激光埋种辅助刻蚀制备微凹透镜阵列

刘墨南¹, 杨罕², 孙洪波^{2*}

1. 吉林大学物理学院, 凝聚态物理系, 长春 130012;

2. 吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子重点实验室, 长春 130012

*联系人, E-mail: hbsun@jlu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-23; 接受日期: 2020-05-22; 网络出版日期: 2020-07-09

国家自然科学基金(编号: 51501070)资助项目

摘要 微透镜阵列作为微光学领域的一种重要元件, 如何实现其高效加工一直是本领域亟需解决的技术环节. 但是传统加工方法无法兼顾加工效率和加工质量, 激光埋种辅助刻蚀方法可实现微凹透镜阵列的高效制备和微加工. 本文回顾了这种新微加工方法的一系列探索工作, 即采用空间光调制器对飞秒激光进行相位调制, 提供一种“激光埋种辅助刻蚀”的方法. 该方法利用相位调制得到的多个焦点替代单个焦点进行曝光, 实现了对微凹透镜阵列的并行加工; 同时, 结合对多个焦点的相对能量和空间位置的调节, 能够实现对每个微凹透镜形貌和光学参数的调控; 从根本上改变了以往激光直写加工中对微纳结构逐点扫描的加工方式, 从而实现了微阵列结构的高效、高质量加工.

关键词 单脉冲曝光, 飞秒激光, 微透镜阵列, 微加工

PACS: 42.65.Re, 42.30.-d, 42.65.Fc

1 引言

微透镜阵列一般指具有二维或三维排列的光学透镜, 其孔径在微米量级. 早在20世纪40年代, Dennis Gabor就提出了利用一组微米尺寸的透镜作为超透镜, 可实现对衍射极限的突破^[1]. 时至今日, 由此衍生的微透镜阵列, 已成为电荷耦合器(CCD)照相机/传感器、光纤耦合器、光学开关、LED等多种光学元件的基本组件^[2-4]. 因此, 微透镜阵列的加工在集成光学领域一直是一个重要课题. 现有制备微透镜阵列结构的方法包括: 离子束刻蚀^[1]、湿刻蚀、光刻胶热回流^[5]、喷

墨打印^[1]等. 在集成光学应用中, 考虑到对光学元件的高加工质量要求, 人们更倾向采用光刻、离子交换等方法制备微透镜阵列结构. 然而, 这些方法要么成本高, 要么加工对象仅限于聚合物等软材料, 难以满足工业化量产的加工需求^[1].

飞秒激光直写技术作为一种具有高精度和高图案化水平的真三维加工技术, 可以在任意材料上实现任意三维形貌的加工^[6,7]. 在以往的工作中, 我们已经利用飞秒激光直写成功地加工出具有高填充因子的高质量微透镜阵列. 例如, 为了解决在平板衬底上所加工的微透镜阵列的场曲问题, 利用飞秒激光直写设计加工

引用格式: 刘墨南, 杨罕, 孙洪波. 激光埋种辅助刻蚀制备微凹透镜阵列. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 084213

Liu M N, Yang H, Sun H-B. Concave microlens arrays through an etching-assisted laser seeding method (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 084213, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0142](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0142)

从边缘到中心曲率半径渐变分布的微透镜阵列结构^[8]. 再如, 以仿生器件即仿生复眼为目标, 探索曲面衬底上的微透镜阵列加工, 采用轮廓扫描→精细扫描的分步扫描方式, 在保证高加工质量的前提下显著缩短了曲面衬底上的微凸透镜阵列的加工时间^[9]. 然而, 传统的飞秒激光直写技术本质为串行加工过程, 即对于微透镜阵列中的每个微透镜, 需要逐个进行扫描加工以实现精准三维图案化, 加工时间长, 效率低^[10].

