

飞秒激光空间光束整形加工技术研究进展

孔德键, 孙小燕*, 董卓林, 胡友旺, 段吉安

中南大学机电工程学院, 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083

摘要 飞秒激光凭借其超短脉宽和极高峰值功率, 在微纳加工中发挥了重要的优势, 而飞秒激光的加工效率制约其在工业领域的应用。近年来, 研究者成功将空间光调制器应用于飞秒激光加工, 实现飞秒激光加工效率和灵活性的进一步提高。本文综述了近年来硅基液晶空间光调制器在飞秒激光加工领域的研究进展, 主要包括多焦点并行加工、结构光场并行加工和矢量光场加工, 分析了三种方法的优势和不足。并从光场均匀性和衍射效率两个方面, 讨论了近年来对光场质量的研究。最后探讨了该领域目前存在的问题, 并对未来提出了展望。

关键词 激光光学; 飞秒激光; 硅基液晶空间光调制器; 多焦点并行加工; 结构光场; 矢量光场; 光场质量

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111416

Progress in Femtosecond Laser Processing Technology Based on Space Beam Shaping

Kong Dejian, Sun Xiaoyan*, Dong Zhuolin, Hu Youwang, Duan Ji'an

State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

Abstract With ultra short pulse width and high peak power, femtosecond laser plays an important role in micro/nano machining. However, the processing efficiency of femtosecond laser restricts its application in industry. In recent years, researchers have successfully applied spatial light modulator to femtosecond laser processing to further improve the efficiency and flexibility of femtosecond laser processing. In this paper, the progress of recent research of Si-based liquid crystal spatial light modulator in femtosecond laser processing is reviewed. It concludes three processing methods that is multi foci parallel processing, structured light field parallel processing, and vector light field processing. The advantages and disadvantages of these processing methods are analyzed. The recent study of the field quality is discussed in the aspects of the uniformity and diffraction efficiency of the field. Finally, the problems in this field are discussed, and the prospect for the future is put forward.

Key words laser optics; femtosecond laser; Si-based liquid crystal spatial light modulator; multi foci parallel processing; structured light field; vector light field; field quality

OCIS codes 140.3300; 140.3390; 230.6120; 320.7090

1 引言

飞秒激光的脉冲宽度在 10^{-15} s 数量级, 其峰值功率密度可以达到 10^{22} W/cm²。物质在吸收超强激光能量后, 实现多光子电离和隧穿电离。因此, 飞秒激光不但可在任意材料表面进行加工, 而且可对透明材料内部进行加工。此外, 因材料瞬间电离形

成等离子体, 来不及进行热扩散, 可实现“冷加工”。因此, 飞秒激光在微光学、微机械、微流体和功能表面等领域的微纳制造中展现出特有的优势。

尽管飞秒激光直写法加工精度和灵活性高, 但其效率低, 难以在实际生产中应用。为了提高飞秒激光加工效率, 目前主要有三种解决方法: 微透镜阵列或衍射光学元件法、多光束干涉法和基于空间光

收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-03-22; 录用日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875584, 51875585)、国家重点研发计划项目(2018YFB1107803, 2017YFB1104800)

* E-mail: sunxy@csu.edu.cn

调制器(SLM)的光束整形法。微透镜阵列和衍射光学元件对激光进行分束,实现多焦点并行加工。但该方法所加工的阵列间距固定,结构单一。多光束干涉利用多束相干激光束以一定角度叠加后会形成周期性的相干光场,通过该光场实现微结构的高效并行加工。但是这种加工方法增加了光路的复杂性,只能加工周期结构。由于上述两种改进方法光场分布相对固定,难以实现微纳结构的灵活加工。而空间光调制器,作为一种能够通过驱动信号对光场进行空间分布调制的面阵衍射器件,提高了激光加工的效率 and 灵活性,在激光微纳加工领域具有潜在优势。

