

激光与光电子学进展

飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展

杨雪, 孙会来*, 岳端木, 孙建林

天津工业大学机械工程学院, 天津 300387

摘要 微透镜阵列是重要的微光学元件, 其以良好的成像性能以及小型化、轻型化的优点, 被广泛应用于光通信、光信号处理、波前传感、光场调控、数据存储、医学诊断等领域。飞秒激光加工技术具有可控度高、灵活性好、无需掩模、加工精度高等优势, 成为近年来微透镜阵列的重要加工方式。本文综述了微透镜阵列飞秒激光加工方法的研究进展, 包括飞秒激光双光子聚合加工和化学刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工, 介绍了微透镜阵列的应用, 分析了制备微透镜阵列的飞秒激光加工方法存在的问题和发展趋势。

关键词 激光光学; 飞秒激光; 微透镜阵列; 双光子聚合; 激光烧蚀; 湿法刻蚀; 干法刻蚀

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0500005

Research Progress of Femtosecond Laser Fabrication of Microlens Array

Yang Xue, Sun Huilai*, Yue Duanmu, Sun Jianlin

School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China

Abstract As a significant micro-optical element, microlens arrays are widely used in optical communication, optical signal processing, wavefront sensing, optical field regulation, data storage, medical diagnosis, and other fields owing to their good imaging performance and miniaturization and lightening advantages. Femtosecond laser processing technology exhibits high controllability, good flexibility, no masking requirement, and high processing accuracy, and it has recently become an important processing method for microlens arrays. Herein, the research progress of femtosecond laser processing methods for microlens arrays, including two-photon polymerization and chemical-etching-assisted ablation, were summarized. Additionally, the application of microlens arrays was introduced, and the problems and development trends pertaining to the femtosecond laser processing method for microlens arrays were analyzed.

Key words laser optics; femtosecond laser; microlens array; two-photon polymerization; laser ablation; wet etching; dry etching

OCIS codes 140.3390; 190.7110; 220.4740; 230.4000

1 引 言

微透镜阵列(MLA)是阵列光学器件中重要的光学元件,通常由一系列孔径为微米量级的透镜按照一定的方式排列而成。将微透镜阵列用于先进的高集成度和高性能系统中,可以实现光学校准、

调焦、扩散照明、成像等多种功能^[1]。随着现代科学技术的发展,各类光学系统逐渐趋于微型化、集成化和功能化,从而对微透镜阵列等光学元件的材料和技术工艺提出了更高要求。目前,用于制造微透镜阵列结构的常规技术包括灰度掩模法^[2]、光刻胶热熔法^[3]、单点金刚石切削加工^[4-5]、离子束刻蚀^[6]以

收稿日期: 2020-06-08; 修回日期: 2020-06-29; 录用日期: 2020-07-21

*E-mail: 1446869177@qq.com

及热压模成型法^[7]等,这些技术均存在一定的优势和劣势。例如:灰度掩模法在加工精度方面有所改善,但对设备的要求较高,成本相对较高;光刻胶热熔法具有工艺简单、成本低的优点,对设备的精度要求不高,目前应用得较为广泛,但使用的光刻胶易老化、不耐高温,且材料的选择受限;单点金刚石切削加工的精度较高,但加工玻璃等脆性材料时,每次的切削进给量只能设置得非常小,很难保证前后加工一致,不适合批量生产;离子束刻蚀技术可以制造特征尺寸小、表面质量高的微纳结构,但该工艺受到了生产效率及工艺稳定性的限制,不能很好地满足行业需求。此外,上述技术通常适用于加工平面微结构,难以满足在曲面上制造复杂微结构的需求。尽管可以通过光刻^[8]、软光刻^[9]和干法刻蚀^[10]等微光学技术来实现曲面三维微结构,但这些技术无法在设备中实现灵活集成,从而在很大程度上限制了微透镜阵列在功能性集成设备中的应用^[11]。

近年来,飞秒激光加工技术已成为微纳制造的一大利器,其以强大的可编程设计优势,很好地实现了小尺寸、高精度、复杂表面轮廓以及功能化三维结构的灵活制造,成功地解决了上述技术存在的问题。飞秒激光加工通过紧聚焦超短脉冲激光来获得具有超高能量密度的焦点^[12],能轻松突破衍射极限,实现超高精度复杂结构的微纳加工。同时,飞秒激光以“冷加工”的性能特点极大地拓宽了可加工材料的范围。与其他制备方法相比,飞秒激光加工技术制备得到的微镜阵列结构的尺寸小,而且该技术的制备效率高,可以大面积制备,重复性好,可加工材料范围广,引起了国内外学者的广泛关注^[13-18]。

本文介绍了飞秒激光双光子聚合(TPP)加工和化学刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工制备微透镜阵列的研究进展,简述了微透镜阵列的应用,分析了飞秒激光加工技术制备微透镜阵列存在的问题和发展趋势。

2 飞秒激光加工技术

根据加工方式的不同,飞秒激光加工技术可以分为两种。第一种是双光子聚合加工技术^[19-21],该技术通过增材加工的方式对聚合物材料(光敏树脂、金属溶液、生物相容材料和石墨烯氧化材料等)进行微纳结构的三维制造;第二种是飞秒激光烧蚀

加工技术^[22-23],该技术通过减材加工的方式对硬质材料(半导体材料、介质材料和金属材料等)进行复杂结构的去除加工。下面分别介绍飞秒激光双光子聚合和化学刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工制备微透镜阵列的相关研究。

2.1 飞秒激光双光子聚合加工

双光子聚合是无掩模制造功能性微器件和纳米器件的通用技术^[24],特别适用于制造具有若干特性的微光学和光子器件^[25-27]。双光子聚合是指物质发生双光子吸收后而引发的光聚合过程^[28]。其中的双光子吸收是指物质与强激光相互作用时,物质的一个分子同时吸收两个光子的能量,从而使其从基态跃迁到激发态的过程,属于三阶非线性效应中的一种。由于双光子吸收只能在强激光作用下发生,而飞秒激光在焦点处的能量高,其他光路的激光能量低,因此双光子吸收的能量主要集中在激光焦点处,能量低于双光子吸收阈值的焦点外围区域不产生双光子吸收。此外,由于激光光场强度没有达到材料的双光子吸收条件,以及材料在该波段不响应(吸收谱线之外),双光子聚合作用不能发生,因此飞秒激光可以实现逐点加工,能够制造具有纳米级空间分辨率的精密微结构^[29-30]。双光子聚合加工的优势在于它可以通过读取CAD文件直接将聚合物模型打印成实际结构,仅需几个步骤即可完成微结构的生产制造,整个过程不到一小时;而且,双光子聚合的加工环境和参数易于控制,可以轻松修改得到所需的结构^[31]。此外,采用增材制造的方式可以直接集成避免组装错误。国内外许多研究团队已采用双光子聚合技术制造了形貌复杂的高精度微透镜阵列。2009年,Wu等^[32]采用飞秒激光双光子聚合直写技术制造了非球面微透镜和具有100%填充因数的透镜阵列,如图1所示。镜片轮廓的相对误差小于0.2%,透镜或透镜阵列结构可以通过反应离子刻蚀等精加工步骤进一步转换为由二氧化硅等硬质材料组成的光学器件。这项工作说明飞秒激光技术可以高精度地、简单快速地制造出具有复杂结构的微纳米功能光学器件。

2015年,Wu等^[33]再次通过优化实验参数后的双光子聚合技术,将聚合物装置成功集成到封闭的玻璃微通道中,得到了一种新型的多功能细胞计数微器件。该制备过程包括4个步骤。首先采用双光子聚合技术在玻璃内部写入3D潜像,如图2(a)~(c)所示,接下来进行初始退火以开发改性后的区域,然后

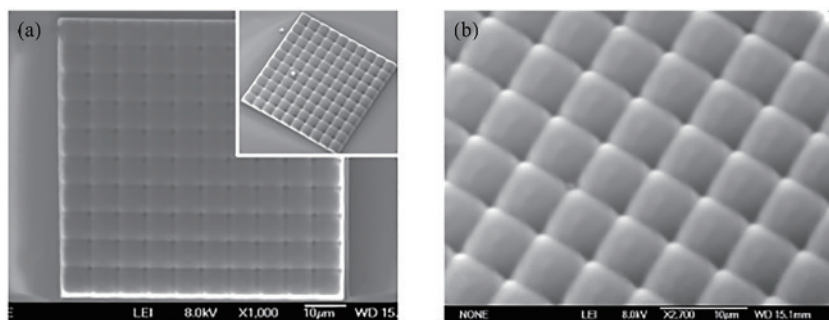


图 1 100% 填充因数正方形微透镜阵列的扫描电子显微镜(SEM)图及其局部放大图^[32]。(a)SEM图;(b)局部放大图

Fig. 1 SEM image and its partial enlarged view of 100% fill factor square microlens array^[32]. (a) SEM image;
(b) partially enlarged view