为了从根本上解决这一问题, 即实现高质量微透镜阵列的高效率加工, 同时灵活调控阵列中单个微透镜的光学参数, 我们提出了一种基于飞秒激光单脉冲曝光的微透镜阵列加工新方法, 即“激光埋种辅助刻蚀法”. 以飞秒激光单脉冲进行单点单次曝光, 一次性定义微透镜阵列中每个透镜的位置与尺寸, 再用湿法刻蚀使微透镜结构快速成型, 从而实现飞秒激光对微结构阵列的并行加工. 本文对这一系列工作进行了简要回顾, 重点探讨了激光埋种辅助刻蚀制备微凹透镜阵列的加工原理和加工参数对结构的影响, 并进一步探讨了如何通过对飞秒激光焦点的灵活相位调制实现对微透镜曲率半径和截面轮廓的有效调控, 从而实现其光学性能的优化和可设计性.

2 单脉冲曝光飞秒激光加工系统

图1(a)为单脉冲曝光飞秒激光加工系统. 从激光器出射的波长为514 nm、重复频率为230 fs的飞秒激光, 入射至具有高填充因子(93%)的反射型液晶空间光调制器(LCOS-SLM, LETO, HOLOEY Photonics AG). 经由SLM调制后的反射光先经过一个望远镜系统(由透镜F1和F2组成), 然后入射至物镜, 并最终聚焦至待加工衬底. 所用xy移动加工台的分辨率为100 nm, 动态区间为20 mm×20 mm, 用以进行大面积微阵列扫描加工^[11].

3 单脉冲曝光“激光埋种刻蚀法”

飞秒激光直写技术是利用飞秒激光脉冲的高能量对材料表面进行烧蚀而达到材料去除的加工效果, 进而可实现任意三维形状的加工. 利用飞秒激光直写对材料表面进行逐点扫描, 可直接获得高精度和高复杂度的表面微结构. 近年来, 飞秒激光直写已成为加工

玻璃、金属和陶瓷等硬质材料的主流技术^[12-14]. 然而, 单纯依赖飞秒激光直写进行烧蚀加工, 往往需要较高的激光功率支持, 同时逐点扫描的加工方式使得加工时间过长、加工效率低. 高功率扫描对于材料表面损伤较大, 往往造成加工表面粗糙度过高等问题. 仅仅依靠单一技术并不能解决上述问题. 在之前的工作中, 我们尝试用干刻蚀辅助飞秒激光加工来解决这一问题^[15]: 先利用低功率的飞秒激光烧蚀出待加工结构的初步轮廓, 然后以干刻蚀法加速待加工结构最终成型. 这种方法虽然比全直写过程耗时短, 但由于其本质依然是逐点扫描的加工过程, 效率提高并不显著. 据此, 我们提出了一种高效加工微结构阵列的新方法, 即“激光埋种(Laser-seeding)辅助刻蚀法”, 由“激光埋种”和湿法刻蚀分步完成. 所谓“激光埋种”, 是指利用单脉冲曝光直接定义阵列结构. 具体地, 采用空间光调制器(SLM)对飞秒激光进行相位调制, 使其波前形成一系列具有不同相对能量的子束波, 即具有特定空间分布的多个焦点, 并利用调制后的飞秒激光对待加工衬底进行单脉冲一次性曝光. 曝光后, 这些子束波会在衬底表面烧蚀出与之空间位置相对应的“种子”(激光改性区)阵列, 即完成对阵列里每个微结构位置与尺寸的定义. 在这个种子阵列的基础上进行湿法刻蚀, 即可在保证加工精度的前提下将目标微结构阵列快速成型^[11].

图1(a)为单脉冲激光埋种加工微透镜阵列的飞秒激光光路. 飞秒激光经由扩束后入射至SLM, 经由加载在SLM上的全息相位图调制后, 反射光经过由F1和F2组成的望远镜系统, 最终入射至石英衬底表面. 其中, 全息相位图包含每个子束波的空间位置坐标(X_i , Y_i , Z_i)和其相对能量 E_i (0.1–1). 经由单脉冲曝光所形成的种子阵列, 其每个种子点的位置和曝光能量都由上述子束波决定. 也就是说, 对于待加工的微透镜阵列, 通过全息相位图即可实现对其中单个微透镜的位置和尺寸的精准调控. 例如, 以图1(b)所示的3×3种子阵列示意图为例, 每个圆的尺寸与曝光该点的子束波相对能量 E_i ($i=1, 2, \dots, 9$)对应. 由于曝光能量决定激光改性区域大小乃至最终形成的结构尺寸, 该种子阵列经过刻蚀后, 最终会形成一个每行从左到右直径依次增大的微透镜阵列. 图1(c)和(d)为经由湿法刻蚀后得到的微凹透镜阵列结构的整体形貌. 根据共聚焦显微镜表征, 可进一步得到经过湿法刻蚀后形成的微透镜表面的粗

