; (c) Fabrication of microtubes using C-shaped Bessel beam generated by spatial light modulator^[68]. Figure reproduced with permission from: (a) ref. [65] © Wiley; (b) ref. [66] and (c) ref. [68] © American Chemical Society.

飞秒激光良好的相干性使其在多光束干涉微纳加工时也能具有足够的能量密度, 因此可以在硬质材料表面或透明材料内部直接刻蚀或改性, 加工大规模周期性微纳结构。通过调节激光能量、入射角、干涉光束数量、聚焦透镜焦距、曝光时间、激光波长等参数, 可以调节结构的周期、形态和尺寸。中国科学技术大学的吴东团队就利用分束镜实现了两束激光在金属片表面的干涉, 从而加工出周期性的沟槽结构, 并指出此种方法具有很强的灵活性, 可适用于广泛的材料, 如不锈钢、Ti、Ni、Cu、Fe、Zn 等^[78]。大阪大学的 Nakata 团队利用 DOE 生成了飞秒激光干涉加工光场, 接着通过金薄膜的 SLS (solid-liquid-solid) 转换机制在其表面制备出数十至数百纳米的圆度良好的金纳米颗粒, 如图 7 所示。研究人员可以精确控制薄膜厚度和激光能量来控制所获得的纳米颗粒尺寸, 最小的金纳

米颗粒平均半径为 82 nm^[79]。

4 微纳光学器件的飞秒激光加工

4.1 微透镜

微透镜阵列以其体积小、成本低、光学性能独特等优点, 在光学调制^[80-81]、光学传感、光学系统集成等领域发挥着不可替代的作用^[82]。基于飞秒激光的微透镜制造方法可分为三个主要分支: 减材制造、增材制造和激光间接加工。

为了利用飞秒激光在硬质材料上实现微透镜阵列的减材制造, 需要辅助技术来制作表面光滑、成像性能高的微透镜, 如转印^[83]、湿法蚀刻 (如 HF 溶液)^[84-85]、干法蚀刻 (如感应耦合等离子体^[86]), 分别如图 8(a)、8(b) 和 8(c) 所示, 以及退火工艺^[87-88] 等。飞秒激光减材制造已经可以在材料表面加工大规模的凹

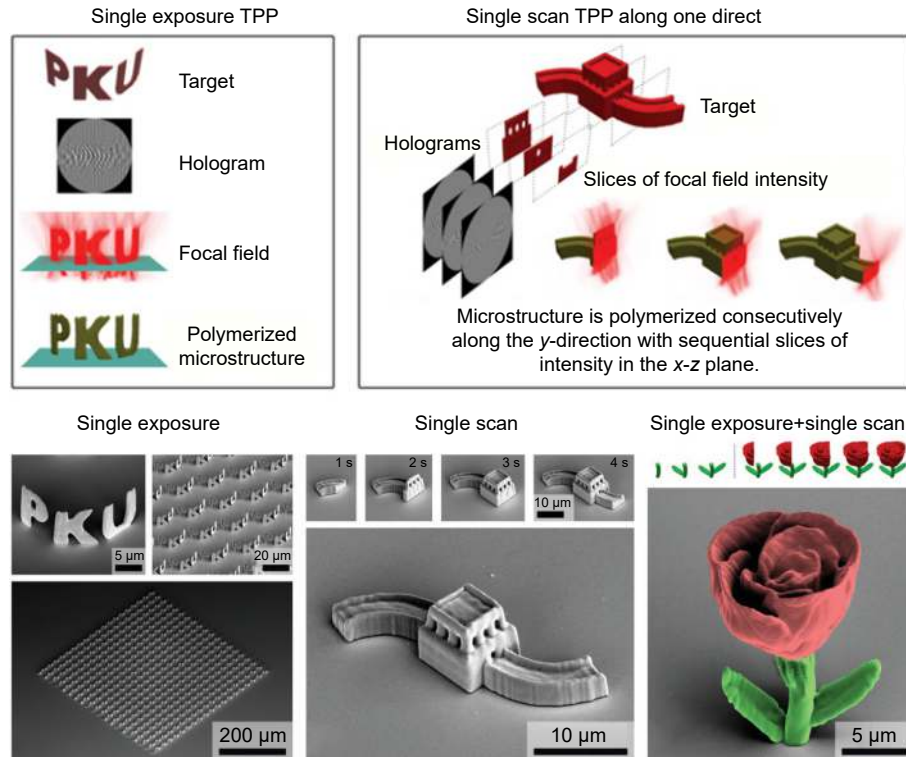
图 6 利用 SLM 进行焦场调制^[72]

Fig. 6 Focal field engineering based on spatial light modulator^[72]. Figure reproduced with permission from ref. [72] © John Wiley and Sons

面微透镜阵列^[85,89]、透镜-子透镜阵列^[90]、平凸柱面微透镜阵列^[91]以及具有复杂成像能力的大型蜻蜓人工复眼^[83]。飞秒激光直写结合热退火工艺可以在玻璃内部加工出表面粗糙度为 19 nm 的三维结构,利用此方法加工出的微透镜分辨率可以达到 5 μm^[88]。湿法刻蚀辅助飞秒激光直写结合退火工艺可以在玻璃表面加工出粗糙度约为 15 nm 的微透镜^[87]。类似地,干法刻蚀辅助飞秒激光直写可以实现低至数纳米的粗糙度^[86],飞秒激光直写结合热压印工艺甚至已经可以实现 2 nm 的粗糙度^[92]。

微透镜阵列的增材制造主要是通过飞秒激光双光子聚合实现的。基于双光子聚合制备的蛋白基仿生微透镜可以在外界刺激下实现焦距动态调节^[93],如图 9(a)所示,这种微透镜具有独特的可伸缩性以及良好的生物相容性和降解性^[94]。吉林大学的张永来团队模拟人眼可调谐的晶状体,利用飞秒激光直写技术制备了一种复合的刺激响应型复眼,如图 9(b)所示,其中主眼由 SU-8 加工而成,小眼由牛血清蛋白 (bovine serum albumin, BSA) 加工而成。BSA 在不同 pH 下会膨胀收缩,从而实现小眼视场和焦距的动态调谐^[25]。而为了提高激光加工的效率,北京大学的李焱团队利

用 SLM 进行焦场调制,一次性扫描出一个菲涅尔透镜^[71]。

减材与增材制造方法具有效率高、灵活、适用材料多等优点,但减材制造工艺复杂,需要集成其他前处理或后处理工艺来优化加工质量,增材制造由于加工范围小,距离实际应用还有很长的一段距离。激光间接加工微透镜则是一种创新的思路,如图 10(a)所示的利用某些复合表面在飞秒激光诱导下的热变形制作复杂的微透镜阵列,这种工艺为微透镜的大规模生产提供了一个廉价但有效的解决方案^[95]。基于同样的思路,研究人员利用飞秒激光直接在目标位置滴落具有高粘性的 UV 预聚体微液滴,如图 10(b)所示,利用微液滴的表面张力即可形成几何形状和尺寸可调的微透镜,固化后其表面粗糙度可以低至加工波长的 1/27^[96]。由此可知,激光间接加工虽然可以大规模且廉价地加工微透镜阵列,但却是以牺牲阵列的表面粗糙度为代价,因此在加工时需要在效率和加工质量之间做一个取舍。

目前可加工的微透镜形状是有限的,绝大多数为球面镜。尽管大多数球面微透镜阵列是通过各种表面加工方法制作的,但是如全封闭球形腔透镜^[97]这种

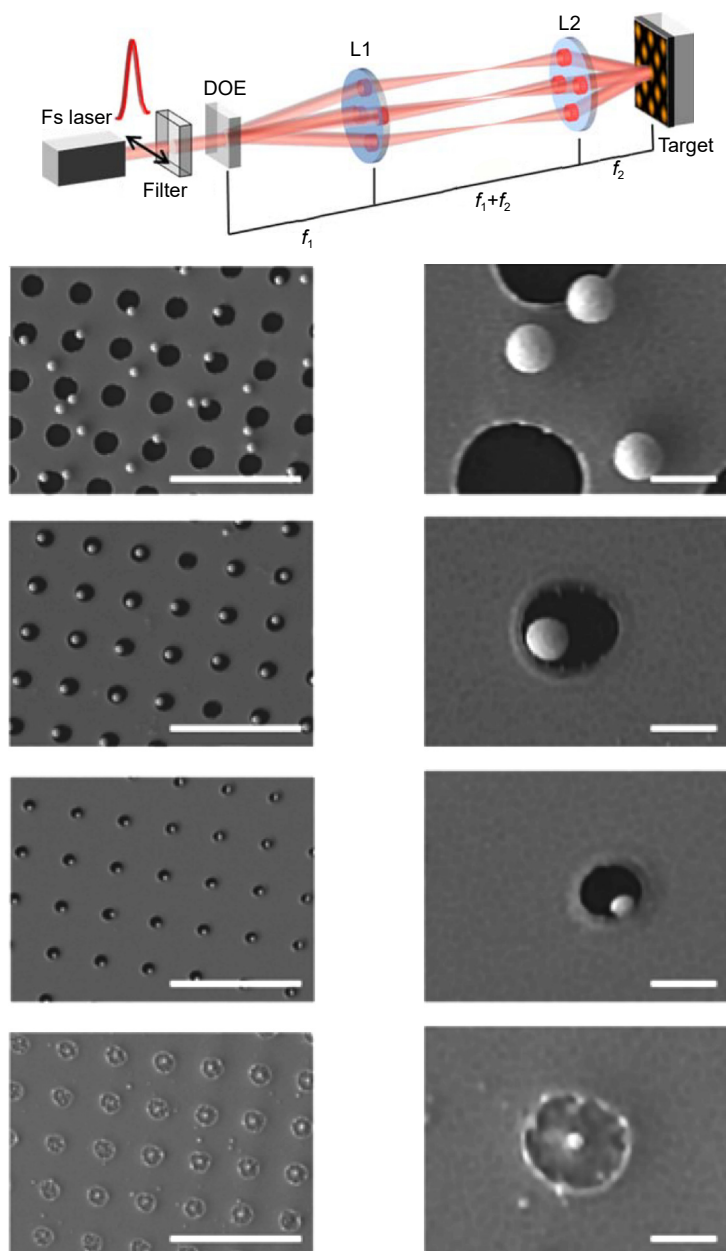
图 7 飞秒激光干涉加工示意图及加工效果^[79]

Fig. 7 Schematic diagram of the femtosecond (fs) laser interference processing and characteristics after processing^[79].