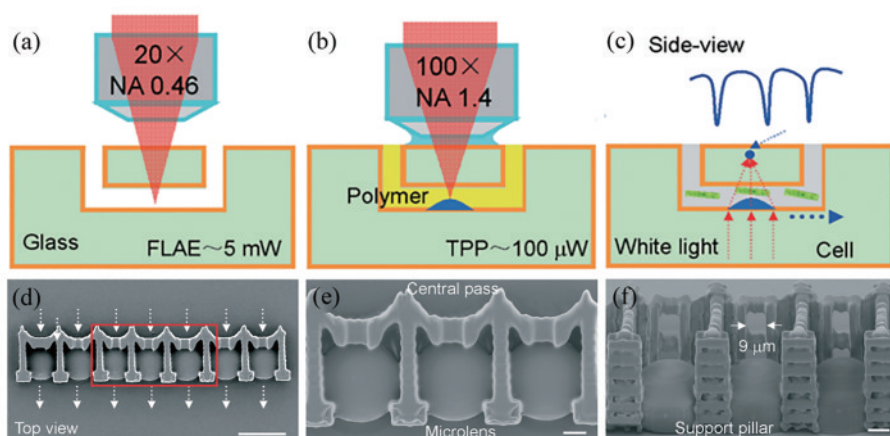


图 2 飞秒激光双光子聚合技术制备光流微透镜阵列^[33]。(a)湿法刻蚀辅助飞秒激光制备 3D 嵌入式玻璃微通道;(b)双光子聚合技术制备集成有聚合物中心通道的微透镜阵列;(c)通过观察微透镜阵列焦点处的光强变化进行细胞计数,当细胞穿过微透镜时,光强下降;(d)(e)采用双光子聚合技术制备的中心通道组合微透镜阵列的俯视图和放大的 SEM 图像;

(f) 9 μm 孔径的 M 形限制壁,用以控制细胞在微透镜中心的上方通过

Fig. 2 Femtosecond laser two-photon polymerization technology to prepare optical flow microlens array^[33]. (a) Wet etching-assisted femtosecond laser fabrication of 3D embedded glass microchannels; (b) two-photon polymerization technology for integration of a polymer center-pass microlens array; (c) cell counting by observing the intensity variations at the focal spots of a microlens array, when a cell passes across a microlens, the intensity dips; (d) top view and (e) magnified SEM images of a center-pass combined microlens array fabricated by two-photon polymerization technology; (f) M-shaped limiting wall with 9 μm aperture to control the passage of cells above the center of the microlens

使用氢氟酸刻蚀选择性地去除改性区域,最后再次进行退火处理来平滑刻蚀的表面,最终得到了中心孔型光流微透镜阵列。该阵列由 7 个微透镜和 9 μm 孔径的 M 形限制壁组成,如图 2(d)~(f)所示。Wu 等^[33]通过监测焦点处的光强变化来实现细胞的准确计数。另外,这些孔既可以控制每个细胞的位置,也可以滤除畸变细胞。这种直接在中空玻璃内部产生的结构被称为“瓶装船”,该结构的灵活集成显示了双光子聚合技术在制造复杂多功能设备中的显著优势。

双光子聚合技术具有操作简单、分辨率高

(<100 nm)和 3D 处理能力等特点,已被广泛用于制造复杂的功能性 3D 微纳米器件;但在其初步形成凹坑阵列时,仍是以逐点扫描的方式进行制造的,这会在实际应用中受到速度的限制。为了提高效率,人们通常利用微透镜阵列、衍射光学元件或多光束干涉的多焦点并行制造方法,然而,这些方法的缺点在于焦点的位置由光学元件固定,且仅适用于制造具有相同形态的微结构阵列^[34]。使用空间光调制器(SLM)制造复杂微结构是一种更加灵活的方法^[35]。SLM 是一种动态衍射光学元件,可以调制入射波前的相位,利用透镜或物镜进行全息变换之后就能形

成任意光点阵列^[36]。将 SLM 引入到飞秒激光加工系统中可实现多光点并行加工,且光点阵列中的每个单元的能量都可以单独调节,因此单次曝光后可得到尺寸不同的光点阵列,进一步提高加工效率。

Yang 等^[37]将空间光调制器引入到了双光子聚

合加工系统中,如图 3 所示,实现了尺寸为几十微米的半球形微透镜阵列和 3D 光子结构的并行制造。这种多光点并行制造方法显著提高了双光子聚合的通量和灵活性,可用于制造大规模的微光学和光子器件。

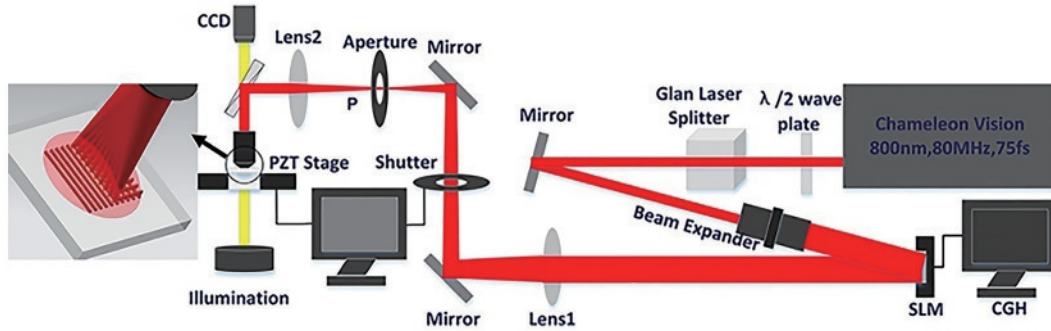


图 3 基于 SLM 的飞秒激光双光子聚合加工系统^[37]

Fig. 3 SLM-based femtosecond laser two-photon polymerization processing system^[37]

2018 年, Lin 等^[38]采用双光子聚合技术在曲面上制造了由微透镜阵列和针孔阵列组成的 3D 曲面复眼结构。与其他微加工工艺相比,通过双光子聚合分层增材制造的方式创建光学结构,整个过程一步成形,无需二次装配,避免了装配错误。佛罗里达大学的 He 等^[39]提出可采用双光子聚合技术来实现可调焦点液晶微透镜阵列的制造,该器件中关键的抛物线结构(用于产生不均匀的电场分布和均匀的液晶取向)是由双光子聚合技术直写而成的。这表明,使用双光子聚合直写技术来制备具有液晶对准的曲线表面结构是可行的,这为在曲线表面上进行任意构图打开了新的大门,同时也证明了该技术是制造其他可调光子器件的有力工具。特鲁瓦技术大学的 Peng 等^[40]利用双光子聚合技术制造了特征尺寸低至 80 nm 的包含量子点的 3D 光致发光纳米结构,这项工作证明了双光子聚合技术具有制造超高分辨率 3D 光致发光聚合物纳米结构的能力。此外,双光子聚合直接激光写入可控制活性聚合物纳米结构的空定位、尺寸及光致发光特性,这为某些有前途的应用开辟了新途径。

2.2 化学刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工

飞秒激光烧蚀已被证明是一种通过改变固体表面性质来制造各种功能材料的通用且可靠的技术^[41],但其逐点扫描的加工特性往往导致加工耗时较长,加工硬质材料后的表面粗糙度较高,因此只能获得有限的高质量微结构,在一定程度上降低了微透镜的光学性能。采用化学刻蚀辅助飞秒激光

烧蚀加工的方法可以快速实现高精度三维微纳结构的制造^[42],这种加工方式主要是在飞秒激光诱导材料表面产生缺陷的基础上,再进行湿法或干法刻蚀处理,以加速刻蚀效率,得到表面更光滑、质量更高的微透镜及微透镜阵列。下面对湿法刻蚀和干法刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工进行介绍。

2.2.1 湿法刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工

湿法刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工是一种高效的成形方法。该方法首先利用飞秒激光在材料表面诱导出凹坑阵列的改性区域,然后使用氢氟酸等腐蚀试剂辅助刻蚀,加快微透镜的形成^[43-44]。飞秒激光经物镜聚焦后,会在焦点处形成一个极端物理场。在此过程中,激光辐照区域的材料会发生晶格结构的改变,化学键的键角减小,激光辐照区域材料的化学反应活性增大,自组装纳米结构形成,进而导致局部光影响区域的形成。与未受激光辐照的区域相比,材料受光影响的区域与刻蚀剂的反应速率更高,因此刻蚀仅发生在激光辐照区域,从而实现材料的定向去除^[45],形成优质的凹面微透镜阵列。后续可结合复制工艺,得到凸透镜阵列。在过去的 10 年中,湿法刻蚀辅助飞秒激光技术得到了进一步发展,其与多种技术的结合提升了飞秒激光的加工效率,人们已经制备出了复杂程度高、表面质量好以及功能性强的微透镜阵列。2010 年, Chen 等^[46]利用飞秒激光烧蚀结合氢氟酸刻蚀的方法,在数小时内制造出了直径小于 100 μm 的大面积紧密堆积矩形和六角形凹微透镜阵列,如图 4 所示。这