图 1 (网络版彩图)单脉冲曝光“激光埋种刻蚀法”. (a) “激光埋种刻蚀法”加工光路示意图; (b) 3×3 种子点阵示例, 其中每个种子点直径对应其曝光的相对能量; 单脉冲曝光形成的种子点阵的共聚焦显微镜照片(c)和原子力显微镜截面分析图(d); (e) “激光埋种刻蚀法”制备的六角密排的微透镜阵列示例, 其中插入图为其六角密排的种子点阵示意图^[11]. 版权©2018, 美国光学学会

Figure 1 (Color online) “Laser-seeding-etching” method via single pulse exposure. (a) Fabrication system of the method. (b) An example of a 3×3 seed array in schematic. The diameter of each seed corresponds to the relative energy in exposure. (c) Confocal microscope image and (d) AFM cross-section analysis of the seed arrays formed by single pulse exposure. (e) An example of a densely-packed hexagonally-arranged microlens array in its confocal microscope image. Inset is a schematic of the densely-packed hexagonally-arranged seed arrays ^[11]. Reprinted with permission from ref. ^[11] © The Optical Society.

糙度结果. 例如, 经过40 min刻蚀形成的微透镜, 其表面粗糙度在10 nm以下. 可以看出, 所得到的微透镜阵列结构均匀, 表面光滑度较高, 说明激光埋种辅助刻蚀法是一种具有高质量的加工方法. 进一步地, 根据不同的图案化需求, 可以对阵列中微凹透镜的排布方式进行调控, 从而得到更复杂多变的阵列结构. 如图1(e)所示, 图中为一组呈六方对称排布的微凹透镜, 插入图为其种子阵列示意图. 在利用全息相位图定义种子阵列时, 将其相对能量设置为从中心到边缘依次递减, 即1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 而飞秒激光初始脉冲能量为7.1 μJ. 再经过40 min的氢氟酸(HF)湿刻蚀, 最终得到图中的微透镜直径渐变的六方对称阵列结构. 对于单个微透镜, 通过改变湿法刻蚀时间可调节其半径大小和深宽比. 从10 min的初始刻蚀时间开始, 随着刻蚀时间的延长, 微透镜的直径/宽度逐渐增大, 而整体深度基本保持不变($\sim 4.0 \mu\text{m}$), 即其深宽比随刻蚀时间的增加而减小. 所能得到的具有光滑内表面的微透镜最小直径为 $\sim 12.7 \mu\text{m}$ (刻蚀时间30 min), 最大深宽比为 ~ 0.315 ^[11].

4 单脉冲曝光调控微透镜数值孔径

前一小节介绍了利用SLM相位调制后的飞秒激光单脉冲, 对待加工衬底进行一次曝光实现了“激光埋种”. 再辅以湿法刻蚀进行高效加工微透镜阵列的方法. 这种新的加工方法能够显著提高微结构阵列的加工效率, 同时保有较高的加工质量. 下一步, 我们考虑在加工中如何通过结构参数的灵活调控, 来实现对所制备光学器件的光学参数的有效调控. 以单个微透镜为例, 其主要光学参数为单个微透镜的焦距 f 和数值孔径(Numerical Aperture, NA), 由以下公式决定:

$$R^2 = (h^2 + r^2) / 2h, \quad (1)$$

$$f = R / (n - 1), \quad (2)$$

$$NA = r / f, \quad (3)$$

其中, R 为微凹透镜的拟合半径(即曲率半径), h 为其结构深度, r 为其半径, n 为折射率(石英 n 值为1.46). 在上述加工方法中, 由于刻蚀形成的结构尺寸(半径 r 和深