空间光调制器能够实现对入射光场的振幅、相位和偏振态进行调制,可应用于光束整形、全息成像和光镊捕捉等领域。空间光调制器根据其结构可以分为液晶空间光调制器(LC-SLM)、数字微镜器件(DMD)、磁空间光调制器、多量子阱空间光调制器、电光空间光调制器和声光空间光调制器等。空间光调制器根据调制特性可以分为振幅型、相位型和混合型。振幅型 SLM 只调制入射光场的振幅,典型器件是 DMD。相位型 SLM 只调制入射光场的相位,典型器件是 LC-SLM。

针对空间光调制器在飞秒激光微纳加工的优势,本文综述了国内外关于硅基液晶空间光调制器在飞秒激光加工的相关研究,主要从多焦点并行加工、结构光场并行加工和矢量光场加工三个方面进行评述,分析其研究的优势和所存在的问题,并对光场质量存在的问题和提高的方法进行讨论,最后指出了未来发展的趋势。

2 多焦点并行加工

2.1 增材制造

飞秒激光双光子聚合是基于近红外飞秒激光的立体打印方法。在极高的峰值功率下,材料通过吸收两个红外光子产生光化学反应,形成微纳结构。该加工方法的分辨率远小于衍射极限,可实现超分辨率的加工。但是,飞秒激光双光子聚合加工目前主要是采用单焦点的加工方式,加工用时与结构尺寸的三次方成正比,效率极低。为解决上述问题,近年来,研究者通过空间光调制器将光束调制为多焦点,实现高效的并行加工。

通过设计焦点之间的间距和分布,预先制作计算全息图,并将计算全息图载入 SLM 中,即可实现任意排布的周期结构制备。该加工方法不仅提高了

飞秒激光双光子聚合的加工效率,还提高了加工的灵活性,实现周期结构的间距和排布的可调性。

Yang 等^[1]利用空间光调制器,将光束调制为多个焦点,分别为三角形、六边形和正方形排布,如图 1 所示。通过该方法可以并行加工得到直径为 $19.5\ \mu\text{m}$ 的微透镜,并实现了十六焦点阵列加工,大幅提高加工效率。Hu 等^[2]采用多焦点并行加工的方法分别制备了顶点曲率半径为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的非球面微透镜阵列,所得到的微透镜阵列具有优异的成像特性。

除了微透镜阵列的加工,多焦点并行加工可实现微流体器件的高效制备。Xu 等^[3]分别采用五焦点和七焦点,在微通道上集成微型过滤器,如图 2 所示。此外,通过设置不同的激光功率,能够实现对过滤孔直径的控制。研究者将所制备的微型过滤器应用于聚苯乙烯(PS)粒子过滤,采用孔径为 $12.2\ \mu\text{m}$ 的过滤器,成功将尺寸为 $2.8\ \mu\text{m}$ 和 $5.8\ \mu\text{m}$ 的 PS 粒子与 $13\ \mu\text{m}$ 的 PS 粒子分离。但由于微型过滤器无法实现对尺寸在一定范围的微粒进行捕获,Xu 等^[4]采用五焦点并行加工制备了不同类型的拱形分选器,并将该分选器应用于 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 粒子的筛选。

由此可见,空间光束整形与运动平台相结合,可实现周期性结构的多焦点并行加工,在保证加工精度的同时提高了双光子聚合加工的效率。并且,通过预先设计全息图,能够对焦点的间距实现调整,提高加工的灵活性。

在加工之前预先加载计算全息图,能够实现对焦点的间距进行预先调控。但该方法只能应用于周期结构的加工,难以实现非周期结构的制备。为此,研究者将多张计算全息图按一定顺序加载到 SLM,对多焦点的间距和光强分布进行实时控制,实时加载计算全息图的方法可实现焦点间距的动态变化。该加工方法最大的优势在于对焦点的位置动态控制,能够应用于非周期结构的加工。Obata 等^[5]通过动态加载计算全息图,实现了三焦点的正弦曲线加工。实验以 $40\ \text{mW}$ 激光功率, $20\ \mu\text{m/s}$ 的扫描速度加工,在扫描时,将 200 张计算全息图按一定顺序间隔 $50\ \text{ms}$ 加载到 SLM 中,如图 3 所示。Qian 等^[6]通过动态加载计算全息图的方法,对银离子进行还原,实现银微线的加工,并在此基础上制备微加热器。该加工方法可控制双焦点的光强,改变银线的宽度,实现微加热器温度梯度的控制。