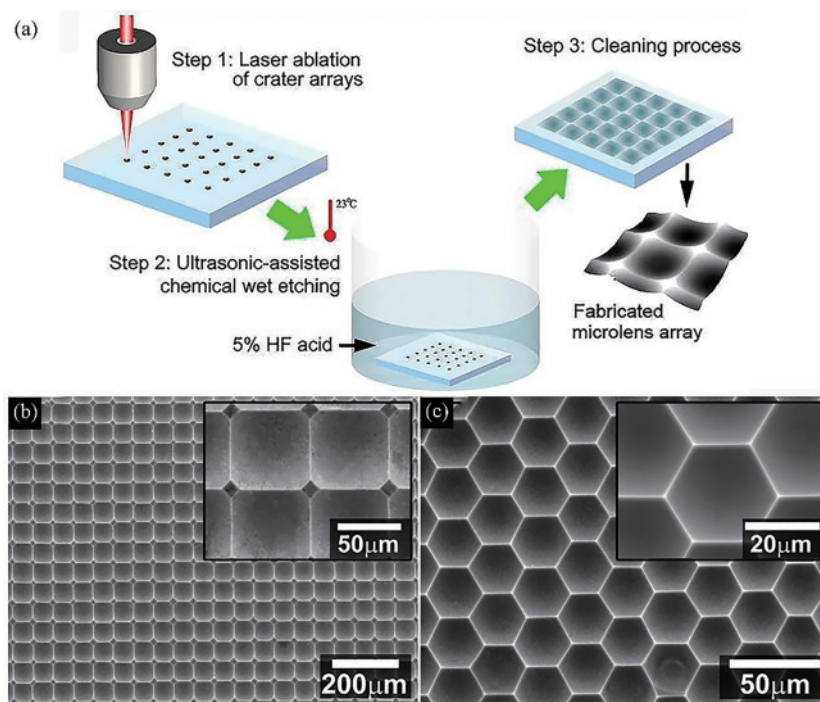


图 4 湿法刻蚀辅助飞秒激光制备微透镜阵列^[46]。(a)加工过程示意图;(b)紧密堆积的矩形微透镜阵列的 SEM 图像(插图为局部放大图);(c)紧密堆积的六角形微透镜阵列的 SEM 图像(插图为局部放大图)

Fig. 4 Wet etching assisted femtosecond laser preparation of microlens array^[46]. (a) Schematic of processing; (b) SEM images of closely packed rectangular microlens arrays, and the inset is partially enlarged view; (c) hexagonal microlens arrays, and the inset is partially enlarged view

种简单高效的无掩模技术简化了经典的激光刻蚀工艺,大大提高了制造效率,并且可以通过调整脉冲能量、喷射次数和刻蚀时间等参数来控制微透镜阵列的尺寸、形状和填充图案。

2016年,Deng等^[47]利用单脉冲飞秒激光湿法刻蚀

与热压花技术相结合的方法,制造了眼孔平均直径为 24.5 µm、眼球总数达 30000 的人工复眼,如图 5 所示。这两种技术的结合可以快速生产具有热压花多功能性的大面积凹面微透镜阵列,实现高质量人工复眼的制备,并且在大规模工业生产中具有巨大的应用潜力。

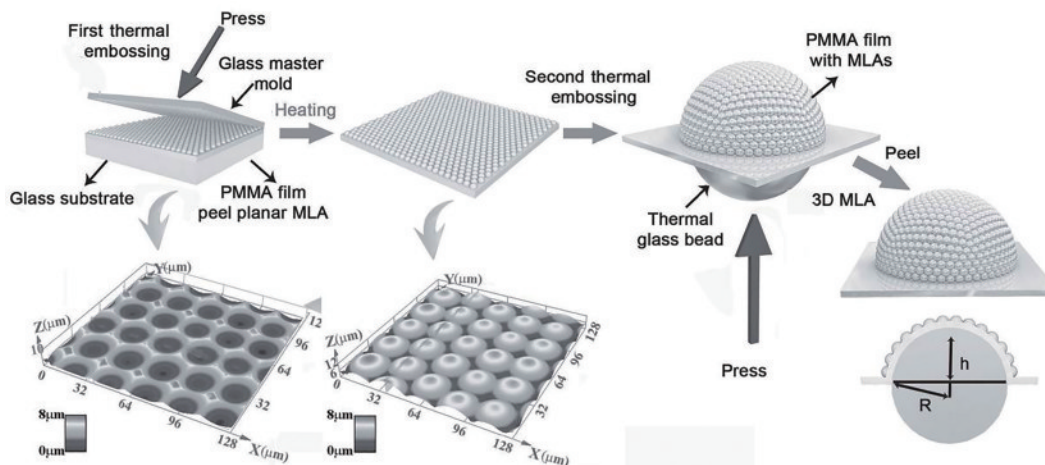


图 5 湿法刻蚀辅助飞秒激光加工结合热压花工艺制备人工复眼^[47]

Fig. 5 Wet etching assisted femtosecond laser processing combined with hot embossing process to prepare artificial compound eye^[47]

2018年,Cao等^[48]将 SLM 引入到飞秒激光系统中,利用多光点并行加工在半径约为 120 µm 的曲面

上初步形成了复杂的三维结构,然后使用氢氟酸溶液(质量分数为 20%)进行湿法蚀刻,得到了 3D 密

排复合微透镜阵列,如图 6 所示。微透镜的形貌随刻蚀时间而变化,因此可以通过改变刻蚀时间来控制单个微透镜的直径。微透镜横向位置的均匀性和一致性,使得微透镜阵列在不同的平面上具有良好的成像性能。此外,这种方法可以通过改变计算

机生成的全息图定义的图案,用单脉冲照射并刻蚀相同的时间来制造任意设计的 2D 或 3D 微凹透镜阵列,这为制造 3D 微光学设备提供了一种并行高效的工具。该技术在光流体、光学通信和集成光学方面具有一定的潜在应用。

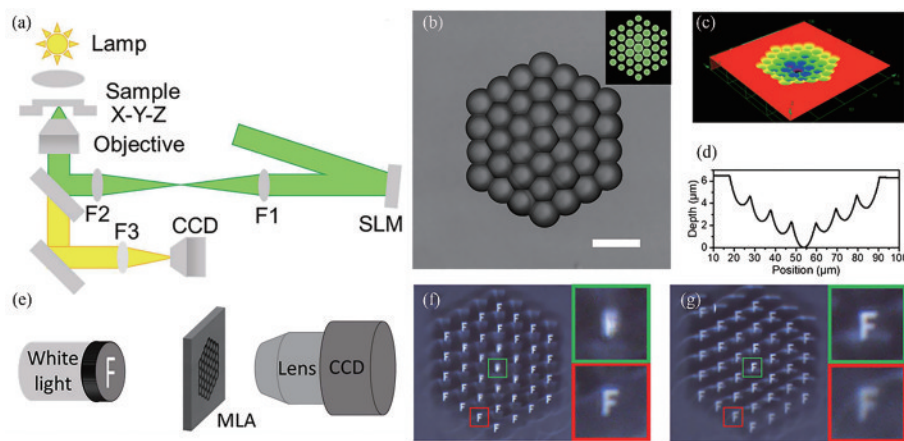


图 6 空间光调制器辅助飞秒激光制备 3D 密排复合微透镜阵列^[48]。(a)基于 SLM 的全息飞秒激光加工系统示意图;(b)3D 排列的密排复合微透镜的顶视图;(c)(d)密排复合微透镜中微凹透镜的 3D 地形图和侧视图;(e)微透镜阵列成像系统示意图;(f)(g)微透镜阵列的成像性能,偏心(f)和中心(g)分别显示清晰的图像

Fig. 6 Spatial light modulator assisted femtosecond laser preparation of 3D close-packed compound microlens array^[48]. (a) Schematic of holographic femtosecond laser processing system based on SLM; (b) top view of the close-packed compound microlens with 3D arrangement; (c)(d) 3D topography and side view of the micro-concave lens in the close-packed compound microlens; (e) schematic of microlens array imaging system; (f) (g) microlens array imaging performance, eccentricity (f) and center (g) show clear images, respectively

微透镜阵列在大气环境、海洋探索和微流体系统等方面都有广泛应用,但是当微透镜阵列应用于水介质中时,普通的微透镜列表面易被油污污染,导致其光学成像能力丧失。2019年,Li等^[49]将

飞秒激光湿法刻蚀与飞秒激光直写技术相结合,制造了超疏油性聚二甲基硅氧烷(PDMS)微透镜阵列,该阵列由 10000 个密排的微透镜组成,孔径为 50 μm 。该微透镜阵列的制造过程如图 7 所示。这