度 h)主要依赖于激光一次性烧蚀改性的区域尺寸,因此很难通过后续刻蚀步骤对结构直径和深度进行精准调控.而且,由于湿刻蚀本身具有各向同性的特性,在刻蚀中直径和深度两个参数是相互关联的,导致无法对二者之一进行独立调控.尤其当需要在阵列中加工不同尺寸的微透镜时,虽然改变激光光强能够实现调节微透镜尺寸的目的,然而连续改变激光光强会导致加工效率和灵活性大大降低.据此,我们进一步提出了利用单脉冲曝光调控微透镜曲率半径的方法.一改在前述“激光埋种辅助刻蚀法”中对飞秒激光波前的横向调制,本方法利用SLM将飞秒激光焦点调制成沿光轴(即纵向)排布的多个焦点,从而通过控制焦点个数和其相对能量实现对单个微透镜数值孔径的有效调控^[16].

如图2(a)所示,利用Optimal Rotation Angle (ORA)方法可以设计并生成沿纵向排布的不同个数焦点的相位全息图,其分辨率为 1080×1080 , ORA算法详见参考文献^[10].其中,所生成焦点个数、间距和相对能量均可由全息图定义.以图2(a)为例,焦点间距为 $3 \mu\text{m}$,考虑到待加工衬底石英玻璃的折射率,这些焦点在衬底内部聚焦的实际间距为 $n \times d$,即约为 $4.6 \mu\text{m}$.焦点实际分布情况由图2(b)给出,所用模拟方法为3D Vectorial Diffraction Theory.其中,第一个焦点恰好位于空气和石英玻璃交界面上.前面说过,对于单个焦点曝光生成的种子点,其主要问题是难以有效调节其腐蚀形成的微透镜的曲率半径,如图2(c)的曲线所示.对激光脉冲进行大幅度调节,即分别以能量为358, 453, 545, 642 nJ的激光单脉冲曝光,经过均一条件的刻蚀所形成的微透镜深度 h 从 ~ 3.5 增加到 $\sim 5.2 \mu\text{m}$,半径 r 从 ~ 16 增加至 $\sim 19 \mu\text{m}$,然而拟合后的曲率半径几乎保持不变.这是由于,根据微透镜的曲率半径 R 的公式, r^2 在曲率半径的增加中是主导项;由于调节脉冲能量并不能够大幅度调节所制备微透镜的直径 r ,从而难以调控曲率半径 R .这表明在单焦点曝光方式下,主导微透镜光学参数的曲率半径 R 与脉冲能量呈弱相关,从而导致难以进行光学参数的调控^[16].与之相对地,当我们采用多焦点沿纵向排布的单脉冲对石英衬底曝光后,经过均一条件的刻蚀,可得到如图2(d)和(e)所示的一系列微透镜.由图可知,当焦点个数从1增加至6时,所形成微透镜直径和深度均逐渐增大,深度 h 由 ~ 18 增至 $\sim 21 \mu\text{m}$,而半径 r 由 ~ 19 增至 $\sim 34 \mu\text{m}$.正因为利用纵向

多焦点曝光的方法,可以通过调节焦点个数来大幅度调节所制备微透镜的半径 r ,所以能够最终实现对微透镜数值孔径 NA 的有效调控,如图2(e)所示.由图可知,当纵向排布的焦点数从1增加至6时,对应拟合后的 NA 从0.22增加至0.41,而曲率半径和焦距基本保持不变,分别为 39.5 和 $86 \mu\text{m}$.对于石英玻璃衬底而言,经过烧蚀加腐蚀,最终形成的结构尺寸大小主要由激光脉冲烧蚀时所形成的烧蚀区和改性区的尺寸所决定.而利用纵向排布的多焦点曝光,本质上打破了改性区的各向同性,使其沿纵向显著延伸.因此,在后续的刻蚀中,不同于单焦点曝光时的各向同性的刻蚀情况,纵向刻蚀速度显著高于其他方向,从而使最终得到的微透镜的深度 h 和半径 r 均显著增加,进而实现了对其数值孔径的有效调控^[16].