Figure reproduced with permission from ref. [79] © MDPI

具有超广角成像能力的光学器件却需要在透明材料内部加工, 此时只能采用飞秒激光这种非接触的加工手段。而且一般的后处理工艺, 如转印、干法刻蚀或湿法刻蚀都无法适用于内部加工, 只能采用如热退火这样的工艺来尽可能提高镜面的光滑度和成像水平^[88]。

微透镜主要应用于集成光学微系统中, 用于高质量成像。为了满足内窥镜、照明系统和微机器人等领域发展所带来的对光学器件性能和功能的越来越高的要求, 德国斯图加特大学的 Harald Giessen 团队利用

飞秒激光双光子聚合技术加工出超紧凑非球面多透镜物镜系统, 并将其集成在光纤上^[98], 同时还开发出一种“漏斗状”成像方法, 将一组 2×2 的复合透镜成像结果组合成一张高分辨率图像, 并集成到 CMOS 图像传感器上, 如图 10(c) 所示^[82]。

4.2 光波导

光波导是指由光透明介质 (如石英玻璃) 构成的传输光频电磁波的导行结构。光波导的传输原理是在不同折射率的介质分界面上, 光的全反射现象使光波局

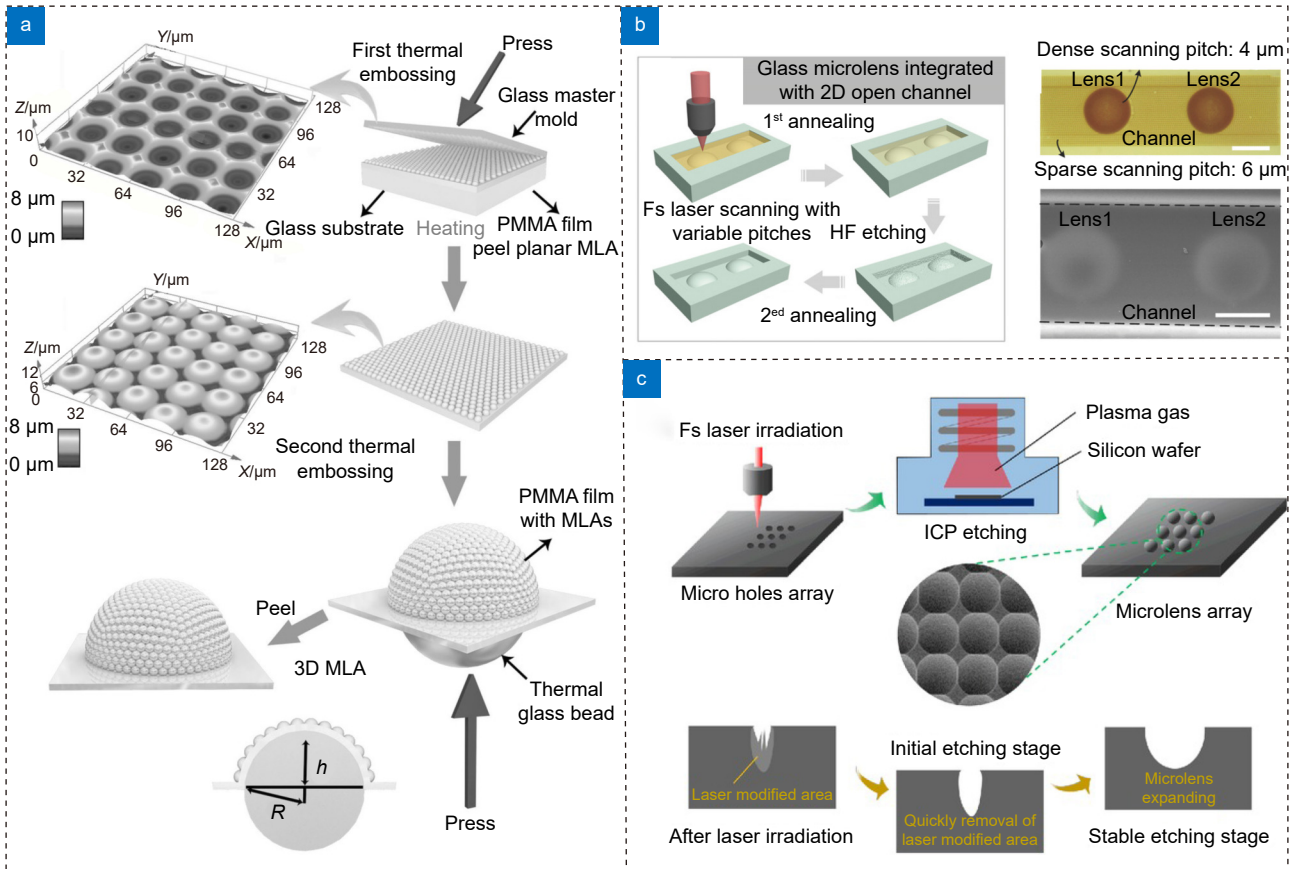


图 8 微透镜加工的不同工艺。(a) 转印^[83]; (b) 湿法刻蚀^[84]; (c) 干法刻蚀^[86]

Fig. 8 Processing of microlenses. (a) Transferring^[83]; (b) Wet etching^[84]; (c) Dry etching^[86].

Figure reproduced with permission from: (a) ref. [83], (b) ref. [84] and (c) ref. [86] © Wiley

限在波导及其周围有限区域内传播。目前的飞秒激光波导加工对于材料的依赖性很强, 且主要是在透明材料中通过飞秒激光直写实现, 如 Nd:YAG (掺钕钇铝石榴石)、LiNbO₃ (铌酸锂)、BGO (Bi₄Ge₃O₁₂, 锗酸铋) 等。

根据激光的脉冲能量是否超过目标材料的光损伤阈值, 可以将聚焦飞秒激光引起的材料结构变化分为两类。当激光强度低于光损伤阈值时, 即所谓的弱损伤区 (Type-I 改性), 焦点处会形成平滑的折射率变化。而高能量的飞秒激光脉冲会对材料造成严重的损伤 (Type-II 改性), 形成局部缺陷和材料晶格的局部重新组合。折射率如何变化取决于其物理机制, 亦即受激光加工条件 (焦点形貌、脉冲能量、频率、脉冲宽度等) 和目标材料的物理性质 (带隙、色散、电离率、热导率等) 的影响。一般情况下, 飞秒激光 Type-I 改性在焦点处导致的折射率变化要小于 Type-II 改性^[99]。而根据波导的形貌分类, 目前常见的波导可以分为类似“隧道”的单线波导, 应力场诱导的双线波导, 以

及类似纤维的包层波导结构^[99]。

在单线波导结构中, 聚焦的飞秒激光将引起焦点处折射率的增加, 而且单线波导的结构极其简单^[100], 如图 11(a) 所示, 这些特性使得研究人员可以直接加工灵活的三维导向结构, 方便地构建无源器件, 如分束器^[101]、定向耦合器和波导阵列^[102]、光栅等。山东大学的陈峰团队利用飞秒激光在 LiNbO₃ 晶体中制作波导分束器, 分别制造出一维的单线波导, 二维的 1×2 分束器和三维的 1×4 分束器^[101]。该团队还利用飞秒激光的多重扫描在 LiNbO₃ 晶体中加工出多行单线波导, 通过调节波导的间距, 加工的能量以及扫描的速度来实现入射光的模式调节^[102], 上述两种结构均要求入射光为 TM 偏振。尽管拥有上述所提到的一系列优点, 但是单线波导也存在着严重的缺陷, 如单线波导存在着严重的偏振依赖。虽然 BGO 波导对于偏振方向没有要求, 但 Nd:YAG 和 LiNbO₃ 波导只支持特定偏振方向的光的传播^[103-104]。其次还有性能退化, 热稳定性差等问题, 在 150 °C 下 LiNbO₃ 波导的稳定

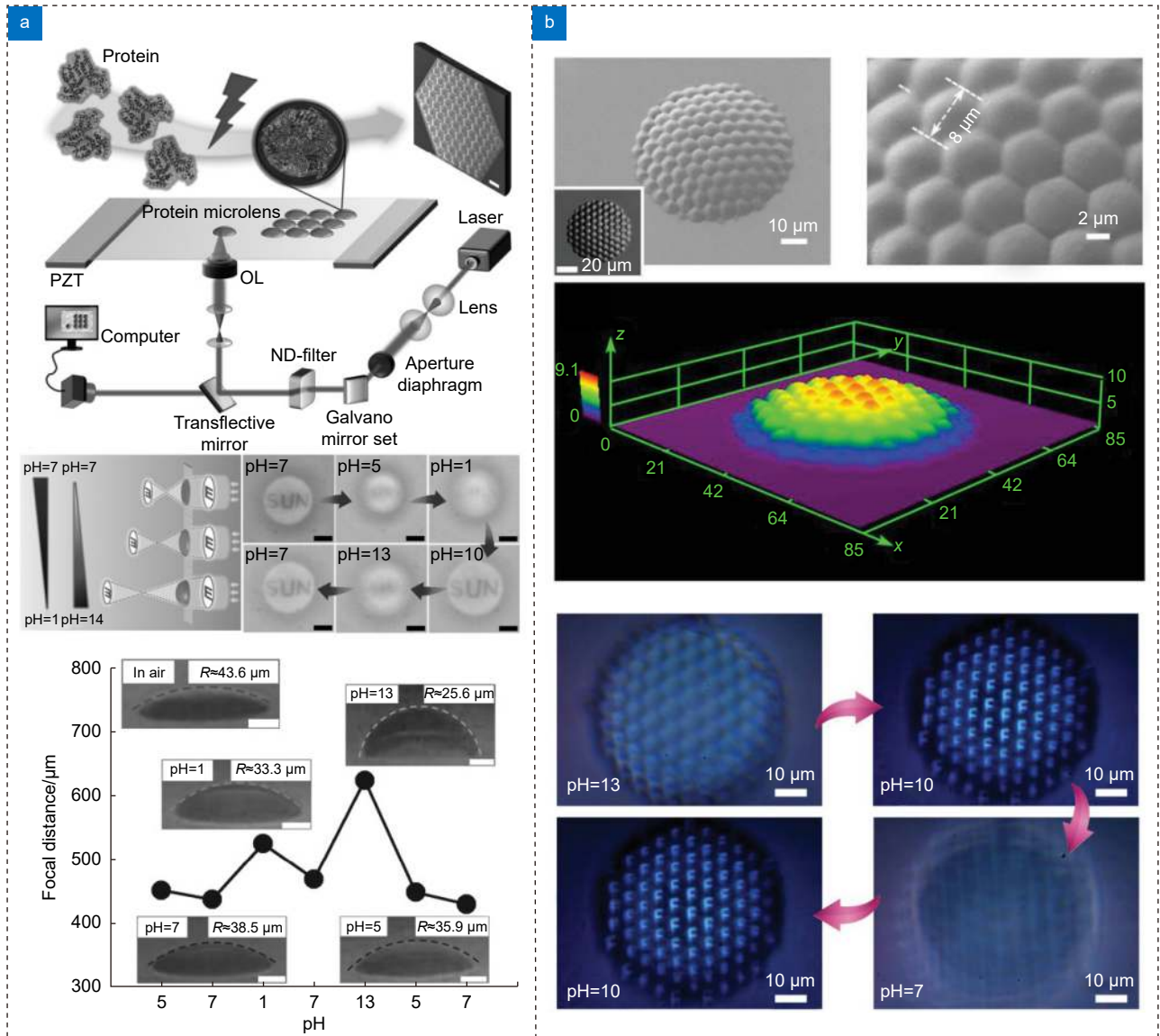


图9 飞秒激光双光子聚合加工微透镜。

(a) 酸碱响应的蛋白基微透镜^[93]; (b) 酸碱响应的双材料复眼结构^[25]

Fig. 9 Micromachining of microlenses based on two-photon polymerization of femtosecond laser.