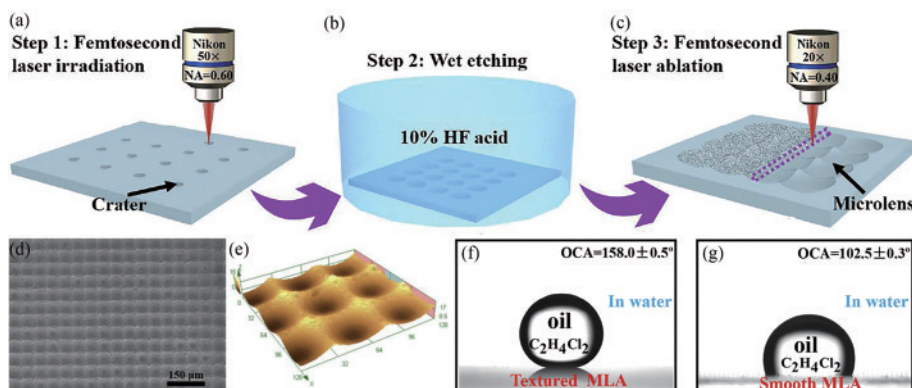


图 7 湿法刻蚀辅助飞秒激光加工结合飞秒激光直写技术制备 PDMS 微透镜阵列^[49]。(a)~(c)微透镜阵列的制造过程;(d)微透镜阵列的 SEM 图像;(e)纹理化微透镜阵列的 3D 轮廓;(f)纹理化微透镜阵列的光学图像;(g)光滑微透镜阵列的光学图形

Fig. 7 Wet etching assisted femtosecond laser processing combined with femtosecond laser direct writing to prepare PDMS microlens arrays^[49]. (a)–(c) Manufacturing process of microlens array; (d) SEM image of microlens array; (e) 3D contour of textured microlens array; (f) optical image of textured microlens array; (g) optical image of smooth microlens array

种方法得到的微纳米结构赋予了微透镜阵列表面的水下超疏油性、拒油性能以及良好的机械耐久性,可被应用于海洋勘探、生物科学研究、微流体系统以及许多水下基于微透镜阵列的系统。

2.2.2 干法刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工

湿法刻蚀辅助飞秒激光加工方法可以在石英、硅、碳化硅、玻璃等材料上快速制备出高精度且形貌可控的微透镜阵列及其他三维微纳结构,但湿法刻蚀在加工过程中存在刻蚀液与被加工材料完全接触时产生的横向腐蚀问题,从而使得二者的化学反应生成物会在短时间内附着在材料表面,阻碍刻蚀液与被加工表面充分接触,进而影响刻蚀的均匀性,导致微透镜阵列出现形貌畸变和图形失真,加工精度降低。而干法刻蚀能很好地避免这个问题。干法刻蚀技术是在真空度较低的环境下使气体等离子体在电场的作用下,对被刻蚀材料同步进行物理轰击和化学反应的刻蚀技术。可以说,除化学溶液腐蚀以外的所有刻蚀技术都可以被称作干法刻蚀。工业上广泛应用的干法刻蚀工艺包括反应离子刻蚀、感应耦合等离子体刻蚀和离子束刻蚀,它们实质上都是基于等离子体效应的加工技术。在电场作用下形成的电离化气体称为等离子体,这种气体的化学活性比未经电场作用的气体强很多,能

够提高其与基底材料的反应速度,达到刻蚀的目的,属于化学刻蚀。当等离子体经电场加速进入基底材料中并与基底材料中的原子发生交换时,基底材料的组成就会发生变化,整个过程不发生化学反应,属于物理刻蚀。这种干法刻蚀工艺通过控制气体流速、电极功率和离子能量等进行刻蚀,具有可控性好、精度高、加工效率高等优点。2017年,Liu等^[50]利用干法刻蚀辅助飞秒激光加工技术在硅晶片表面制备了均匀排列的凹面微透镜阵列,如图8所示。他们利用飞秒激光在硅晶片表面加工出微孔阵列结构的改性区域,然后将硅样品置于感应耦合等离子体仪器(ICP)中进行刻蚀,使改性区域在六氟化硫气体的等离子体环境下进一步刻蚀,形成均匀排列的微透镜阵列。干刻蚀形成的结构的直径和高度可以通过改变激光功率、脉冲数和刻蚀时间来进行调节。这种方法可以显著提高复杂的2.5D结构的制造效率。2019年,该课题组^[51]再次利用干法刻蚀辅助飞秒激光加工技术制造了超光滑的蓝宝石凹面微透镜阵列均质器,加工过程如图9所示。该均质器利用蓝宝石凹面微透镜阵列高透射率($>70\%$)和低表面粗糙度(1.1 nm)的优点,成功地实现了高通量(5 J/cm^2)和宽带(266, 532, 808 nm)激光束的均质化。

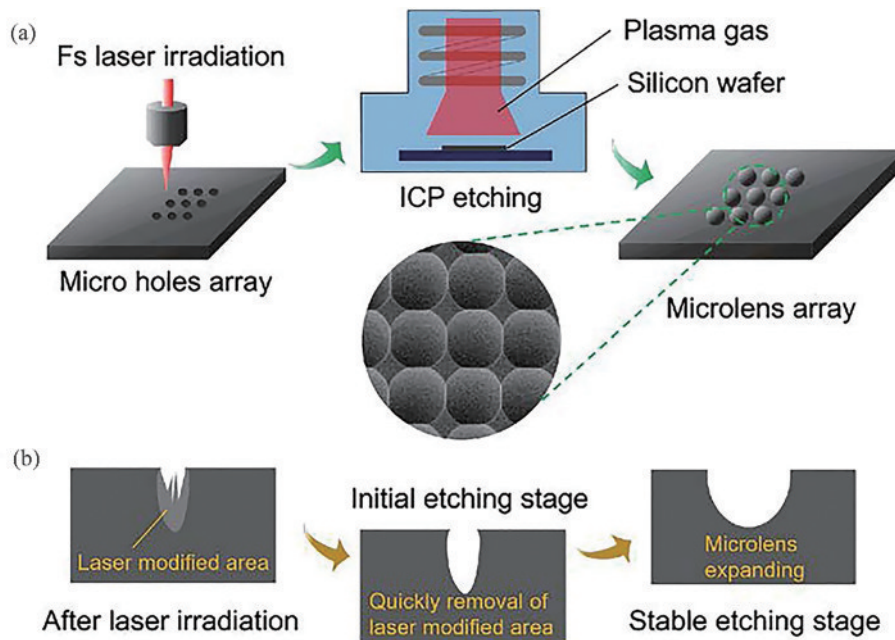


图 8 干法刻蚀辅助飞秒激光制造硅凹结构^[50]。(a)加工过程示意图,插图为硅凹结构的 SEM 图像;(b)用于说明蚀刻过程的凹结构的横截面轮廓示意图

Fig. 8 Dry etching assisted femtosecond laser manufacturing silicon concave structure^[50]. (a) Schematic of dry etching assisted femtosecond laser manufacturing silicon concave structure, and the inset is SEM image of the silicon concave structure; (b) schematic of cross-sectional profiles of the concave structures to illustrate the etching process

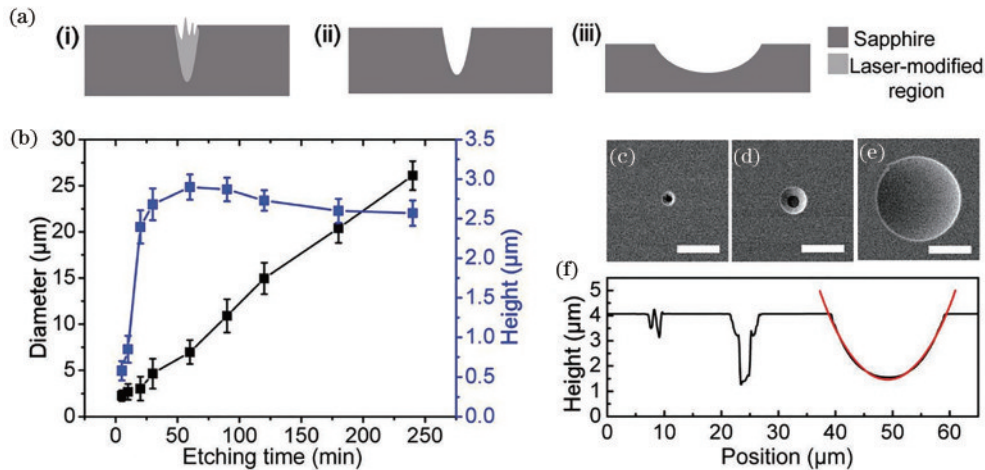


图 9 微透镜的制造和表征^[51]。(a)采用干法刻蚀辅助飞秒激光制造蓝宝石凹面微透镜,(i)激光照射以制造微孔,(ii)在初始蚀阶段快速去除激光改性区域,(iii)增加蚀刻时间后形成凹面微透镜;(b)蓝宝石凹面微透镜的直径和高度与蚀刻时间之间的关系;(c)~(e)微孔的 SEM 图像,分别刻蚀 0 min、30 min 和 180 min;(f)图(c)~(e)中微结构的横截面轮廓和图(e)中微透镜的拟合曲线