5 激光埋种辅助刻蚀制备双焦点透镜

除了上述具有球面轮廓的微透镜以外,还有一类具有复杂轮廓/构型的微透镜同样具有光束整形等重要应用^[17].例如,具有双曲面轮廓的微透镜能够整形出一束非对称离散输出光^[18];具有椭圆锥面轮廓的微透镜能够实现发光二极管与单模光纤之间的高效耦合^[18,19];具有圆柱轮廓的微透镜阵列能够增加有机发光二极管面板的发光效率^[18-20]等.在这些具有特殊轮廓的微透镜中,一种具有“lens-on-lens”轮廓的微透镜(即双焦点微透镜)由于其出色的光束整形能力,在光存储等领域具有良好的应用前景^[18].近年来,人们尝试了多种方法来制备双焦点微透镜结构,包括聚合物压印^[17]、金刚石车削^[21]、喷墨打印^[22]等方法.在过去的工作中,我们提出过利用飞秒激光烧蚀-刻蚀的方法来制备双焦点微透镜.这种方法虽然具有高加工质量,但是需要两次烧蚀加刻蚀,二次烧蚀时还需对准前一烧蚀点,导致步骤繁琐.据此,我们进一步提出了激光埋种辅助刻蚀制备双焦点透镜的方法,以实现具有复杂轮廓的微透镜的快速加工^[10].

在前两小节中,利用SLM分别将飞秒激光焦点调制成沿XY平面分布的二维焦点阵列和沿Z轴分布的多个焦点.而为了制备焦点沿Z向排布的双焦点微透镜,仍然利用“激光埋种辅助刻蚀法”,只需将飞秒激光焦点调制成沿光轴排布的两个焦点,然后对待加工衬底石英进行单脉冲曝光,得到对应的上下两个同轴微透

图 2 (网络版彩图)单脉冲曝光调控微透镜数值孔径。(a) 对应沿光轴排布的3, 4, 5个焦点的全息相位图; (b) 调制后的3, 4, 5个焦点分别沿光轴的排布情况; (c) 单焦点曝光形成的微透镜的半径、深度和曲率半径随脉冲能量的变化曲线; (d) 单脉冲曝光并经过40 min刻蚀形成的微透镜的共聚焦显微照片, 其曝光的焦点个数依次为1–6; (e) 对应的截面轮廓; (f) 刻蚀后形成的微透镜的半径和深度随曝光焦点个数的变化曲线; (g) 所形成微透镜的曲率半径、焦距和 NA 随曝光焦点个数的变化曲线^[16]。版权©2019, 美国光学学会

Figure 2 (Color online) Manipulation of microlens NA . (a) Hologram of three, four and five focal spots via optimal rotation angle (ORA) method. (b) Light field distribution for corresponding multi-foci along optical axis. (c) Radius, depth and fitting radius dependence on pulse energy for microlens via single-focus exposure. (d) Top-view of the microlens via multi-foci exposure with unified etching time of 40 min in 20% HF solution (focus number: 1–6). (e) Profile of the microlens via multi-foci exposure. (f) Microlens radius and depth dependence on the focus number. (g) Fitting radius, focal length and NA dependence on the focus number [16]. Reprinted with permission from ref. [16] © The Optical Society.