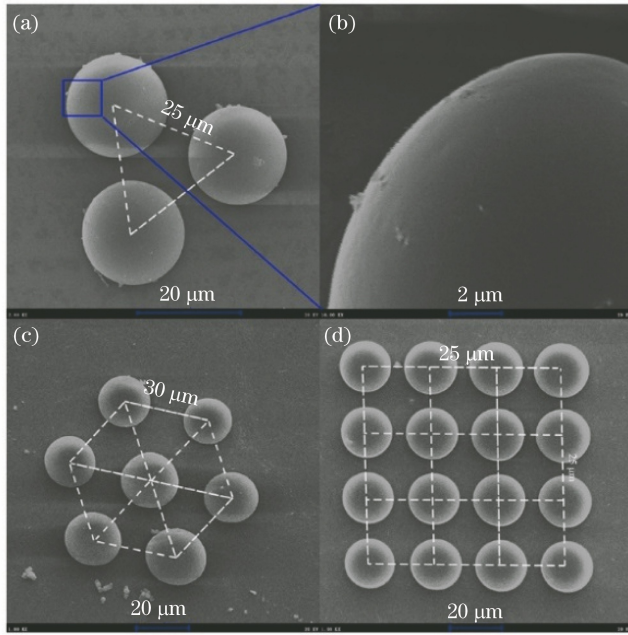


图 1 多焦点并行加工微透镜阵列电镜图(SEM)^[1]。(a)三角形分布微透镜阵列；
(b)图(a)以 45°观察的局部图像；(c)六边形分布微透镜阵列；(d) 4×4 微透镜阵列

Fig. 1 SEM images of microlens arrays fabricated by multiple foci^[1]. (a) Microlens arrays in triangle distribution; (b) partial view of one microlens in Fig. (a) captured at 45°; (c) microlens arrays in hexagonal distribution; (d) microlens arrays in 4×4 distribution

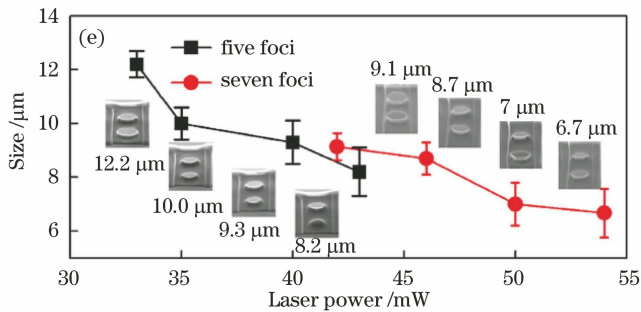
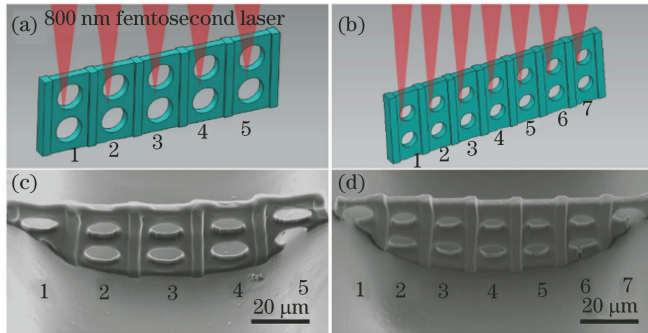
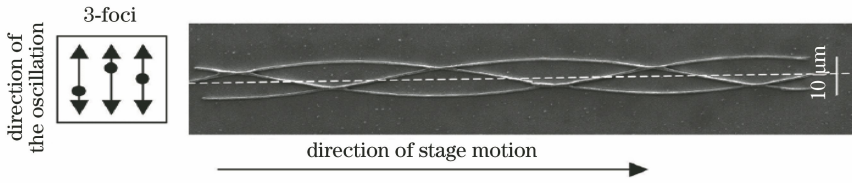