(a) Protein-based microlens in response to the change of pH^[93]; (b) Double-material compound eye in response to the change of pH^[25]. Figure reproduced with permission from: (a) ref. [93] and (b) ref. [25] © Wiley

性便会显著下降, 即便是在室温下其导光能力也会随时间出现衰减^[105]。

对于双线波导, 飞秒激光在焦点处引起局域晶格膨胀, 从而导致折射率的降低, 使得两条激光轨迹(间隔为 10 μm~20 μm^[106])的中间区域具有相对较高的折射率, 如图 11(b) 所示。与单线波导相比, 双线波导在晶体材料中具有更为广泛的适用性和更加优异的热稳定性。由于双线波导的工作区域位于加工区域之外^[105], 因此它能够充分保留原材料的非线性特性。德国汉堡大学的 Huber 团队利用飞秒激光直写结合选

择性化学刻蚀在 Nd:YAG 中加工出双线波导, 并以 808 nm 波长激光为泵浦源, 实现了波长为 1064 nm 的激光输出, 斜率效率为 23%^[104]。该团队还利用飞秒激光直接刻蚀的方法在 Nd:YAG 中加工出分束器, 通过调节耦合条件可以实现分束比例的动态调节, 波导的斜率效率达到 52%^[107]。然而, 也正是由于双线波导的波芯不在飞秒激光加工区域, 因此在制作三维的双线波导时, 通常需要对双线波导的几何结构进行特殊设计, 这很容易导致波导工作区域的粗糙度升高, 增大散射损失^[99]。

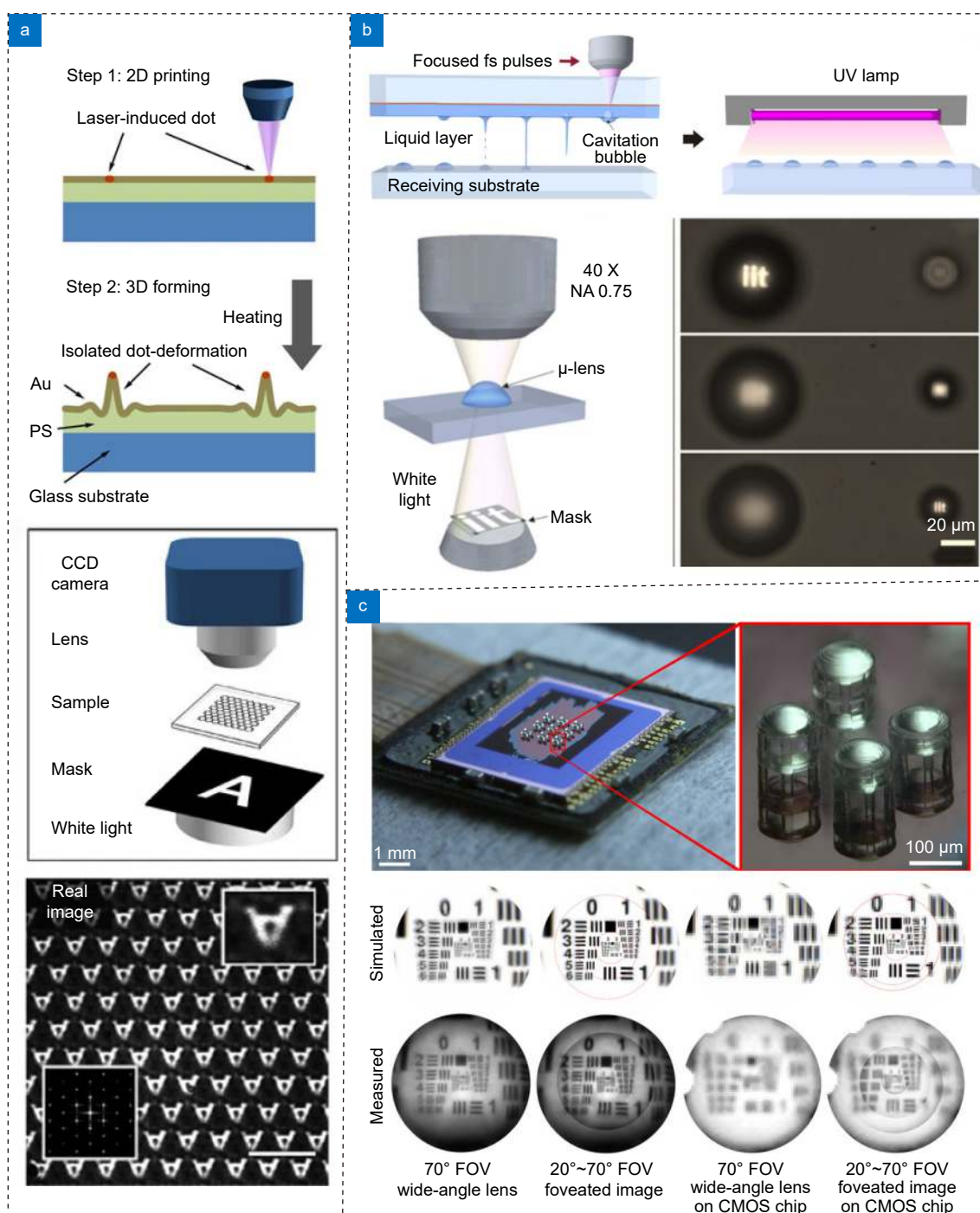


图 10 新型微透镜。

(a) 激光诱导热变形加工复杂微透镜阵列^[95];(b) 飞秒激光结合液滴的表面张力直接打印聚合物微透镜^[96];(c) 利用飞秒激光在 CMOS 图像传感器表面集成复合微透镜^[82]

Fig. 10 Innovative microlenses.

(a) Complex microlens arrays based on laser-induced thermal deformation^[95]; (b) Direct patterning of polymeric microlenses based on the combination of femtosecond laser and surface tension of droplet^[96]; (c) Integration of compound lens on the surface of CMOS image sensor based on femtosecond laser^[82]. Figure reproduced with permission from: (a) ref. [95] © Springer Nature; (b) ref. [96] © American Chemical Society; (c) ref. [82] © The American Association for the Advancement of Science (AAAS)

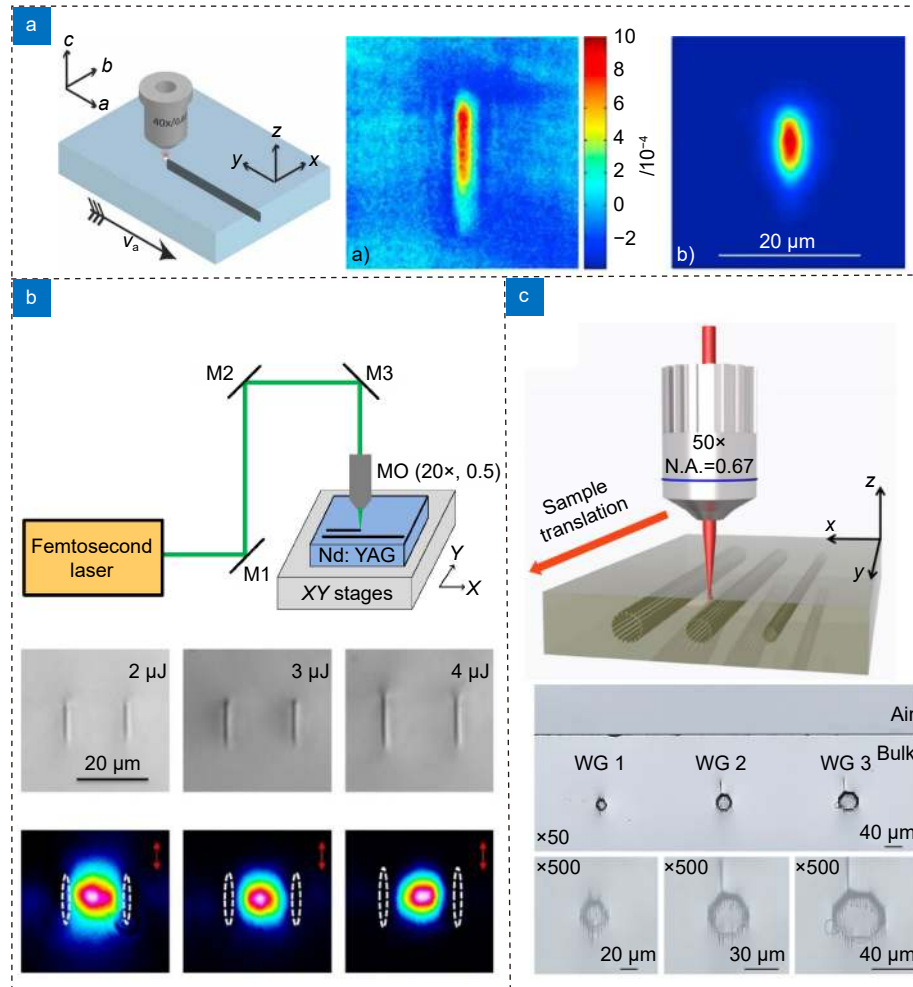


图 11 飞秒激光直写加工光波导。

(a) 单线波导^[100]; (b) 双线波导^[106]; (c) 包层波导^[111]Fig. 11 Femtosecond laser direct writing optical waveguide. (a) Single-line waveguide^[100]; (b) Double-line waveguide^[106]; (c) Depressed cladding waveguide^[111].

Figure reproduced with permission from: (a) ref. [100] and (c) ref. [111] © Wiley; (b) ref. [106] © MDPI.

包层波导由一个波芯和许多包围它的低折射率激光光迹组成, 其直径一般在 $30\ \mu\text{m}$ ~ $150\ \mu\text{m}$ 之间。激光光迹彼此接近, 约相距 $3\ \mu\text{m}$ ~ $4\ \mu\text{m}$ ^[105], 构成准连续的低折射率势垒, 提供所需的光学约束。理论上, 波导的截面可以灵活地布置, 但在实际应用中, 圆形更适用于光纤^[99]。包层波导波芯灵活的直径使得波导可以工作在从单模到多模, 从可见光到红外光的范围内。在三维上, 圆形截面包层波导的形状类似于导向管, 原则上可以与商用光纤精细连接, 构建光纤-波导-光纤集成光子系统^[105]。山东大学的陈峰团队就先后在 BGO^[108]、LiNbO₃^[109]、Nd:YAG^[12]、Nd:YVO₄(掺钕钒酸钇)^[110] 以及 KTA (KTiOAsO₄, 砷酸氧钛钾)^[111] 等晶体材料中加工出包层波导, 如图 11(c) 所示。在使用 1064 nm 脉冲激光表征时, KTA 中加工的包层波导的

最小传输损耗为 $(2.39 \pm 0.24)\ \text{dB cm}^{-1}$, 二次谐波转化率最高可达 13.67%, 这类结构可以被应用在远程通信、低损耗片上非线性光学系统以及微型激光等诸多方面。

尽管如此, 波导加工对于材料的依赖性依然太强, 尽管有一些已经使用十分成熟的材料, 如 LiNbO₃, 在其中加工波导还面临着很多挑战, 如在严格聚焦其高折射率所带来的球差, 其高非线性所带来的自聚焦、高吸收以及丝状结构^[100] 等, 因此, 距离波导在大规模光子器件中的实际应用还需要付出更多的努力。

4.3 微纳光栅

飞秒激光微纳加工被广泛应用在光栅加工中, 主要有基于飞秒激光的光纤布拉格光栅 (fiber Bragg

grating, FBG) 加工、金属、半导体材料表面的光栅加工、以及介质材料表面或内部的光栅加工。

目前, 研究人员已经可以利用飞秒激光相位掩模技术和熔接技术实现相移 FBG^[112-113], 利用飞秒激光过曝光技术加工负折射率 FBG^[114] 和高双折射 FBG^[115]。深圳大学王义平团队利用飞秒激光线扫描技术加工出编码 FBG 阵列作为光纤标签, 可以通过测量反向散射信号来解码信息^[116]。该团队还利用飞秒激光直接

在聚合物中打印出纳米 FBG, 如图 12(a) 所示^[117], 并将其作为一种新型的光纤集成全光调制器, 该器件具有 176 ns 的快速响应时间和 45.43 pm/mW 的优异线性调制能力。由于自身所具有的优异的温度稳定性, FBG 可以被用于恶劣环境中的多参数传感监测, 如电厂、航空航天涡轮等高电离辐射环境, 以及含能材料的冲击波检测^[118]。吉林大学的孙洪波团队就利用飞秒激光线扫描的方式制备了蓝宝石光纤布拉格光