镜的种子点, 如图3(a)所示. 其中, 第一透镜(First Lens, FL)所对应的种子点位于石英衬底表面, 第二透镜(Second Lens, SL)位于石英衬底内部(即FL种子点正下方), 两个种子点的间距可由全息图灵活调控. 之后再利用湿法刻蚀对曝光后的衬底进行腐蚀, 即可实现双焦点微透镜结构的快速成型, 如图3(b)所示. 图3(c)依次为样品经过10, 20, 30, 40, 50, 60 min腐蚀的结构形貌, 单脉冲曝光所用激光脉冲能量为86 nJ. 由图可

知, 经过10–20 min的刻蚀, 石英表面的种子点被腐蚀成具有较光滑内表面的微球面, 即FL; 经过30 min腐蚀后, FL直径逐渐增大, 并且其球面底部中心裸露出一个小孔洞, 即SL对应的种子点, 说明此时腐蚀深度已经超过两个种子点的间距; 再继续腐蚀10–30 min, 可以看到FL直径依然缓慢增加, 而其底部的第二种子点则逐渐形成具有较光滑表面的SL, 最终形成双焦点微透镜结构. 随着刻蚀时间的延长, 双焦点透镜中的单个

图 3 (网络版彩图)激光埋种辅助刻蚀制备双焦点透镜. (a) 双焦点曝光示意图; (b) 湿法刻蚀快速成型示意图; (c) 双焦点曝光后经过不同刻蚀时间的结构形貌的激光共聚焦显微镜照片; (d) 结构截面轮廓随刻蚀时间的演化的截面分析曲线; (e) 所形成的第二透镜与第一透镜的面积比随曝光的相对能量比的变化曲线; (f) 双焦点透镜成像效果^[10]. 版权©2019, 中国知网

Figure 3 (Color online) Bifocal lens via single pulse exposure. (a) Schematic of the double-focus exposure. (b) Schematic of the prototype via HF etching. (c) SEM images of the structure evolution along etching time. (d) Profile evolution along etching time. (e) Area ratio dependence on the exposure energy ratio. (f) Imaging of the bifocal lens [10]. Copyright 2019, CNKI.

透镜的半径和深度的变化规律, 与第3小节中介绍的单个微透镜情况一致. 即无论是FL还是SL, 其半径均随刻蚀时间增加而逐渐增大, 而深度基本保持不变. 所形成具有光滑内表面的FL的最小直径为 $\sim 16.0 \mu\text{m}$, SL的最小直径为 $\sim 25.0 \mu\text{m}$, 形成的双焦点透镜的最终深度为 $13.5 \mu\text{m}$. 其中, 刻蚀速度的各向异性, 使得SL开始刻蚀后整个结构的深度发生跳跃式增长. 然而, 在SL形成光滑近球面结构之后, 即使进一步延长刻蚀时间, 双焦点透镜的整体深度仍然保持不变. 结合第3和第4小节的讨论, 关于双焦点透镜的结构设计与调控, 其中单个微透镜的直径主要通过飞秒激光脉冲能量来精准调控, 而其深度则需要进一步结合纵向多焦点曝光来实现有效调控^[10].

图3(d)依次为样品经过10, 20, 30, 40, 50, 60 min腐蚀的结构轮廓演化过程. 经过10 min后, FL所对应的种子点被腐蚀成矩形孔洞; 经过20 min后, 该矩形孔洞演化为近球型圆孔, 即形成FL; 经过30 min后, FL直径进一步增大, 轮廓更贴近球型; 同时可以观察到其底部裸露出的SL所对应的种子点轮廓. 当腐蚀时间超过40 min时, SL对应的种子点重复第一种子点的轮廓演

化过程, 即从纵深较深的矩形轮廓逐渐向球型演化, 直至形成SL. 同时, 纵向腐蚀使得整个结构深度进一步增加. 当腐蚀时间达到60 min时, SL最终呈球型轮廓, 整个双焦点微透镜结构得以完整成型. 对腐蚀过程中两个微透镜的直径和深度分别进行测量, 可以发现, 在整个腐蚀过程中, 结构直径呈递增趋势, 即横向腐蚀速度整体保持均匀; 对于结构深度, 在10–30 min和40–60 min这两个区间, 整个双焦点微透镜结构的深度保持不变; 而只有在30–40 min区间, 结构深度发生了 $6.6\text{--}13.5 \mu\text{m}$ 的激增. 这是由于自30 min起, FL底部的种子点暴露出来, 从而导致纵向比其他方向具有更高的腐蚀速度. 进一步地, 考虑到在“激光埋种”中, 可通过全息图所定义的子束波相对能量的大小直接调控最终形成的结构尺寸, 双焦点微透镜中FL和SL的尺寸大小同样可以通过调节其相对能量进行控制, 表明这种制备方法具有很高的结构设计性. 如图3(e)所示, 当改变全息图中FL和SL所对应焦点的相对能量比时, 无论脉冲能量为69 nJ还是86 nJ, 最终形成的两个微透镜的投影面积比也随之发生显著变化. 在实际的微光学元件设计中, 可以根据具体的光束整形需求来选择曝光