Fig. 9 Fabrication and characterization of a microlens^[51]. (a) Manufacture of sapphire concave microlenses by dry etching assisted femtosecond laser, (i) laser irradiation for the fabrication of microholes, (ii) rapid removal of laser-modified regions in the initial etching stage, (iii) formation of concave microlens after increasing the etching time; (b) relationship between the diameter and height of sapphire concave microlens and etching time; (c)–(e) SEM images of a microhole, and etching for 0 min, 30 min, and 180 min, respectively; (f) cross-section profiles of microstructures in Fig. 9 (c)–(e) and the fitting curve of the microlens in Fig. 9 (e)

3 微透镜阵列的应用

研究微透镜阵列制备方法的目的是尽可能使制造出的微透镜满足尺寸精度要求并制造出形貌多样的功能结构,使其能广泛应用到实际工程中,推动微工程系统、光纤通信、光信息处理和光传感技术的发展。目前,微透镜阵列已在光纤耦合器、光场相机、光场显微镜、波前传感器、激光照明、光束整形、生物芯片等方面取得了重要应用。2000年,日本科学家 Tanida 领导的研究小组^[52]提出了一种类蜻蜓复眼结构的小型成像系统,如图 10 所

示,该系统由微透镜阵列、分割层、光电探测器阵列三部分组成。将此成像系统用在仿生复眼探测器中,通过对大视场探测得到的目标信息进行相应的技术处理,可以实现探测跟踪目标、敌我识别、探测速度等。2003年,德国斯图加特大学的 Seifert 等^[53]研制了自适应调节的夏克-哈特曼(Shack-Hartmann)传感器,如图 11 所示,该传感器利用能够产生菲涅耳微透镜阵列的液晶显示器代替静态微透镜阵列,实现了对波前的预校正,可满足更大的像差,并获得了更高的测量精度。斯坦福大学的 Levoy 课题组^[54]研制了几种用于捕获光场的设备,

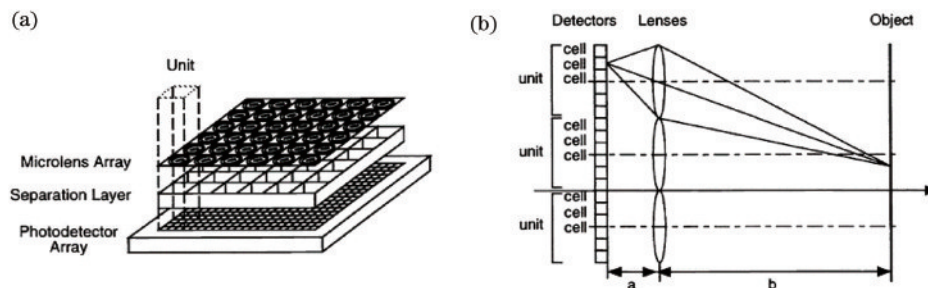
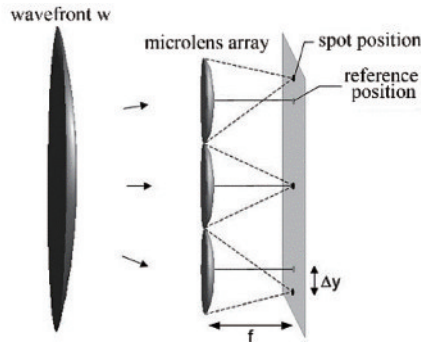
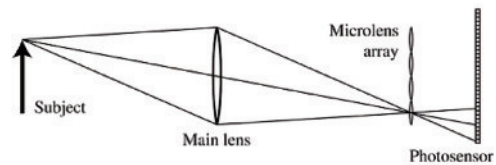
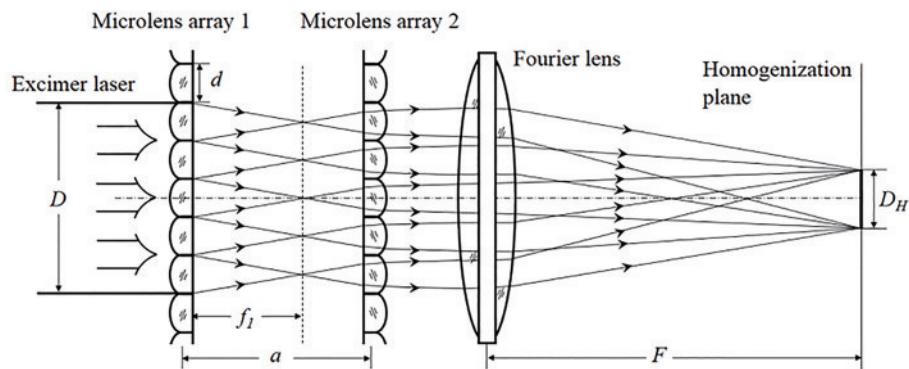


图 10 TOMBO 复眼成像系统示意图^[52]。(a)TOMBO 系统;(b)TOMBO 架构的光学系统
Fig. 10 Schematic of TOMBO compound eye imaging system^[52]. (a) TOMBO system;
(b) optical system of TOMBO architecture

图 11 Shack-Hartmann 传感器示意图^[53]

并在文献[54]中特别提及了Ng等发明的第一台基于微透镜阵列的手持光场相机(其示意图如图12所示),通过在相机主透镜和传感器之间插入微透镜阵列来记录进入相机的光线的方向信息。Levoy等^[54]在光学显微镜的中间像面插入微透镜阵列,以相同的方式捕获了生物样本的光场,这种能够记录生物样本四维光场的设备被称作光场显微镜。2016年,Jin等^[55]设计了用于准分子激光器的微透镜光束均化系统(如图13所示)。他们将自由曲面微透镜阵列作为均化器的第一个光学组件,阵列中的每个有效自由曲面都可以在波前引入适当的像差,以重新分布离子束的辐照度,对光束进行整形后,可在相对较近的工作距离内实现大规模且高度均匀的光束轮廓。Hung等^[56]提出了一种创新的芯片

实验室系统(如图14所示)。他们对集成在塑料微流控芯片中的超灵敏微透镜阵列进行了多重固相聚合酶链反应(PCR),其中的微透镜阵列是基于超临界角荧光原理设计制作而成的,锥形微光学结构能够在超临界角度收集荧光,使灵敏度显著提高40倍。这种带有超临界角荧光微透镜阵列的芯片实验室系统能够实现高灵敏度检测,并能对多重病原体进行检测,已被广泛用在分析食品和环境样品的高通量生物传感器中。2018年,Zhou等^[57]通过将双凸透镜微透镜阵列结合到分立的白色有机发光二极管(WOLED)光源的基板上,实现了所需的准直平面非相干光源(CPILS),如图15所示;与普通的常规器件相比,所获得的准直WOLED光源在正常极角处显示的亮度提高了2.7倍,同时实现了半峰全宽为33.6的角度集中光发射。这种方法有望成为实现大规模CPILS的替代方法,在LCD背光源、三维显示器、汽车前照灯等领域具有一定的潜在应用价值。

图 12 光场相机示意图^[54]图 13 基于准分子激光器的微透镜阵列光束均化系统示意图^[55]Fig. 13 Schematic of beam homogenization system of microlens array based on excimer laser^[55]

飞秒激光技术在保证其所制备的微透镜阵列具有体积小、精度高、光学性能优异的同时,实现了多种形貌微透镜阵列的灵活制造,能够满足微工程系统和光学系统对高精度微小器件的需求。飞秒激光加工与多种技术的结合能够大大提高制造效率,制备得到的微透镜阵列具有良好的复制性,而且可以在微通道内实现直接集成制造。2015年,

Wu等^[58]利用双光子聚合技术将7个微透镜组成的微光学器件高精度地集成到微流体中得到了光流微芯片,该芯片能够监测穿过通道宽度的任何位置的细胞;他们通过观察7个微透镜的强度随时间的变化来进行细胞检测(如图16所示),最终获得了高达93%的成功率。这种集成光流微芯片对于光流体应用中的光学传感、荧光分析和细胞检测至关重