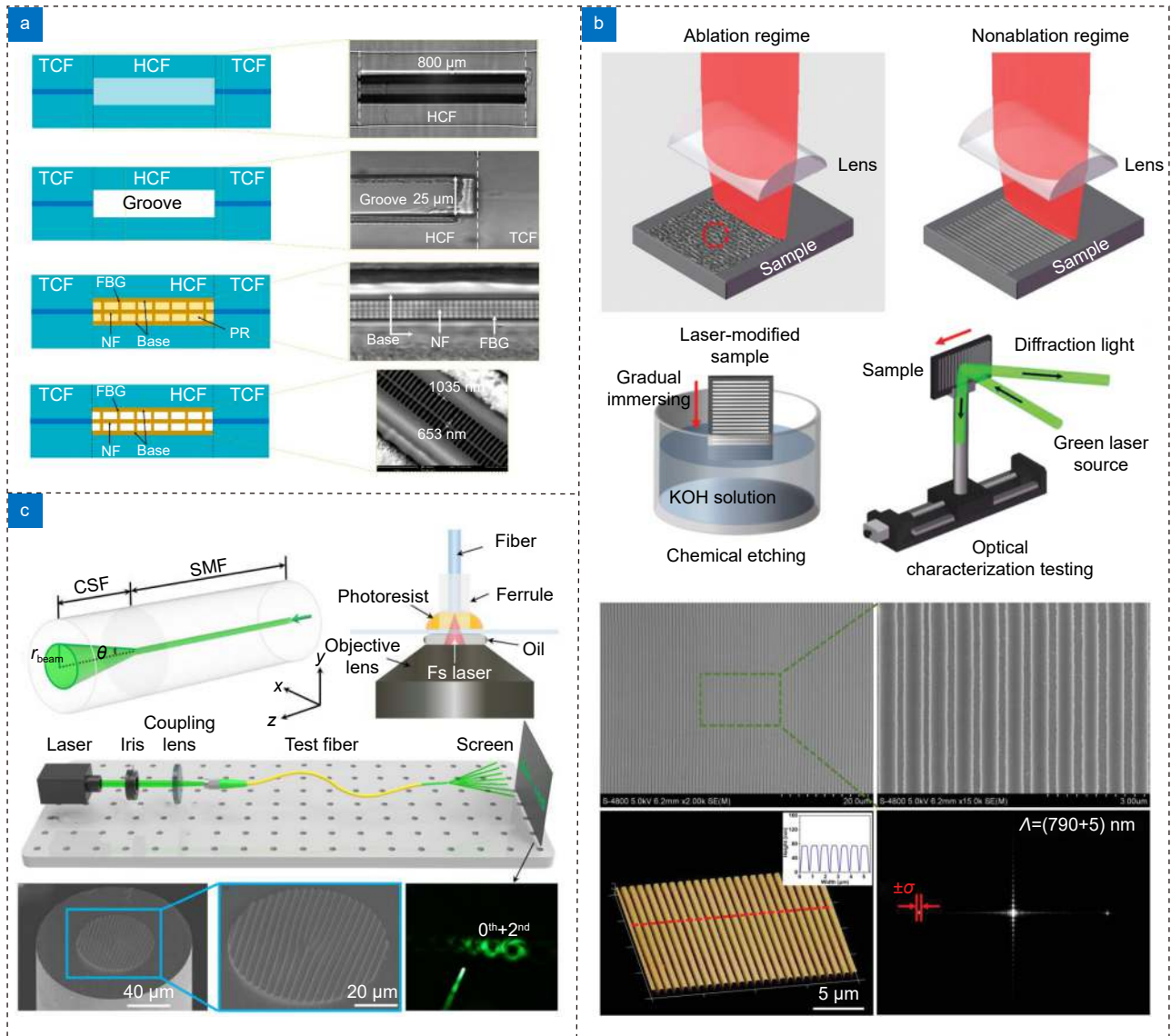


图 12 飞秒激光微纳光栅加工。

- (a) 飞秒激光加工 FBG 工艺流程^[117]; (b) 飞秒激光利用柱透镜在硅基底上加工 LIPSS^[129];
(c) 飞秒激光双光子聚合加工连续相位涡旋光栅^[22]

Fig. 12 Fabrication of micro-gratings based on femtosecond laser.

(a) Procedures of femtosecond laser fabricating FBG^[117]; (b) Fabrication of LIPSS on Si substrate utilizing cylindrical lens based on femtosecond laser^[129]; (c) Fabrication of continuous phase vortex grating based on two-photon polymerization of femtosecond laser^[22]. Figure reproduced with permission from: (a) ref. [117] © American

Chemical Society; (b) ref. [129] © Wiley; (c) ref. [22] © AIP Publishing

栅 (sapphire fiber Bragg grating, SFBG), 且测得 SFBG 从 1000 °C 到 1600 °C 下的温度敏感性为 34.96 pm/°C, 而 SFBG 的应变敏感性在 26 °C、500 °C、1000 °C、1600 °C 下分别为 1.42 pm/μ ϵ 、1.42 pm/μ ϵ 、1.44 pm/μ ϵ 、1.45 pm/μ ϵ , 受温度的影响很小, 这表明 SFBG 能够在恶劣环境下实现稳定可靠的温度压力传感^[119]。

采用飞秒激光直写技术可以灵活地制作各种尺寸和形状的光栅, 如在石英玻璃内部嵌入纳米光栅作为偏振依赖光衰减器^[120]。但是飞秒激光直写加工大面积周期性结构效率很低, 利用飞秒激光干涉在硬质材料表面或者内部高效加工微纳光栅则是一种简单而有效的方法。中国科学技术大学的吴东团队利用聚焦激光干涉的方法来保证加工时的能量密度, 从而高效率地在金属表面加工出周期性的光栅结构, 且光栅本身的衍射效应和单向形貌分别赋予了结构鲜艳的结构色和各向异性的润湿性^[78]。

虽然飞秒激光干涉加工光栅的加工效率高, 加工面积大, 但是其分辨率相对较低 (~1 μm), 且易出现加工不均匀的问题^[50]。针对此问题, 近年来出现了一种新的无掩模、高分辨的加工方法, 即激光诱导周期表面结构 (laser-induced periodic surface structures, LIPSS)。这种结构的周期从数百纳米到几微米不等, 很容易一次成型, 并且其周期可以通过控制激光加工参数来调节^[121]。到目前为止, 已经在多种材料上开展了对于 LIPSS 产生机制的研究工作, 包括金属^[122-123]和玻璃^[124-125], 通过工艺参数^[126]和样品前处理工艺^[127]的优化可以改善周期性波纹的形貌。俄罗斯科学院的研究人员利用飞秒激光直接令非晶硅相变产生纳米晶体硅, 在固定的脉冲能量下通过改变扫描速度可以使得晶体的表面形态变为均匀的光栅结构, 从而调节 LIPSS 表面的光学特性, 使其在可见光范围内实现抗反射或部分透射的性能, 并利用此表面结构制作了一种表面增强荧光传感器^[128]。飞秒激光直写改性与化学蚀刻的结合还可以进一步提高 LIPSS 的均匀性, 化学蚀刻使得结构的形态更加可控, 如图 12(b) 所示, 入射光的衍射效率可也以灵活调节, 且与刻蚀时间呈近线性关系^[129]。

飞秒激光双光子聚合也是一种加工微纳光栅的有效手段, 中国科学技术大学吴东团队利用飞秒激光双光子聚合加工出一种连续相位涡旋光栅, 并将其集成在光纤端面上^[22], 如图 12(c) 所示。该团队还分别加工出达曼光栅, 作为分束器和相干信号发生器^[130],

以及连续立方相位板用以产生彩色艾里光^[131]。除此之外, 研究人员还开发出一系列创新的微纳光栅加工方法和机制, 如通过飞秒激光诱导光还原 PEGDA 水凝胶中的银离子制备的可收缩银衍射光栅^[132]和通过激光诱导自组装制备的纳米光栅^[133]。为了满足各种复杂应用的需要, 越来越多的微纳光栅需要采用两种或两种以上的微纳加工工艺。

4.4 光子晶体

光子晶体是在 1987 年由 John 和 Yablonovitch 分别独立提出, 是由不同折射率的介质周期性排列而成的人工微结构^[134-135]。光子晶体特殊的三维介电结构会产生光子禁带来阻止特定频率电磁波的传播, 这种独特的性质与半导体极其类似。目前, 光子晶体已经被广泛地应用在集成光子技术、光波导^[136]、通信^[137]、量子点激光^[138]和化学传感^[139]等领域。飞秒激光器以其高精度、高效率、真三维、无污染等优点, 被广泛地应用于光子晶体加工。

早在 1999 年, 日本德岛大学的 Matsuo 和 Misawa 团队就利用飞秒激光双光子聚合在 Nopocure 800 光刻胶中加工出了“木堆”结构的三维光子晶体, 并且在红外波段观察到了显著的光子带隙^[140]。此后, 研究人员又分别利用 SCR500^[141]、S-3^[142]、以及 SU-8^[143]等光刻胶实现了各自的“木堆”结构红外光子晶体, 并发现了更高阶带隙的存在, 意识到了红外光子晶体在远程通信和传感监测方面的应用前景^[144]。澳大利亚斯文本科技大学的顾敏团队就将飞秒激光直写的红外光子晶体集成到微流道中, 流体折射率的变化会导致带隙的偏移, 该方法测得的折射率灵敏度可达到 6×10^{-3} ^[145]。

近年来, 人们对飞秒激光加工光子晶体进行了更加深入的研究。飞秒激光多光子聚合产生的光子晶体的光子带隙已经从中近红外扩展到可见光。2014 年日本静岡大学的 Mizeikis 团队利用飞秒激光双光子聚合在 SZ2080 光刻胶中加工出具有结构色的“木堆”结构三维光子晶体, 并指出结构色的产生是由于光子晶体的高阶带隙落在了可见光波段, 但是其光子带隙的基带仍然在红外波段, 将基带移动到可见光波段对于飞秒激光双光子聚合的分辨率是一个很大的挑战^[13]。而新加坡科技设计大学的 Yang 团队利用飞秒激光双光子聚合技术结合热致收缩的方法, 先打印出光子禁带位于红外波段的木堆结构光子晶体, 再将其加热到 450 °C, 通过控制加热时间来控制收缩的比例, 使得光子禁带移动到可见光波段^[146], 如图 13 所示。除

了木堆结构的光子晶体, 研究人员还利用飞秒激光加工出螺旋结构^[147]、以及反蛋白石结构的光子晶体^[148]等。Yang 团队就结合飞秒激光双光子聚合和自组装工艺加工出有层次的彩色反蛋白石微观结构, 通过控制结构的高度来实现图案的复用^[148]。

总体来说, 具有可见光带隙的三维光子晶体在直接打印具有金属光泽、耐光性、低毒性和持久性的结构色方面具有重大意义, 而且上述加工手段有望将光谱选择性器件(如基于光子晶体的滤色器)直接集成到任意形状的光学元件和曲面上。但是目前的工艺较为复杂, 且加工的自由度受限, 不同批次产品的加工一致性也难以保证, 更加可行的方法是利用超分辨技术来进一步提高飞秒激光双光子聚合的分辨率, 从而实现“木堆”结构的一次成形。

除此之外, 飞秒激光还可以实现非线性光子晶体

的加工。近年来, 为了满足超快信号处理、太赫兹技术等应用对非线性混频过程中高效率频率转换的要求, 非线性光子晶体被用来进行三维空间的相位匹配。南京大学肖敏、祝世宁团队联合中国科学技术大学吴东团队利用飞秒激光选择性擦除技术制备了三维 LiNbO_3 非线性光子晶体^[149], 可以有效产生二次谐波涡旋光束和厄米高斯光束, 同时满足非线性波前整形和准相位匹配的要求, 与传统二维光子晶体相比, 转换效率更是提高了两个数量级^[150], 如图 14(a) 所示。澳大利亚国立大学的 Sheng 和 Krolkowski 团队则利用一种超快光诱导铁电畴反转的方法分别在 CBN ($\text{Ca}_{0.28}\text{Ba}_{0.72}\text{Nb}_2\text{O}_6$, 铌酸钙钡)^[151] 和 BCT ($\text{Ba}_{0.77}\text{Ca}_{0.23}\text{TiO}_3$, 钛酸钙钡)^[152] 材料中加工出三维非线性光子晶体用于波前整形和具有全空间自由度的相位失配补偿, 如图 14(b) 所示。