时两个焦点的相对能量比值. 图3(f)为所加工的双焦点透镜成像效果, 其中主图与插入图分别为FL和SL所成的像. 与双焦点透镜的双球面结构相对应, 其成像个数为2个, 而且FL成像明显大于SL. 进一步地, 比较不同曝光能量比的双焦点透镜的成像亮度, 可发现SL成像的亮度随能量比增加而增大, 表面成像效果与对应透镜的投影面积相关^[10].

6 结论

综上所述, 通过对基于激光埋种辅助刻蚀制备微凹透镜阵列的一系列工作的回顾, 本文深入探讨了这种新加工方法的加工原理、技术特点和参数控制. 通过空间光调制器对飞秒激光焦点进行相位调制, 使单个焦点变成沿待加工平面分布的一组焦点阵列. 利用这种调制后的飞秒激光对待加工衬底进行曝光, 并结合湿法刻蚀, 最终实现了微透镜阵列的并行制备, 其中微透镜的大小可直接由对应种子点的曝光能量决定. 进一步地, 通过改变相位调制时所形成焦点的排布

方向和焦点个数, 可以实现对微透镜的光学参数、光学功能的有效调控. 即利用调制后沿光轴排布的多个焦点进行一次性曝光, 可实现通过焦点个数对微透镜数值孔径的有效调控. 而利用沿光轴排布的间距较大的两个焦点进行一次性曝光, 则可得到具有光束整形功能的双焦点透镜. 由此可见, “激光埋种辅助刻蚀法”不仅从根本上改变了以往激光微纳加工中的低效率串行加工方式, 实现了对微结构阵列的高效并行加工, 而且能够通过相位调制实现对单个微透镜从结构到光学功能的精准调控. 鉴于相位调制定义焦点排布方式的灵活性, 在未来的工作中, 可将激光埋种辅助刻蚀法应用于其他功能化的微结构阵列的制备, 包括微光学、仿生器件等领域. 例如, 可以考虑将待加工平面替换成曲面等具有特定形貌的表面, 从而实现复眼等具有优越光学性能的仿生器件等. 总之, 由于本加工方法具有多焦点曝光的高加工效率, 同时能够通过相位调制来调控阵列中每个结构单元的形貌, 因此在发展微纳加工技术方面具有重要价值和意义.

参考文献

- 1 Ahmed R, Yetisen A K, Butt H. High numerical aperture hexagonal stacked ring-based bidirectional flexible polymer microlens array. *ACS Nano*, 2017, 11: 3155–3165
- 2 Wu M H, Whitesides G M. Fabrication of diffractive and micro-optical elements using microlens projection lithography. *Adv Mater*, 2002, 14: 1502–1506
- 3 Kunnavakkam M V, Houlihan F M, Schlax M, et al. Low-cost, low-loss microlens arrays fabricated by soft-lithography replication process. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 1152–1154
- 4 Lee X H, Moreno I, Sun C C. High-performance LED street lighting using microlens arrays. *Opt Express*, 2013, 21: 10612–10621
- 5 Roy E, Voisin B, Gravel J F, et al. Microlens array fabrication by enhanced thermal reflow process: Towards efficient collection of fluorescence light from microarrays. *Microelectron Eng*, 2009, 86: 2255–2261
- 6 Chen L K, Xiao Y F. On-chip lithium niobate microresonators for photonics applications. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 224231
- 7 Ding Y, Yang L J, Hong M H. Enhancement of pulsed laser ablation assisted with continuous wave laser irradiation. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 34211
- 8 Tian Z N, Yao W G, Xu J J, et al. Focal varying microlens array. *Opt Lett*, 2015, 40: 4222–4225
- 9 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. *Adv Opt Mater*, 2014, 2: 751–758
- 10 Cao X-W. Study of Femtosecond Laser Fabrication of Micro-optical Components Based on SLM (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changchun: Jilin University, 2019. 47–62 [曹小文. 基于空间光调制器的飞秒激光加工微光学元件技术研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 2019. 47–62]
- 11 Cao X W, Chen Q D, Zhang L, et al. Single-pulse writing of a concave microlens array. *Opt Lett*, 2018, 43: 831–834
- 12 Wang M L, Mei W, Yang L J, et al. Investigation on sapphire ablation by femtosecond-nanosecond dual beam laser (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 034205 [王懋露, 梅伟, 杨立军. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 034205]