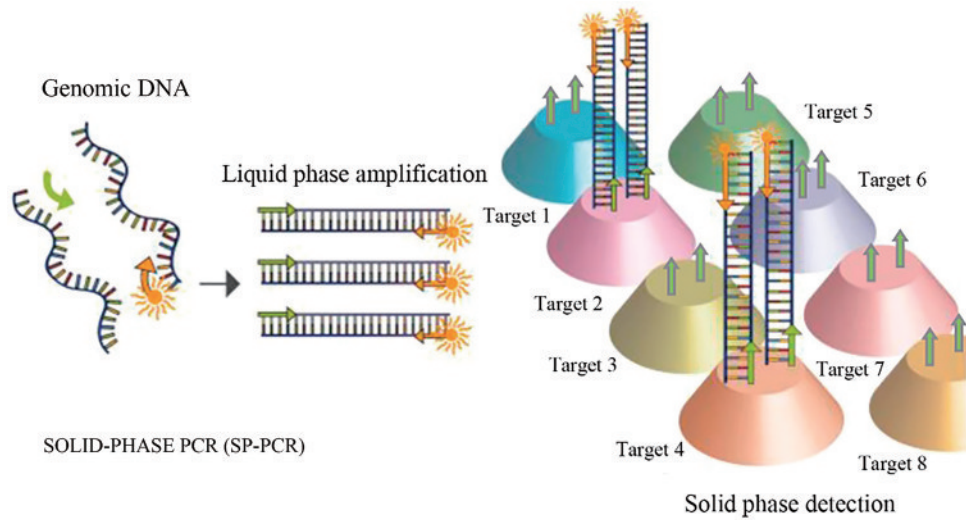


图 14 在超临界角荧光微透镜阵列上进行固相 PCR 的示意图^[56]

Fig. 14 Schematic of solid-phase PCR on a supercritical angle fluorescent microlens array^[56]

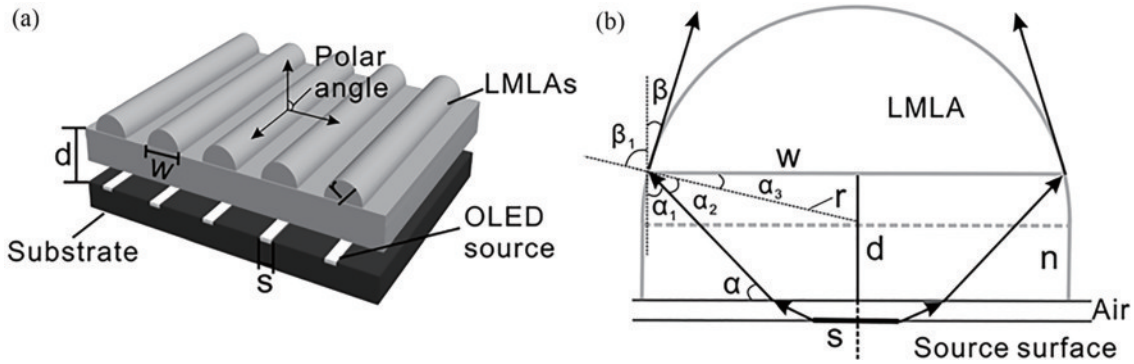


图 15 准直 OLED 光源的示意图^[57]。(a) 结构; (b) 几何参数

Fig. 15 Schematic of collimated OLED light source^[57]. (a) Structure; (b) geometric parameters

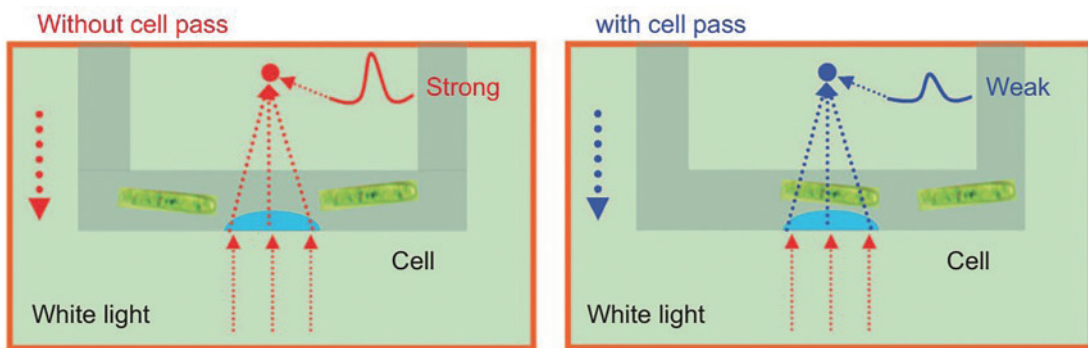


图 16 基于集成的光流微芯片进行细胞检测的原理图^[58]

Fig. 16 Schematic of cell detection based on integrated optical flow microchip^[58]

要。Deng 等^[59]利用湿法刻蚀辅助飞秒激光烧蚀的方法在尺寸为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的硅膜上获得了具有可调尺寸和附加非球面轮廓的微型凹面透镜,如图 17 (a)、(b)所示。由于该微型凹面透镜在红外(IR)波段的透明性,这些凹硅微透镜阵列能简单地扩展到红外光波段以进行均质化[如图 17(c)、(d)所示],可

作为反射均质器,在红外宽视场成像、检测和波束整形中具有潜在的应用前景。2016年,Deng 等^[47]研制了大型人工复眼,该复眼的平均直径为 $24.5\text{ }\mu\text{m}$,数量约为 30000 个,填充率达 100%,单只复眼的视场(FOV)可达 140° ,复眼的总质量仅为 67 mg,集成到其他系统中不会引起过多增重。此外,在不同入射

角的焦点之间的比较显示了该人工复眼的无畸变成像(如图 18 所示),该复眼可应用于机器人探测追踪和微型飞行器中。2019 年, Li 等^[60]将飞秒激光湿法刻蚀和飞秒激光直写技术相结合制备了超疏水性 PDMS 微透镜阵列,该微透镜阵列具有极好的成像

性能,而且其超低的黏合力和超高的疏水性还使其具有出色的抗水能力和自清洁功能,如图 19 所示。这种功能性微透镜阵列适用于太阳能电池、医疗内窥镜以及其他经常在潮湿环境或室外使用的光学系统中。

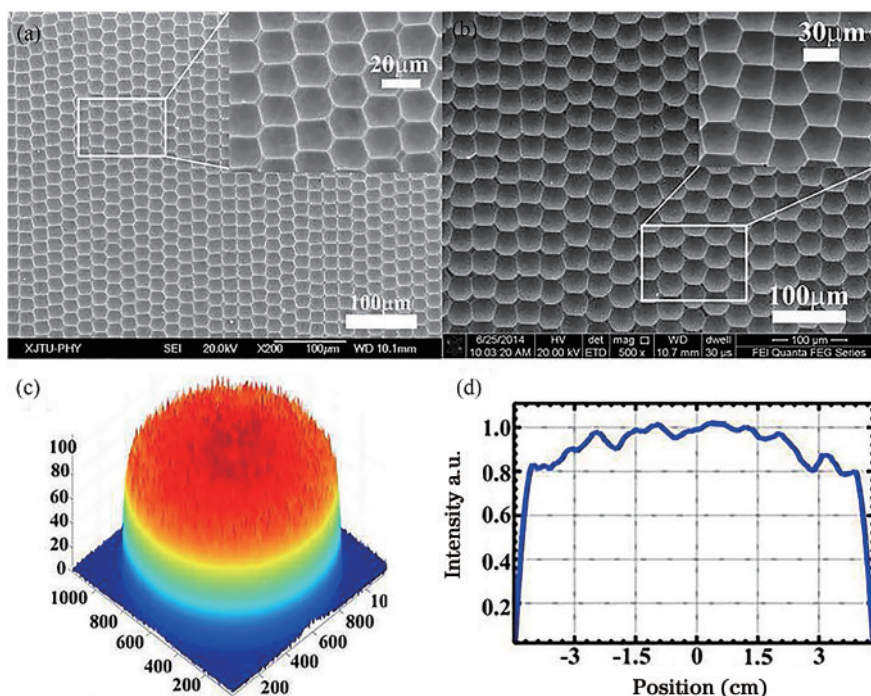


图 17 非球面轮廓的微型凹面透镜^[59]。(a)(b)平均直径为 20 μm 和 30 μm 的微型凹面透镜的 SEM 图像; (c)(d)微透镜阵列的 3D 强度分布和截面轮廓

Fig. 17 Miniature concave lens with aspheric profile^[59]. (a) (b) SEM images of miniature concave lenses with an average diameter of 20 μm and 30 μm; (c) (d) 3D intensity distribution and cross-sectional profile of microlens array

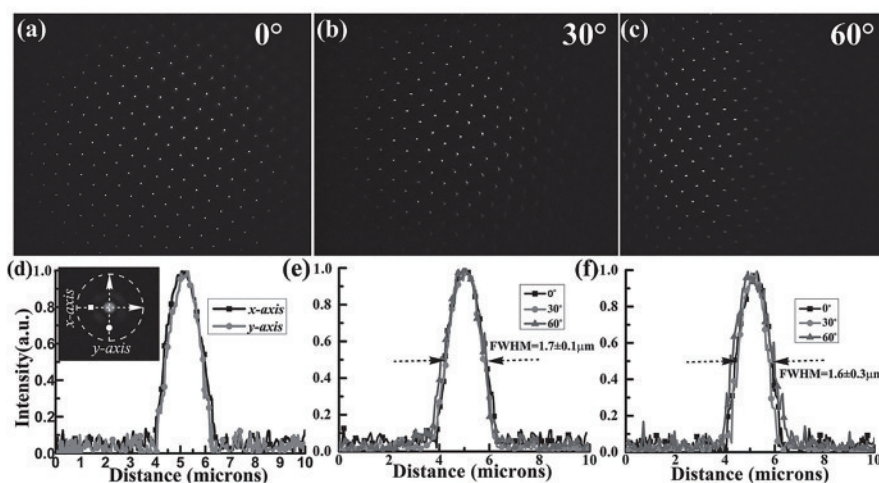


图 18 人工复眼的宽视场^[47]。(a)~(c)人工复眼在 0°、30°、60°入射角下的输出成像; (d) $\theta=0^\circ$ 时沿 x 轴和 y 轴的强度分布, 插图是单个焦点的显微镜图像; (e) (f) 入射角为 0°、30°、60° 时 x 和 y 方向强度分布的比较