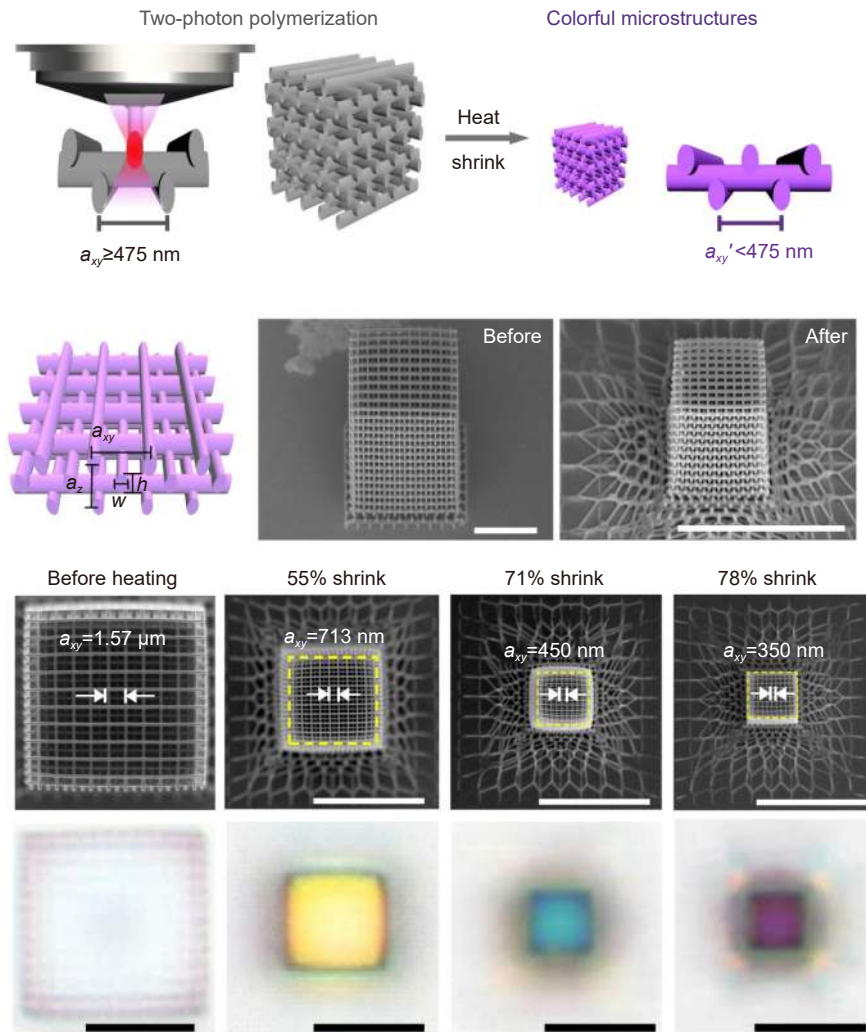


图 13 飞秒激光加工可见光波段的“木堆”结构光子晶体^[146]

Fig. 13 Fabrication of woodpile photonic crystal whose stop band lies in the visible spectrum based on femtosecond laser^[146]. Figure reproduced with permission from ref. [146] © Springer Nature

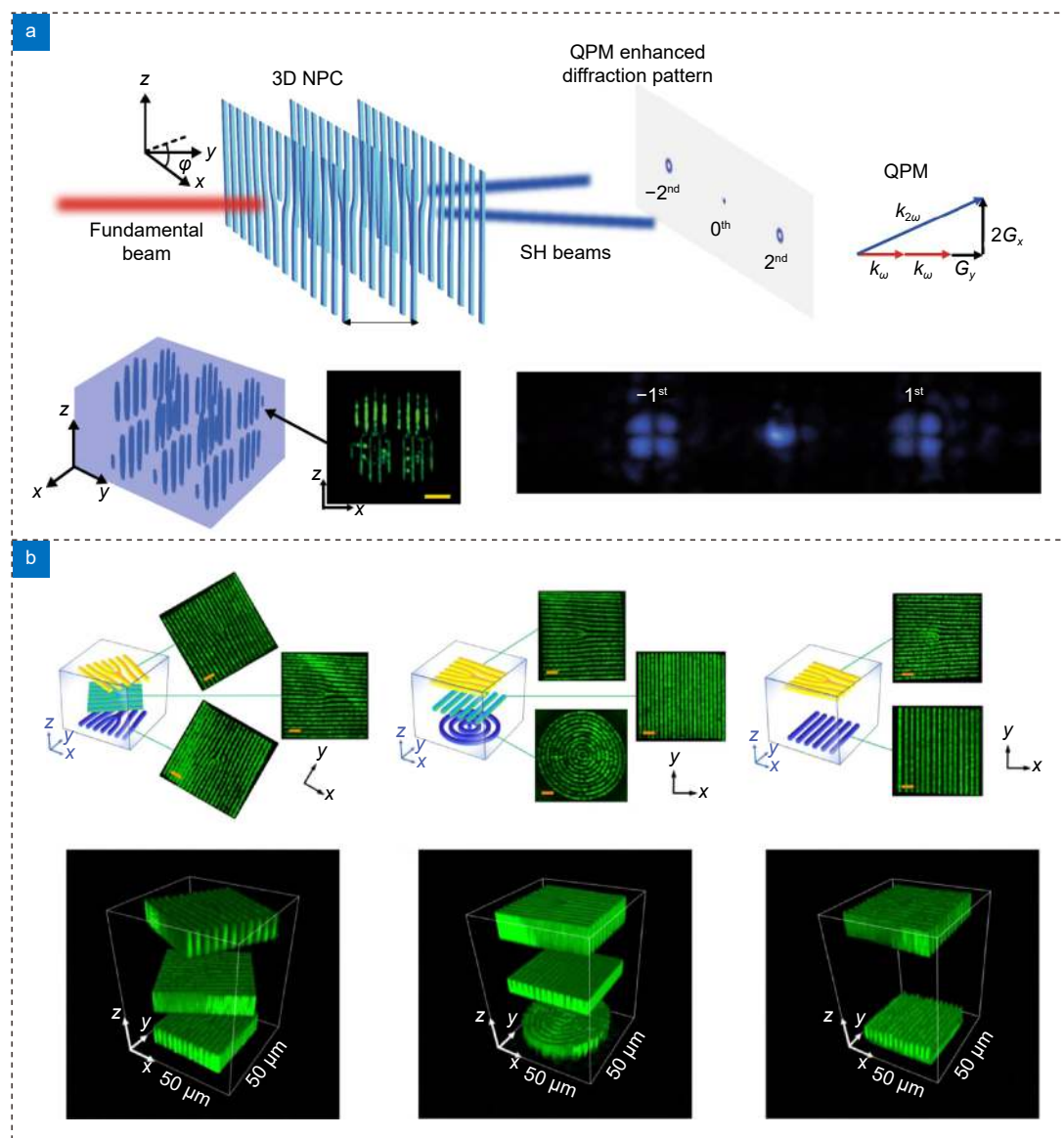


图 14 飞秒激光加工非线性光子晶体。

(a) 在 LiNbO_3 中加工非线性光子晶体^[150]; (b) 在 BCT 中加工非线性光子晶体^[151]

Fig. 14 Fabrication of nonlinear photonic crystal based on femtosecond laser.

(a) Fabrication of nonlinear photonic crystal in LiNbO_3 ^[150]; (b) Fabrication of nonlinear photonic crystal in BCT^[151].

Figure reproduced with permission from: (a) ref. [150] and (b) ref. [151] © Springer Nature

5 展 望

飞秒激光与材料之间的非线性相互作用与材料特性无关^[50], 这使得飞秒激光在微纳加工方面具有得天独厚的优势, 可以在多种材料表面或内部加工纳米级精度的微光学器件。尽管如此, 飞秒激光微纳光学器件加工仍存在如下研究不足:

第一, 飞秒激光加工技术与时空聚焦、超分辨技术的结合使得加工分辨率获得了进一步的提高。而与基于 DMD、SLM 和 DOE 的多焦点并行加工技术、

基于 DMD 和 SLM 的面曝光技术的结合, 则极大地提高了飞秒激光加工的效率。目前为止, 时空聚焦已经与基于 DMD 的面曝光技术成功融合^[57], 可以有效地调节加工分辨率, 但是超分辨技术目前处于探索阶段, 其与多焦点并行加工技术的融合还是一个很大的挑战。

第二, 目前光学器件的加工主要是通过飞秒激光直写实现的, 并行加工的工艺还仅仅是停留在理论以及效果的展示上, 离被广泛地用于光学器件加工还有很多工艺上的困难需要克服, 如加工效率的提高带来

了加工质量的下降, 而光学器件对于加工精度的要求极高。并行加工的另一个问题是加工自由度受限, 如多焦点加工同一结构时, 存在不同加工模块之间的拼接, 但是在加工过程中研究人员却不能够灵活地调节各个焦点之间的相对位置, 这时就会引入拼接误差, 结合部容易产生缺陷。当然这种拼接误差在加工小尺寸结构时影响不大, 但是随着加工结构尺寸的增大, 这种误差会出现累积。

第三, 目前飞秒激光加工光学器件多为原位加工, 一次性加工成型, 这是因为飞秒激光加工的结构尺寸太小。如果引入多道工序, 势必会引入装配误差(微米级), 而此装配误差对于高精度的光学系统来说一般是不可接受的。而若要将飞秒激光实际地应用于工业生产中, 则势必需要避免这种误差, 如可通过并行加工系统来实现, 但是这又将限制加工的灵活性。更加有效的方法是将这种装配误差减小到可接受的范围内, 而这方面的研究很少被报道。这极大地限制了飞秒激光加工的光学器件的集成性以及大规模实际应用的可能性。

第四, 随着光学器件逐渐小型化、集成化的趋势, 飞秒激光加工光学器件具有广阔的发展前景。飞秒激光可以与各种化学刻蚀、后处理技术相结合, 在玻璃中加工微透镜、波导和光栅。此外, 飞秒激光还可以对金属材料表面进行光学改性, 在光纤端面集成微透镜、相位板, 在晶体材料中加工非线性光子晶体, 或直接制备光子晶体光纤等等。然而, 将这些器件集成到微光学系统, 如光子芯片中, 却仍然面临许多问题, 如实现各种光学器件在同一基底上的封装, 避免不同光学器件之间的串扰, 以及光电信号的高效转换等。