- 13 Zhang Y, Yu G, He X L, et al. Driving mechanism of keyhole evolution during multi-pulse drilling with a millisecond laser. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 104711
- 14 Zhou R, Zhang Z, Hong M H. Laser microprocessing for aeroengine MRO support (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 034202 [周锐, 张姿, 洪明辉. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 034202]
- 15 Liu M, Li M T, Yang H, et al. Etching-assisted femtosecond laser microfabrication. *Chin Phys B*, 2018, 27: 094212
- 16 Fan H, Cao X W, Wang L, et al. Control of diameter and numerical aperture of microlens by a single ultra-short laser pulse. *Opt Lett*, 2019, 44: 5149–5152
- 17 Xia Z, Li Y, Su X, et al. Fabrication of polymer compound microlens by lens-on-lens microstructures. *Curr Appl Phys*, 2017, 17: 110–114
- 18 Yang Q, Tong S, Chen F, et al. Lens-on-lens microstructures. *Opt Lett*, 2015, 40: 5359
- 19 Lu Y K, Tsai Y C, Liu Y D, et al. Asymmetric elliptic-cone-shaped microlens for efficient coupling to high-power laser diodes. *Opt Express*, 2007, 15: 1434–1442
- 20 Lee J H, Ho Y H, Chen K Y, et al. Efficiency improvement and image quality of organic light-emitting display by attaching cylindrical microlens arrays. *Opt Express*, 2008, 16: 21184–21190
- 21 Leung H M, Zhou G, Yu H, et al. Liquid tunable double-focus lens fabricated with diamond cutting and soft lithography. *Appl Opt*, 2009, 48: 5733
- 22 Aymerich M, Nieto D, Flores-Arias M T. Laser-based surface multistructuring using optical elements and the Talbot effect. *Opt Express*, 2015, 23: 24369–24382

Concave microlens arrays through an etching-assisted laser seeding method

LIU MoNan¹, YANG Han² & SUN Hong-Bo^{2*}

¹ Department of Condensed Matter Physics, College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China;

² State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

Microlens arrays are crucial optical elements in micro-optics. However, their efficient fabrication is difficult. High efficiency and quality cannot be simultaneously achieved using conventional fabrication methods; therefore, we propose a novel and efficient method based on the single-pulse exposure of femtosecond lasers and etching-assisted prototyping. When developing this novel microfabrication method, we systematically reviewed several studies. Furthermore, we employed phase modulation using a spatial light modulator to realize the laser seeding-etching microfabrication method. The phase modulation enabled multi-focus exposure instead of single-focus exposure, realizing parallel fabrication in case of concave microlens arrays. Further, combined with the tuning of relative energy and the spatial arrangement of multiple foci, the morphology and optical parameters of each concave microlens can be controlled. The proposed method fundamentally changes the “point-to-point” scanning strategy adopted in conventional micro-nanofabrications via laser direct writing, which is an efficient and high-quality method for fabricating microarray structures.

single pulse exposure, femtosecond lasers, microlens arrays, microfabrication

PACS: 42.65.Re, 42.30.-d, 42.65.Fc

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0142](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0142)