Fig. 18 Wide FOV of artificial compound eyes^[47]. (a)~(c) Output imaging of artificial compound eyes at 0°, 30°, and 60° angle of incidence; (d) intensity distribution along x and y axes for θ equal to 0°, and the inset is a microscope image of a single focal spot; (e) (f) comparison of x - and y -direction intensity distributions under incident angles of 0°, 30°, and 60°

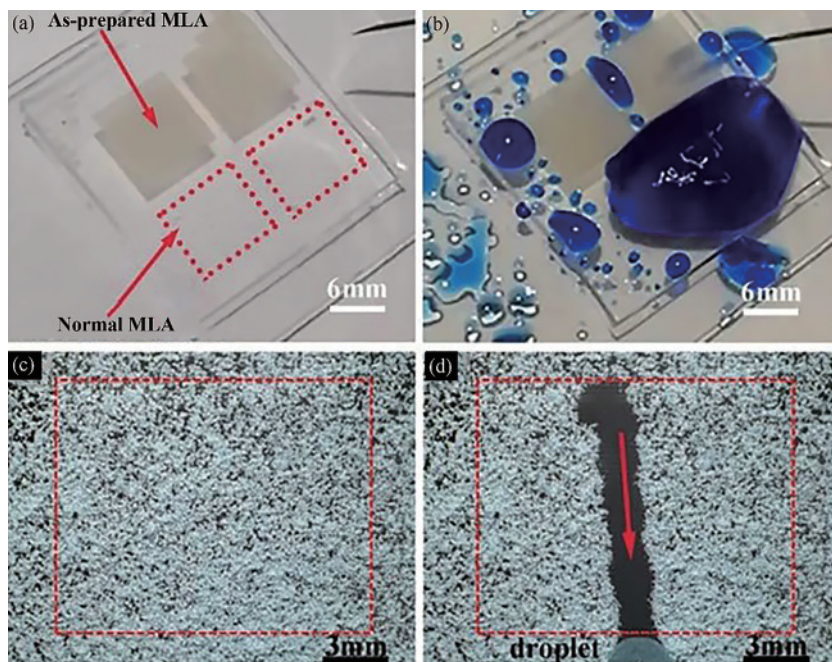


图 19 超疏水微流控阵列^[60]。(a)由超疏水性微流控阵列域和正常微流控阵列域组成的 PDMS 表面；(b)随机向整个样品表面喷水；(c)被污染的样品；(d)水滴滚走后的受污染表面

Fig. 19 Superhydrophobic microfluidic array^[60]. (a) PDMS surface composed of both the superhydrophobic microfluidic arrays domain and normal microfluidic arrays domain; (b) spraying a jet of water onto the whole sample surface randomly; (c) photography of contaminated samples; (d) photography of the polluted surface after water droplet rolling away

4 结束语

随着科学技术的发展,光学元件的微型化势必使分立元件向阵列元件发展。要发挥光子作为信息载体所具有的高速度、并行性和巨大的互连能力,就必须发展微透镜阵列元件。因此,研究微透镜阵列的制备方法就成为微光学领域极其重要的前沿课题之一。飞秒激光技术作为一种高精度、高分辨率、可程序化设计和三维结构直写的微透镜阵列加工方式,具有其他加工方式不可比拟的优势。近年来,人们已利用飞秒激光技术制备了多种功能性微透镜阵列,例如仿生复眼、液晶微透镜阵列、红外微透镜阵列和超疏水/油性微透镜阵列,其轮廓包括凹面、凸面、曲面和球面,所使用的材料主要以玻璃、硅、PDMS 和蓝宝石为主^[61-67]。飞秒激光加工与各种技术的结合已成为制备微透镜阵列的新方向。例如,飞秒激光与湿法/干法刻蚀相结合可以提高制造效率,与热压印技术相结合可以制造凸微透镜阵列,与空间光调制器相结合能够实现多光点并行制造。本文介绍了微透镜阵列的基本功能和应用领域,分析了常规制备方法的优缺点,论述了飞秒激光加工技术制备微透镜阵列的研究进展。

飞秒激光双光子聚合技术和化学刻蚀辅助飞秒激光烧蚀加工技术都具有灵活制造复杂微结构的能力,使得飞秒激光加工技术成为重要的微透镜阵列的加工方式。

目前,飞秒激光制备微透镜阵列已得到了一定发展,然而在实际制造和应用中仍然存在一些问题,如:飞秒激光双光子聚合因其逐点扫描的加工方式,往往需要花费数小时才能完成微纳米器件的制造,这使得它在实现大尺度结构和高精度加工之间存在着矛盾,不适用于实际生产。采用湿法或干法刻蚀辅助飞秒激光烧蚀的加工方式能够进一步提高制造效率,获得光滑的表面结构;然而,借助腐蚀液和刻蚀腔进一步刻蚀时可控性不高,微结构尺寸不易控制,得到的微透镜形貌较为单一,需要进一步优化工艺;而且激光烧蚀的减材加工方式,使得制备的结构均为凹面透镜阵列,需要借助复制工艺获得凸面透镜阵列。此外,这两种技术在加工效率上都有待进一步提升。将空间光调制器引入飞秒激光加工系统是制造复杂微光学和光子器件的有效方法,有望实现高速、大批量的工业生产。

尽管飞秒激光制备微透镜阵列还存在一些不

足之处,但通过飞秒激光加工技术的持续优化升级以及新型激光器的研发,微透镜阵列将在尺寸精度、制造效率以及材料选择上有所突破。可以肯定的是,随着工业需求的扩大,飞秒激光技术将会与更多的科学技术相结合,获得复杂灵活且兼具独特功能的微透镜阵列,从而推动光纤通信、光学传感、全视角成像、生物医疗检测以及其他微光学系统的发展,促进国民经济的发展和国家科技的进步。

参 考 文 献

- [1] Mukaida M, Yan J W. Ductile machining of single-crystal silicon for microlens arrays by ultraprecision diamond turning using a slow tool servo[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 115: 2-14.
- [2] Wang M R, Su H. Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (32) : 7568-7576.
- [3] Su C H, Pan C T. Fabrication of high fill factor optical film using two-layer photoresists[J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55(1) : 33-42.
- [4] McCall B, Tkaczyk T S. Rapid fabrication of miniature lens arrays by four-axis single point diamond machining [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (3) : 3557-3572.
- [5] Wang W, Zhou C H. New technology for fabrication of polymer microlens arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11) : 2869-2872.
王伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术 [J]. *中国激光*, 2009, 36(11) : 2869-2872.
- [6] Lim C S, Hong M H, Lin Y, et al. Microlens array fabrication by laser interference lithography for super-resolution surface nanopatterning [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19) : 191125.
- [7] Chang C Y, Yang S Y, Chu M H. Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(2) : 355-361.
- [8] Haske W, Chen V W, Hales J M, et al. 65 nm feature sizes using visible wavelength 3-D multiphoton lithography [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6) : 3426-3436.
- [9] Kim H H, O B H, Lee S G, et al. Fabrication of novel double microlens using two step soft lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(5/6/7/8) : 1033-1036.
- [10] Minh P N, Ono T, Haga Y, et al. Batch fabrication of microlens at the end of optical fiber using self-photolithography and etching techniques [J]. *Optical Review*, 2003, 10(3) : 150-154.
- [11] Zhu L, Gao Y Y, Hu X Y, et al. Progress in femtosecond laser fabrication of artificial compound eye [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(12) : 1254-1267.
朱琳, 高圆圆, 胡昕宇, 等. 飞秒激光仿生复眼制造进展 [J]. *科学通报*, 2019, 64(12) : 1254-1267.
- [12] Guo R, Xiao S, Zhai X, et al. Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization [J]. *Optics Express*, 2006, 14(2) : 810-816.
- [13] Chen F, Zhang D S, Yang Q, et al. Bioinspired wetting surface via laser microfabrication [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(15) : 6777-6792.
- [14] Kato J I, Takeyasu N, Adachi Y, et al. Multiple-spot parallel processing for laser micromanufacturing [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(4) : 044102.
- [15] Matsuo S, Juodkakis S, Misawa H. Femtosecond laser microfabrication of periodic structures using a microlens array [J]. *Applied Physics A*, 2005, 80 (4) : 683-685.
- [16] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8) : 554-560.
- [17] Shi Y, Xu B, Wu D, et al. Research progress on fabrication of functional microfluidic chips using femtosecond laser direct writing technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10) : 1000001.
史杨, 许兵, 吴东, 等. 飞秒激光直写技术制备功能化微流控芯片研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46 (10) : 1000001.
- [18] Luo S Z, Chen Z, Li X K, et al. Controlling quantum states of atoms and molecules by ultrafast femtosecond laser fields [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1) : 0126007.
罗嗣佐, 陈洲, 李孝开, 等. 超快飞秒激光场中原子分子量子态调控 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1) : 0126007.
- [19] Serbin J, Egbert A, Ostendorf A, et al. Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5) : 301-303.
- [20] Kelly B E, Bhattacharya I, Heidari H, et al.

- Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction[J]. *Science*, 2019, 363(6431): 1075-1079.
- [21] Saha S K, Wang D E, Nguyen V H, et al. Scalable submicrometer additive manufacturing[J]. *Science*, 2019, 366(6461): 105-109.
- [22] Babushok V I, DeLucia F C, Jr, Gottfried J L, Jr, et al. Double pulse laser ablation and plasma: laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2006, 61(9): 999-1014.
- [23] Bonse J, Höhm S, Kirner S V, et al. Laser-induced periodic surface structures: a scientific evergreen [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(3): 1.
- [24] Zhang Y L, Chen Q D, Xia H, et al. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing [J]. *Nano Today*, 2010, 5(5): 435-448.
- [25] Žukauskas A, Malinauskas M, Reinhardt C, et al. Closely packed hexagonal conical microlens array fabricated by direct laser photopolymerization [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 4995-5003.
- [26] Yan W S, Hossain M M, Gu M. High light-directing micrometer-sized parabolic mirror arrays [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3177-3180.
- [27] Ergin T, Stenger N, Brenner P, et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths [J]. *Science*, 2010, 328(5976): 337-339.
- [28] Sun H B, Kawakami T, Xu Y, et al. Real three-dimensional microstructures fabricated by photopolymerization of resins through two-photon absorption [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(15): 1110-1112.
- [29] Hu Y L, Chen Y H, Ma J Q, et al. High-efficiency fabrication of aspheric microlens arrays by holographic femtosecond laser-induced photopolymerization [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(14): 141112.
- [30] Xing J F, Zheng M L, Duan X M. Two-photon polymerization microfabrication of hydrogels: an advanced 3D printing technology for tissue engineering and drug delivery[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(15): 5031-5039.
- [31] Malinauskas M, Purlys V, Rutkauskas M, et al. Two-photon polymerization for fabrication of three-dimensional micro- and nanostructures over a large area [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7204: 72040C.
- [32] Wu D, Chen Q D, Niu L G, et al. 100% fill-factor aspheric microlens arrays (AMLA) with sub-20-nm precision[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(20): 1535-1537.
- [33] Wu D, Niu L G, Wu S Z, et al. Ship-in-a-bottle femtosecond laser integration of optofluidic microlens arrays with center-pass units enabling coupling-free parallel cell counting with a 100% success rate[J]. *Lab on a Chip*, 2015, 15(6): 1515-1523.
- [34] 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.
- [35] Kuang Z, Perrie W, Leach J, et al. High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 2284-2289.
- [36] Smalley D E, Smithwick Q Y J, Bove V M, et al. Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays[J]. *Nature*, 2013, 498(7454): 313-317.
- [37] Yang L, El-Tamer A, Hinze U, et al. Parallel direct laser writing of micro-optical and photonic structures using spatial light modulator [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 26-32.
- [38] Lin J Q, Kan Y D, Jing X, et al. Design and fabrication of a three-dimensional artificial compound eye using two-photon polymerization [J]. *Micromachines*, 2018, 9(7): E336.
- [39] He Z Q, Lee Y H, Chanda D, et al. Adaptive liquid crystal microlens array enabled by two-photon polymerization [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 21184-21193.
- [40] Peng Y, Jradi S, Yang X Y, et al. 3D photoluminescent nanostructures containing quantum dots fabricated by two-photon polymerization: influence of quantum dots on the spatial resolution of laser writing [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(2): 1800522.
- [41] Liu H G, Lin W X, Lin Z Y, et al. Self-organized periodic microholes array formation on aluminum surface via femtosecond laser ablation induced incubation effect [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(42): 1903576.
- [42] Ródenas A, Gu M, Corrielli G, et al. Three-dimensional femtosecond laser nanolithography of crystals [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2):

- 105-109.
- [43] Chen F, Yang Q, Bian H, et al. Micro-nano fabrication of femtosecond laser wet etch[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 150-154.
陈烽, 杨青, 边浩, 等. 飞秒激光湿法刻蚀微纳制造[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 150-154.
- [44] Tian Y X, Zhang F, Ding K W, et al. Fabrication of micro-pillar array on silicon surface by femtosecond laser direct writing mask[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 183201.
田亚湘, 张帆, 丁铠文, 等. 飞秒激光直写掩模制作硅表面微柱阵列[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 183201.
- [45] Liu F, Zhang F, Bian H, et al. Development and preparation of refractive infrared microlens array device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071607.
刘丰, 张帆, 边浩, 等. 折射型红外微透镜阵列器件的发展及制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 071607.
- [46] 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]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20334-20343.
- [47] Deng Z F, Chen F, Yang Q, et al. Dragonfly-eye-inspired artificial compound eyes with sophisticated imaging[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(12): 1995-2001.
- [48] Cao X W, Chen Q D, Zhang L, et al. Single-pulse writing of a concave microlens array[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 831-834.
- [49] Li M J, Li M J, Yang Q, et al. Underwater superoleophobic and anti-oil microlens array prepared by combing femtosecond laser wet etching and direct writing techniques[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35903-35913.
- [50] Liu X Q, Chen Q D, Guan K M, et al. Dry-etching-assisted femtosecond laser machining[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(3): 1600115.
- [51] Liu X Q, Yang S N, Yu L, et al. Rapid engraving of artificial compound eyes from curved sapphire substrate[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(18): 1900037.
- [52] Tanida J, Kumagai T, Yamada K, et al. Thin observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4089: 1030-1036.
- [53] Seifert L, Liesener J, Tiziani H J. The adaptive Shack-Hartmann sensor[J]. *Optics Communications*, 2003, 216(4/5/6): 313-319.
- [54] Levoy M, Zhang Z, McDowall I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays[J]. *Journal of Microscopy*, 2009, 235(2): 144-162.
- [55] Jin Y H, Hassan A, Jiang Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser beam shaping[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 24846-24858.
- [56] Hung T Q, Chin W H, Sun Y, et al. A novel lab-on-chip platform with integrated solid phase PCR and supercritical angle fluorescence (SAF) microlens array for highly sensitive and multiplexed pathogen detection[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 90: 217-223.
- [57] Zhou L, Bai G L, Guo X, et al. Light beam shaping for collimated emission from white organic light-emitting diodes using customized lenticular microlens arrays structure[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(20): 201902.
- [58] Wu D, Xu J, Niu L G, et al. In-channel integration of designable microoptical devices using flat scaffold-supported femtosecond-laser microfabrication for coupling-free optofluidic cell counting[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(1): e228.
- [59] Deng Z F, Yang Q, Chen F, et al. Fabrication of large-area concave microlens array on silicon by femtosecond laser micromachining[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1928-1931.
- [60] Li M J, Yang Q, Chen F, et al. Integration of great water repellence and imaging performance on a superhydrophobic PDMS microlens array by femtosecond laser microfabrication[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(3): 1800994.
- [61] Bian H, Wei Y, Yang Q, et al. Direct fabrication of compound-eye microlens array on curved surfaces by a facile femtosecond laser enhanced wet etching process[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(22): 221109.
- [62] Wu D, Wang J N, Niu L G, et al. Bioinspired fabrication of high-quality 3D artificial compound eyes by voxel-modulation femtosecond laser writing for distortion-free wide-field-of-view imaging[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(8): 751-758.
- [63] Salter P S, Booth M J. Addressable microlens array for parallel laser microfabrication[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2302-2304.

- [64] Deng C, Kim H, Ki H. Fabrication of a compound infrared microlens array with ultrashort focal length using femtosecond laser-assisted wet etching and dual-beam pulsed laser deposition [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28679-28691.
- [65] Liu X Q, Yu L, Yang S N, et al. Optical nanofabrication of concave microlens arrays [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(5): 1800272.
- [66] Pan A, Chen T, Li C X, et al. Parallel fabrication of silicon concave microlens array by femtosecond laser irradiation and mixed acid etching [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 052201.
- [67] Pan A, Gao B, Chen T, et al. Fabrication of concave spherical microlenses on silicon by femtosecond laser irradiation and mixed acid etching [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15245-15250.