此外, 虽然已经对飞秒激光加工光学器件的应用进行了一定的探索, 但是相关的研究依然不够系统, 不成体系, 很多理论模型还亟需进一步修正。为了在物理化学、生物传感以及微机械、微电子等领域充分发挥飞秒激光的应用潜力, 还需要进一步的理论创新及工艺优化。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Maruo S, Nakamura O, Kawata S. Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(2): 132–134.
- [2] Yang J J. Femtosecond laser “cold” micro-machining and its advanced applications (II) [J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2004, **41**(4): 39–47.
- [3] 杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(续)[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(4): 39–47.
- [3] Cao Y Y, Gan Z S, Jia B H, et al. High-photosensitive resin for super-resolution direct-laser-writing based on photoinhibited polymerization[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(20): 19486–19494.
- [4] Gan Z S, Cao Y Y, Evans R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size[J]. *Nat Commun*, 2013, **4**(1): 2061.
- [5] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Appl Phys A*, 1996, **63**(2): 109–115.
- [6] Sugioka K, Cheng Y. Femtosecond laser three-dimensional micro-and nanofabrication[J]. *Appl Phys Rev*, 2014, **1**(4): 041303.
- [7] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(21): 1729–1731.
- [8] Glezer E N, Milosavljevic M, Huang L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(24): 2023–2025.
- [9] Miyamoto I, Horn A, Gottmann J, et al. Fusion welding of glass using femtosecond laser pulses with high-repetition rates[J]. *J Laser Micro Nanoen*, 2007, **2**(1): 57–63.
- [10] Cheng Y, Sugioka K, Midorikawa K, et al. Three-dimensional micro-optical components embedded in photosensitive glass by a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(13): 1144–1146.
- [11] Cheng Y, Sugioka K, Midorikawa K. Microfluidic laser embedded in glass by three-dimensional femtosecond laser microprocessing[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(17): 2007–2009.
- [12] Liu H L, Jia Y C, de Aldana J R V, et al. Femtosecond laser inscribed cladding waveguides in Nd: YAG ceramics: fabrication, fluorescence imaging and laser performance[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(17): 18620–18629.
- [13] Mizeikis V, Purlys V, Buividas R, et al. Realization of structural color by direct laser write technique in photoresist[J]. *J Laser Micro Nanoen*, 2014, **9**(1): 42–45.
- [14] Cheng Y, Sugioka K, Midorikawa K, et al. Control of the cross-sectional shape of a hollow microchannel embedded in photostructurable glass by use of a femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(1): 55–57.
- [15] Osellame R, Taccheo S, Marangoni M, et al. Femtosecond writing of active optical waveguides with astigmatically shaped beams[J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, **20**(7): 1559–1567.
- [16] He F, Xu H, Cheng Y, et al. Fabrication of microfluidic channels with a circular cross section using spatiotemporally focused femtosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(7): 1106–1108.
- [17] Liew W L A, Zhang Y L. Laser-based fabrication of 3D hydrogel constructs using Bessel beams[J]. *Bioprinting*, 2018, **9**: 44–51.
- [18] Wang Z, Jiang L, Li X W, et al. High-throughput microchannel fabrication in fused silica by temporally shaped femtosecond laser Bessel-beam-assisted chemical etching[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(1): 98–101.
- [19] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices[J]. *Nature*, 2001, **412**(6848): 697–698.
- [20] Liao C Z, Anderson W, Antaw F, et al. Two-photon nanolithography of tailored hollow three-dimensional microdevices for biosystems[J]. *ACS Omega*, 2019, **4**(1): 1401–1409.

- [21] Cai Z, Qi X B, Pan D, et al. Dynamic Airy imaging through high-efficiency broadband phase microelements by femtosecond laser direct writing[J]. *Photonics Res*, 2020, **8**(6): 875–883.
- [22] Xu L Q, Wang C W, Qi X B, et al. Femtosecond laser direct writing continuous phase vortex gratings with proportionally distributed diffraction energy[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, **119**(13): 131101.
- [23] Liu S L, Ni J C, Zhang C, et al. Tailoring optical vortical dichroism with stereometamaterials[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(2): 2100518.
- [24] Ni J C, Liu S L, Hu G W, et al. Giant helical dichroism of single chiral nanostructures with photonic orbital angular momentum[J]. *ACS Nano*, 2021, **15**(2): 2893–2900.
- [25] Ma Z C, Hu X Y, Zhang Y L, et al. Smart compound eyes enable tunable imaging[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, **29**(38): 1903340.
- [26] Hu Y L, Wang Z Y, Jin D D, et al. Botanical - inspired 4D printing of hydrogel at the microscale[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, **30**(4): 1907377.
- [27] Zhang Y L, Tian Y, Wang H, et al. Dual-3D femtosecond laser nanofabrication enables dynamic actuation[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(4): 4041–4048.
- [28] Lv C, Sun X C, Xia H, et al. Humidity-responsive actuation of programmable hydrogel microstructures based on 3D printing[J]. *Sensor Actuat B Chem*, 2018, **259**: 736–744.
- [29] Xin C, Jin D D, Hu Y L, et al. Environmentally adaptive shape-morphing microrobots for localized cancer cell treatment[J]. *ACS Nano*, 2021, **15**(11): 18048–18059.
- [30] Chen Q Y, Lv P Y, Huang T Y, et al. Encoding smart microjoints for microcrawlers with enhanced locomotion[J]. *Adv Intell Syst*, 2020, **2**(3): 1900128.
- [31] Jin D D, Chen Q Y, Huang T Y, et al. Four-dimensional direct laser writing of reconfigurable compound micromachines[J]. *Mater Today*, 2020, **32**: 19–25.
- [32] Huang T Y, Huang H W, Jin D D, et al. Four-dimensional micro-building blocks[J]. *Sci Adv*, 2020, **6**(3): eaav8219.
- [33] Huang Z C, Chen C, Wang X H, et al. Light-driven locomotion of underwater bubbles on ultrarobust paraffin-impregnated laser-ablated Fe₃O₄-doped slippery surfaces[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(7): 9272–9280.
- [34] Chen C, Zhou L L, Shi L A, et al. Ultralow-voltage-driven smart control of diverse drop's anisotropic sliding by in situ switching joule heat on paraffin-infused microgrooved slippery surface[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(1): 1895–1904.
- [35] Chen C, Huang Z C, Jiao Y L, et al. In situ reversible control between sliding and pinning for diverse liquids under ultralow voltage[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(5): 5742–5752.
- [36] Chen C, Shi L A, Huang Z C, et al. Microhole - arrayed PDMS with controllable wettability gradient by one - step femtosecond laser drilling for ultrafast underwater bubble unidirectional self - transport[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2019, **6**(12): 1900297.
- [37] Jiang S J, Hu Y L, Wu H, et al. Multifunctional Janus Microplates arrays actuated by magnetic fields for water/light switches and bio - inspired assimilatory coloration[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(15): 1807507.
- [38] Jiang S J, Hu Y L, Wu H, et al. Three-dimensional multifunctional magnetically responsive liquid manipulator fabricated by femtosecond laser writing and soft transfer[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(10): 7519–7529.
- [39] Liu J K, Jia X, Wu W S, et al. Ultrafast imaging on the formation of periodic ripples on a Si surface with a prefabricated nanogroove induced by a single femtosecond laser pulse[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(5): 6302–6315.
- [40] Buividas R, Rekšytė S, Malinauskas M, et al. Nano-groove and 3D fabrication by controlled avalanche using femtosecond laser pulses[J]. *Opt Mater Express*, 2013, **3**(10): 1674–1686.
- [41] Li Z Z, Wang L, Fan H, et al. O-FIB: far-field-induced near-field breakdown for direct nanowriting in an atmospheric environment[J]. *Light Sci Appl*, 2020, **9**(1): 41.
- [42] Lin J T, Yu S J, Ma Y G, et al. On-chip three-dimensional high-Q microcavities fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(9): 10212–10217.
- [43] Xu H L, Sun H B. Femtosecond laser 3D fabrication of whispering-gallery-mode microcavities[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2015, **58**(11): 114202.
- [44] Wu H, Zhang L R, Jiang S J, et al. Ultrathin and high-stress-resolution liquid-metal-based pressure sensors with simple device structures[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(49): 55390–55398.
- [45] Huang J, Jiang L, Li X W, et al. Fabrication of highly homogeneous and controllable nanogratings on silicon via chemical etching-assisted femtosecond laser modification[J]. *Nanophotonics*, 2019, **8**(5): 869–878.
- [46] Liu Y, Li S Y, Niu S C, et al. Bio-inspired micro-nano structured surface with structural color and anisotropic wettability on Cu substrate[J]. *Appl Surf Sci*, 2016, **379**: 230–237.
- [47] Kuroiwa Y, Takeshima N, Narita Y, et al. Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(9): 1908–1915.
- [48] Torres-Peiró S, González-Ausejo J, Mendoza-Yero O, et al. Parallel laser micromachining based on diffractive optical elements with dispersion compensated femtosecond pulses[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(26): 31830–31836.
- [49] Maibohm C, Silvestre O F, Borne J, et al. Multi-beam two-photon polymerization for fast large area 3D periodic structure fabrication for bioapplications[J]. *Sci Rep*, 2020, **10**(1): 8740.
- [50] Wang X D, Yu H B, Li P W, et al. Femtosecond laser-based processing methods and their applications in optical device manufacturing: a review[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, **135**: 106687.
- [51] Gu C L, Zhang D P, Chang Y N, et al. Digital micromirror device-based ultrafast pulse shaping for femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(12): 2870–2873.
- [52] Cheng J Y, Gu C L, Zhang D P, et al. High-speed femtosecond laser beam shaping based on binary holography using a digital micromirror device[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(21): 4875–4878.
- [53] Guo Y M, Wang Y, Hu Q L, et al. High-resolution femtosecond laser beam shaping via digital holography[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(4): 987–990.
- [54] Mills B, Heath D J, Feinaeugle M, et al. Laser ablation via programmable image projection for submicron dimension machining in diamond[J]. *J Laser Appl*, 2014, **26**(4): 041501.
- [55] Gu C L, Zhang D P, Wang D E, et al. Parallel femtosecond laser light sheet micro-manufacturing based on temporal focusing[J]. *Precis Eng*, 2017, **50**: 198–203.

- [56] Wang D E, Wen C Y, Chang Y N, et al. Ultrafast laser-enabled 3D metal printing: a solution to fabricate arbitrary submicron metal structures[J]. *Precis Eng*, 2018, **52**: 106–111.
- [57] Saha S K, Wang D E, Nguyen V H, et al. Scalable submicrometer additive manufacturing[J]. *Science*, 2019, **366**(6461): 105–109.
- [58] Hasegawa S, Hayasaki Y, Nishida N. Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(11): 1705–1707.
- [59] Zhang C C, Hu Y L, Du W Q, et al. Optimized holographic femtosecond laser patterning method towards rapid integration of high-quality functional devices in microchannels[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 33281.
- [60] Wang D, Xiao D, Li N N, et al. Holographic display system based on effective area expansion of SLM[J]. *IEEE Photonics J*, 2019, **11**(6): 7001312.
- [61] Blinder D, Schelkens P. Phase added sub-stereograms for accelerating computer generated holography[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(11): 16924–16934.
- [62] Xu B, Du W Q, Li J W, et al. High efficiency integration of three-dimensional functional microdevices inside a microfluidic chip by using femtosecond laser multifoci parallel microfabrication[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 19989.
- [63] Ni J C, Wang C W, Zhang C C, et al. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(7): e17011.
- [64] Pan D, Liu S L, Li J W, et al. Rapid fabrication of 3D chiral microstructures by single exposure of interfered femtosecond vortex beams and capillary - force - assisted self - assembly[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, **32**(4): 2106917.
- [65] Xin C, Yang L, Li J W, et al. Conical hollow microhelicies with superior swimming capabilities for targeted cargo delivery[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(25): 1808226.
- [66] Wang C W, Yang L, Hu Y L, et al. Femtosecond mathieu beams for rapid controllable fabrication of complex microcages and application in trapping microobjects[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(4): 4667–4676.
- [67] Xu B, Ji S Y, Pan D, et al. Hybrid femtosecond laser fabrication of a size-tunable microtrap chip with a high-trapping retention rate[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(5): 1071–1074.
- [68] Pan D, Cai Z, Ji S Y, et al. Microtubes with complex cross section fabricated by C-shaped bessell laser beam for mimicking stomata that opens and closes rapidly[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**(42): 36369–36376.
- [69] Ji S Y, Yang L, Zhang C C, et al. High-aspect-ratio microtubes with variable diameter and uniform wall thickness by compressing Bessel hologram phase depth[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(15): 3514–3517.
- [70] Li R, Jin D D, Pan D, et al. Stimuli-responsive actuator fabricated by dynamic asymmetric femtosecond bessell beam for *in situ* particle and cell manipulation[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(5): 5233–5242.
- [71] Yan L Y, Yang D, Gong Q H, et al. Rapid fabrication of continuous surface Fresnel microlens array by femtosecond laser focal field engineering[J]. *Micromachines*, 2020, **11**(2): 112.
- [72] Yang D, Liu L P, Gong Q H, et al. Rapid two - photon polymerization of an arbitrary 3D microstructure with 3D focal field engineering[J]. *Macromol Rapid Commun*, 2019, **40**(8): 1900041.
- [73] Chu W, Tan Y X, Wang P, et al. Centimeter - height 3D printing with femtosecond laser two - photon polymerization[J]. *Adv Mater Technol*, 2018, **3**(5): 1700396.
- [74] Wang P, Chu W, Li W B, et al. Three-dimensional laser printing of macro-scale glass objects at a micro-scale resolution[J]. *Micromachines*, 2019, **10**(9): 565.
- [75] Uesugi Y, Fukushima R, Saitoh K, et al. Creating electron phase holograms using femtosecond laser interference processing[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(15): 20958–20964.
- [76] Li B H, Jiang L, Li X W, et al. Flexible gray - scale surface patterning through spatiotemporal - interference - based femtosecond laser shaping[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(24): 1801021.
- [77] Wang M M, Guo Q T, Wang S M, et al. Interference femtosecond laser stamping of micro-grating structures and time-resolved observation of its dynamics[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(12): 18376–18386.
- [78] Wu H, Jiao Y L, Zhang C C, et al. Large area metal micro-/ nano-groove arrays with both structural color and anisotropic wetting fabricated by one-step focused laser interference lithography[J]. *Nanoscale*, 2019, **11**(11): 4803–4810.
- [79] Nakata Y, Murakawa K, Miyanaga N, et al. Local melting of gold thin films by femtosecond laser-interference processing to generate nanoparticles on a source target[J]. *Nanomaterials*, 2018, **8**(7): 477.
- [80] Shrestha S, Overvig A C, Lu M, et al. Broadband achromatic dielectric metalenses[J]. *Light Sci Appl*, 2018, **7**: 85.
- [81] Nagelberg S, Zarzar L D, Nicolas N, et al. Reconfigurable and responsive droplet-based compound micro-lenses[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**: 14673.
- [82] Thiele S, Arzenbacher K, Gissibl T, et al. 3D-printed eagle eye: compound microlens system for foveated imaging[J]. *Sci Adv*, 2017, **3**(2): e1602655.
- [83] Deng Z F, Chen F, Yang Q, et al. Dragonfly - eye - inspired artificial compound eyes with sophisticated imaging[J]. *Adv Funct Mater*, 2016, **26**(12): 1995–2001.
- [84] Hu Y L, Rao S L, Wu S Z, et al. All - glass 3D optofluidic microchip with built - in tunable microlens fabricated by femtosecond laser - assisted etching[J]. *Adv Opt Mater*, 2018, **6**(9): 1701299.
- [85] Deng Z F, Yang Q, Chen F, et al. Fabrication of large-area concave microlens array on silicon by femtosecond laser micromachining[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(9): 1928–1931.
- [86] Liu X Q, Chen Q D, Guan K M, et al. Dry - etching - assisted femtosecond laser machining[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, **11**(3): 1600115.
- [87] 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*, 2022, **15**(2): 678.
- [88] Sala F, Paíé P, Martínez Vázquez R, et al. Effects of thermal annealing on femtosecond laser micromachined glass surfaces[J]. *Micromachines*, 2021, **12**(2): 180.
- [89] Cao X W, Chen Q D, Zhang L, et al. Single-pulse writing of a concave microlens array[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(4): 831–834.
- [90] Yang Q, Tong S Y, Chen F, et al. Lens-on-lens microstructures[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(22): 5359–5362.
- [91] Sohn I B, Choi H K, Noh Y C, et al. Laser assisted fabrication of micro-lens array and characterization of their beam shaping property[J]. *Appl Surf Sci*, 2019, **479**: 375–385.
- [92] Chen Z H, Yuan H B, Wu P C, et al. Variable focus convex microlens array on K9 glass substrate based on femtosecond laser processing and hot embossing lithography[J]. *Opt Lett*,

- 2022, **47**(1): 22–25.
- [93] Sun Y L, Dong W F, Yang R Z, et al. Dynamically tunable protein microlenses[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2012, **51**(7): 1558–1562.
- [94] Sun Y L, Hou Z S, Sun S M, et al. Protein-based three-dimensional whispering-gallery-mode micro-lasers with stimulus-responsiveness[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 12852.
- [95] Zhang H R, Yang F Y, Dong J J, et al. Kaleidoscopic imaging patterns of complex structures fabricated by laser-induced deformation[J]. *Nat Commun*, 2016, **7**: 13743.
- [96] Florian C, Piazza S, Diaspro A, et al. Direct laser printing of tailored polymeric microlenses[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, **8**(27): 17028–17032.
- [97] Zheng C, Hu A M, Kihm K D, et al. Femtosecond laser fabrication of cavity microball lens (CMBL) inside a PMMA substrate for super - wide angle imaging[J]. *Small*, 2015, **11**(25): 3007–3016.
- [98] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(8): 554–560.
- [99] Jia Y C, Wang S X, Chen F. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: fabrication and application[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(10): 190042.
- [100] Thomas J, Heinrich M, Zeil P, et al. Laser direct writing: enabling monolithic and hybrid integrated solutions on the lithium niobate platform[J]. *Phys Status Solidi A*, 2011, **208**(2): 276–283.
- [101] Lv J M, Cheng Y Z, Yuan W H, et al. Three-dimensional femtosecond laser fabrication of waveguide beam splitters in LiNbO₃ crystal[J]. *Opt Mater Express*, 2015, **5**(6): 1274–1280.
- [102] Zhang B, Xiong B C, Li Z Q, et al. Mode tailoring of laser written waveguides in LiNbO₃ crystals by multi-scan of femtosecond laser pulses[J]. *Opt Mater*, 2018, **86**: 571–575.
- [103] Chen F, Vázquez de Aldana J R. Laser-written 3D crystalline photonic devices[EB/OL]. *SPIE Newsroom*, 2015: 1–4. (2015-07-24). <https://doi.org/10.1117/2.1201507.006006>.
- [104] Siebenmorgen J, Petermann K, Huber G, et al. Femtosecond laser written stress-induced Nd: Y₃Al₅O₁₂ (Nd: YAG) channel waveguide laser[J]. *Appl Phys B*, 2009, **97**(2): 251–255.
- [105] Chen F, de Aldana J R V. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond - laser micromachining[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, **8**(2): 251–275.
- [106] Feng T, Sahoo P K, Arteaga-Sierra F R, et al. Pulse-propagation modeling and experiment for femtosecond-laser writing of waveguide in Nd: YAG[J]. *Crystals*, 2019, **9**(8): 434.
- [107] Calmano T, Kränkel C, Huber G. Laser oscillation in Yb: YAG waveguide beam-splitters with variable splitting ratio[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(8): 1753–1756.
- [108] Li L Q, Nie W J, Li Z Q, et al. Laser-writing of ring-shaped waveguides in BGO crystal for telecommunication band[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(20): 24236–24241.
- [109] Nguyen H D, Ródenas A, de Aldana J R V, et al. Heuristic modelling of laser written mid-infrared LiNbO₃ stressed-cladding waveguides[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(7): 7777–7791.
- [110] Jia Y C, He R Y, de Aldana J R V, et al. Femtosecond laser direct writing of few-mode depressed-cladding waveguide lasers[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(21): 30941–30951.
- [111] Li G L, Zhang B, Sun L F, et al. Femtosecond laser micromachining of cladding waveguides in KTiOAsO₄ crystal for second - harmonic generation[J]. *Phys Status Solidi Rapid Res Lett*, 2021, **15**(11): 2100345.
- [112] Sun X Y, Zeng L, Du H F, et al. Phase-shifted gratings fabricated with femtosecond laser by overlapped two types of fiber Bragg gratings[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **124**: 105969.
- [113] Jiang Y J, Yuan Y, Xu J, et al. Phase-shifted fiber Bragg grating inscription by fusion splicing technique and femtosecond laser[J]. *Opt Laser Eng*, 2016, **86**: 236–241.
- [114] He J, Wang Y P, Liao C R, et al. Negative-index gratings formed by femtosecond laser overexposure and thermal regeneration[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 23379.
- [115] He J, Wang Y P, Liao C R, et al. Highly birefringent phase-shifted fiber Bragg gratings inscribed with femtosecond laser[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(9): 2008–2011.
- [116] Yang K M, Liao C R, Liu S, et al. Optical fiber tag based on an encoded fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser[J]. *J Lightwave Technol*, 2020, **38**(6): 1474–1479.
- [117] Liao C R, Li C, Wang C, et al. High-speed all-optical modulator based on a polymer nanofiber Bragg grating printed by femtosecond laser[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(1): 1465–1473.
- [118] Mihailov S J, Grobnc D, Hnatovsky C, et al. Extreme environment sensing using femtosecond laser-inscribed fiber Bragg gratings[J]. *Sensors*, 2017, **17**(12): 2909.
- [119] Guo Q, Yu Y S, Zheng Z M, et al. Femtosecond laser inscribed sapphire fiber Bragg grating for high temperature and strain sensing[J]. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2019, **18**: 208–211.
- [120] Zhang F, Yu Y, Cheng C, et al. Wavelength response and thermal stability of embedded nanograting structure light attenuator fabricated by direct femtosecond laser writing[J]. *Appl Phys B*, 2014, **117**(1): 53–58.
- [121] Bonse J, Gräf S. Maxwell meets marangoni—a review of theories on laser - induced periodic surface structures[J]. *Laser Photonics Rev*, 2020, **14**(10): 2000215.
- [122] Vorobyev A Y, Guo C L. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(4): 041914.
- [123] Serkov A A, Shafeev G A, Barmina E V, et al. Stainless steel surface wettability control via laser ablation in external electric field[J]. *Appl Phys A*, 2016, **122**(12): 1067.
- [124] Bonse J, Krüger J, Höhm S, et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures[J]. *J Laser Appl*, 2012, **24**(4): 042006.
- [125] Höhm S, Herzlieb M, Rosenfeld A, et al. Formation of laser-induced periodic surface structures on fused silica upon two-color double-pulse irradiation[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **103**(25): 254101.
- [126] De La Cruz A R, Lahoz R, Siegel J, et al. High speed inscription of uniform, large-area laser-induced periodic surface structures in Cr films using a high repetition rate fs laser[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(8): 2491–2494.
- [127] Feng P, Jiang L, Li X, et al. Gold-film coating assisted femtosecond laser fabrication of large-area, uniform periodic surface structures[J]. *Appl Opt*, 2015, **54**(6): 1314–1319.
- [128] Dostovalov A, Bronnikov K, Korolkov V, et al. Hierarchical anti-reflective laser-induced periodic surface structures (LIPSSs) on amorphous Si films for sensing applications[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(25): 13431–13441.
- [129] Huang J, Jiang L, Li X W, et al. Cylindrically focused nonablative femtosecond laser processing of long - range uniform periodic surface structures with tunable diffraction efficiency[J]. *Adv Opt Mater*, 2019, **7**(20): 1900706.
- [130] Chen Q D, Lin X F, Niu L G, et al. Dammann gratings as

- integratable micro-optical elements created by laser micromanufacturing via two-photon photopolymerization[J]. *Opt Lett*, 2008, **33**(21): 2559–2561.
- [131] Cai Z, Liu Y, Hu Y L, et al. Generation of colorful Airy beams and Airy imaging of letters via two-photon processed cubic phase plates[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(5): 1151–1154.
- [132] Machida M, Nakajima Y, Torres-Mapa M L, et al. Shrinkable silver diffraction grating fabricated inside a hydrogel using 522-nm femtosecond laser[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 187.
- [133] Seifert G, Kaempfe M, Syrowatka F, et al. Self-organized structure formation on the bottom of femtosecond laser ablation craters in glass[J]. *Appl Phys A*, 2005, **81**(4): 799–803.
- [134] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486–2489.
- [135] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059–2062.
- [136] Bauser H C, Bukowsky C R, Phelan M, et al. Photonic crystal waveguides for > 90% light trapping efficiency in luminescent solar concentrators[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(8): 2122–2131.
- [137] Li M X, Ling J W, He Y, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator[J]. *Nat Commun*, 2020, **11**: 4123.
- [138] Zhou T J, Tang M C, Xiang G H, et al. Continuous-wave quantum dot photonic crystal lasers grown on on-axis Si (001) [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 977.
- [139] Fenzl C, Hirsch T, Wolfbeis O S. Photonic crystals for chemical sensing and biosensing[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2014, **53**(13): 3318–3335.
- [140] Sun H B, Matsuo S, Misawa H. Three-dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, **74**(6): 786–788.
- [141] Straub M, Gu M. Near-infrared photonic crystals with higher-order bandgaps generated by two-photon photopolymerization[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(20): 1824–1826.
- [142] Guo R, Li Z Y, Jiang Z W, et al. Log-pile photonic crystal fabricated by two-photon photopolymerization[J]. *J Opt A Pure Appl Opt*, 2005, **7**(8): 396–399.
- [143] Mizeikis V, Juodkazis S, Tarozaitė R, et al. Fabrication and properties of metallo-dielectric photonic crystal structures for infrared spectral region[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(13): 8454–8464.
- [144] Deubel M, Von Freymann G, Wegener M, et al. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications[J]. *Nat Mater*, 2004, **3**(7): 444–447.
- [145] Wu J, Day D, Gu M. A microfluidic refractive index sensor based on an integrated three-dimensional photonic crystal[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(7): 071108.
- [146] Liu Y J, Wang H, Ho J, et al. Structural color three-dimensional printing by shrinking photonic crystals[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 4340.
- [147] Seet K K, Mizeikis V, Juodkazis S, et al. Three-dimensional circular spiral photonic crystal structures recorded by femtosecond pulses[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2006, **352**(23–25): 2390–2394.
- [148] Raut H K, Wang H, Ruan Q F, et al. Hierarchical colorful structures by three-dimensional printing of inverse opals[J]. *Nano Lett*, 2021, **21**(20): 8602–8608.
- [149] Wei D Z, Wang C W, Wang H J, et al. Experimental demonstration of a three-dimensional lithium niobate nonlinear photonic crystal[J]. *Nat Photonics*, 2018, **12**(10): 596–600.
- [150] Wei D Z, Wang C W, Xu X Y, et al. Efficient nonlinear beam shaping in three-dimensional lithium niobate nonlinear photonic crystals[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 4193.
- [151] Liu S, Switkowski K, Xu C L, et al. Nonlinear wavefront shaping with optically induced three-dimensional nonlinear photonic crystals[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 3208.
- [152] Xu T X, Switkowski K, Chen X, et al. Three-dimensional nonlinear photonic crystal in ferroelectric barium calcium titanate[J]. *Nat Photonics*, 2018, **12**(10): 591–595.

作者简介



董彬 (1997-), 男, 硕士, 主要从事飞秒激光微纳加工光学微结构。

E-mail: snowmail@mail.ustc.edu.cn



【通信作者】吴东 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事利用超快激光与材料的非线性作用和计算机控制扫描实现多种材料的高精度三维加工和复杂造型, 并提出了若干加工新原理和关键技术, 将其应用于微光学、微机械、微流控和仿生表面等微纳结构和器件的制备。

E-mail: dongwu@ustc.edu.cn



【通信作者】刘炳瑞 (1989-), 男, 博士, 2017 年获得中国科学技术大学博士学位, 主要研究方向为微纳米技术、激光加工和增材制造。

E-mail: brliu@ustc.edu.cn

团队介绍

中国科学技术大学微纳米工程实验室于 1993 年由黄文浩教授创立, 现有教授 5 名, 副教授 5 名, 研究方向涵盖飞秒激光微纳米制造技术、微纳米器件及系统工艺、扫描探针显微镜及其标准化等。相关成果发表在 *Nature*、*Nat. Nanotechnol.*、*Nat. Photonics* (入选封面)、*Nat. Commun.*、*PNAS* (美国科学院院刊)、*Natl. Sci. Rev.* (国家科学评论, 国内顶级综合性学术期刊)、*Light Sci. Appl.*、*Adv. Mater.*、*Nano Lett.*、*ACS Nano* 等期刊 200 篇。承担科技部重点研发计划、基金委重大仪器研制项目、基金委联合基金重点项目、中科院青年交叉团队项目、海外优秀青年基金、安徽省科技重大专项等, 荣获安徽省自然科学一等奖、安徽省科技进步一等奖、中国光学十大进展等奖项。

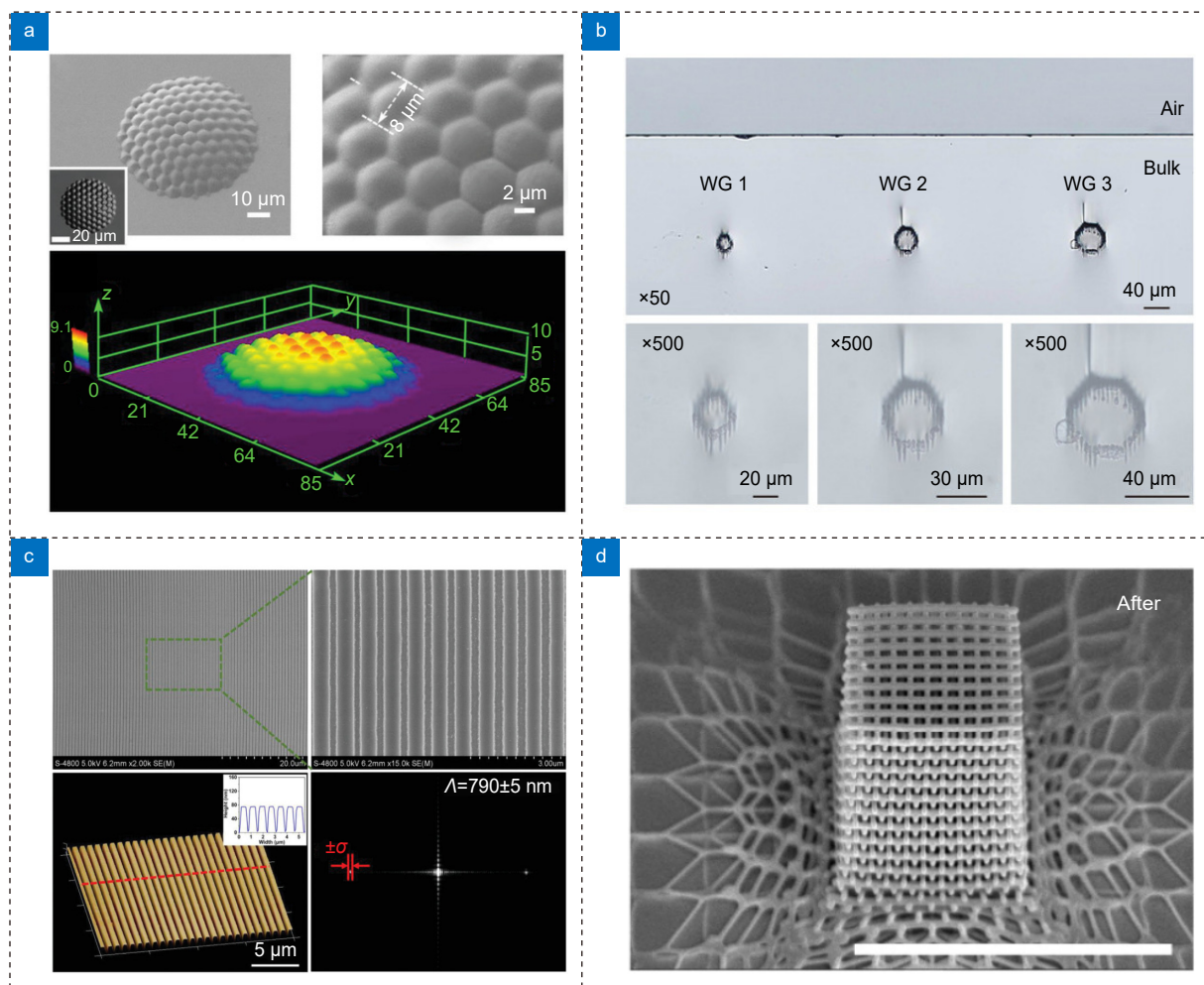
实验室主页: <http://mane.ustc.edu.cn>



扫描二维码, 获取PDF全文

Femtosecond laser micromachining optical devices

Dong Bin¹, Zhang Juan², Wang Dawei¹, Zhang Yiyuan¹, Zhang Leran¹, Li Rui¹, Xin Chen¹, Liu Shunli¹, Zhang Zihang¹, Wu Hao¹, Jiang Shaojun¹, Zhu Suwan¹, Liu Bingrui^{1*}, Wu Dong^{1*}



(a) Femtosecond laser fabricating microlenses; (b) Femtosecond laser fabricating optical waveguides; (c) Femtosecond laser fabricating micro-waveguide; (d) Femtosecond laser fabricating photonic crystals

Overview: Currently, the development of semiconductor technology based on electrons has reached its physical limit, and the further reduced size of semiconductor devices will bring about the problems such as excessive power consumption. To solve the above-mentioned problems, information technology based on photons stands out for its fast response time, high storage capacity, strong parallel processing capability, and low power consumption. However, traditional optical devices are generally large in size, so the optical system composed of such devices is quite bulky and in lack of flexibility, which greatly increases the difficulty of optical system integration. The development of micro-optics

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61927814, 52122511, 91963127, 52075516, U20A20290, 52175396) and Major Scientific and Technological Projects in Anhui Province (201903a05020005)

¹CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Key Laboratory of Precision Scientific Instrumentation of Anhui Higher Education Institutes, Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China; ²Department of Clinical Laboratory, the First Affiliated Hospital of USTC, Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230001, China

* E-mail: brliu@ustc.edu.cn; dongwu@ustc.edu.cn

theory makes the integration of optical devices possible. Optical devices on multiple scales have shown the performance no less than that of traditional optical devices, which not only substantially promotes the miniaturization of optical system but also puts forward higher requirements for the micromachining precision.

Laser, as a non-contact, high-energy, non-polluting, and automatic processing tool, holds various applications in material processing, wide-bandwidth communication, optical devices, data storage and other important industrial fields, and has been widely concerned by industry insider. Compared with traditional long-pulse or continuous laser processing technology, femtosecond laser exhibits various advantages such as ultrashort pulse width, ultrahigh peak power, and ultralow thermal effect, thus making itself a more advanced micro/nano processing tool.

Because of the threshold effect of two-photon polymerization (TPP) and the Gaussian distribution of femtosecond laser after being focused by the objective lens, TPP can theoretically achieve three-dimensional resolution beyond the diffraction limit if the light intensity at the center of the focus is just slightly greater than that of the two-photon ionization threshold. Based on the above-mentioned theory, femtosecond laser can actually fabricate arbitrary micro/nano 3D structures in the circumstances of point-by-point scanning. Other than TPP, the interaction between electrons and ion subsystems during the ultrashort-pulse laser processing of metal or semiconductor is mostly analyzed by the Double-Temperature Equation (DTE). Based on the DTE, femtosecond laser has been employed to drill holes or achieve arbitrary patterning on metal surface. When ultrashort-pulse laser interacts with dielectric materials, precise reduction of material can be achieved through "avalanche ionization" triggered by multi-photon ionization or tunneling ionization. Based on the above-mentioned theory, femtosecond laser can actually process any material in practice.

Therefore, in this review, the principle and advantages of femtosecond laser as well as its application in the micro/nano processing of optical device are discussed in detail. This review is divided into five sections. The first section introduces the mechanism and processing properties of femtosecond laser. The second section discusses a variety of methods to improve the resolution of femtosecond laser micromachining. The third section focuses on the femtosecond laser processing technology, and the fourth section describes the femtosecond laser's application in the processing of optical devices, including microlens, optical waveguide, grating, and photonic crystals. Finally, this review makes a summary and discusses the prospect of femtosecond laser micromachining used in optical devices.

Dong B, Zhang J, Wang D W, et al. Femtosecond laser micromachining optical devices[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220073; DOI: [10.12086/oe.2023.220073](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220073)