图 2 多焦点在微通道内部集成不同微过滤器及过滤器微孔尺寸与激光能量的关系^[3]。(a)(b)五焦点和七焦点集成微过滤器示意图；(c)(d)五焦点和七焦点在微通道集成微过滤器电镜图；(e)激光功率与微过滤器孔径的关系

Fig. 2 Multiple foci integration of different microfilters inside the microchannel and dependence of the hole size formed in the filters on the laser power^[3]. (a)(b) Schematic illustrations of five foci and seven foci integration of microfilter; (c)(d) SEM images of the microfilters integrated in the microchannel by using five foci and seven foci, respectively; (e) dependence of the hole size formed in the filter on the laser power

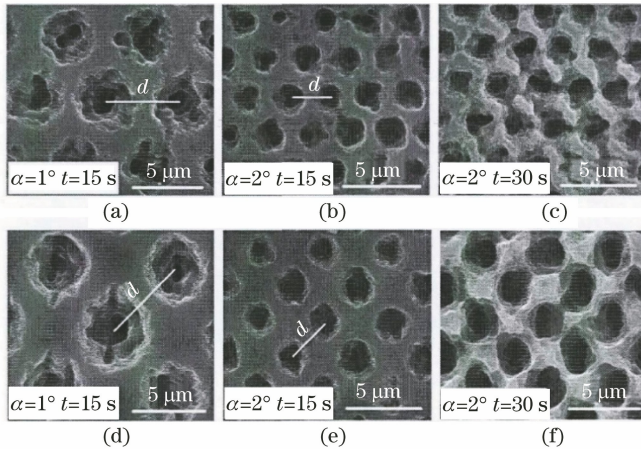
图3 三焦点加工正弦结构电镜图^[5]Fig. 3 SEM image of sine curve structures fabricated with three focus spots^[5]

2.2 烧蚀加工

除了增材加工,飞秒激光烧蚀加工也是研究热点之一。周强^[7]通过空间光调制器分别模拟了三棱锥镜和四棱锥镜,实现不同排布的微孔阵列的加工。激光功率为 25 mW,材料为单晶硅,实验分别对比了不同底角 α 和不同曝光时间 t 对微孔阵列加工的影响。三光束干涉和四光束干涉烧蚀结果分别如图 4(a)~(c)和(d)~(f)所示。这种方法实现了微孔阵列的可控制造,同时制备的微孔阵列在近红外波段平均吸收率提高。但由于光束质量的问题,加

工的微孔一致性差。

为了进一步提高效率,Paivasaari 等^[8]利用空间光调制器实现光束 50×50 的分束,实验采用 1 mJ 的激光能量加工,在保证每个光点高于材料的烧蚀阈值的同时,加工得到间距为 $17 \mu\text{m}$ 的微孔阵列,但微孔的一致性仍有待提高。另外,研究者又将焦点整形为 8×16 的焦点阵列在硅晶圆上加工微孔阵列,直径为 $30 \mu\text{m}$,微孔深径比达到 10。通过提高脉冲数以降低微孔的锥度,但微孔阵列深度方向上的一致性不高。

图4 多光束干涉在单晶硅表面形成的微结构电镜图^[7]Fig. 4 SEM image of microstructure on the surface of silicon by multi beams interference^[7]

除了微孔阵列的并行加工,纳米结构的并行加工也逐渐引起了研究者的注意。传统的加工方法有光刻法、聚焦电子束法和聚焦离子束法,但是这些加工方法复杂、成本高和效率低。飞秒激光直写法能够在材料表面上加工得到激光诱导的周期性空间结构(LIPSS),但是 LIPSS 间距的控制和大面积的加工存在困难。为此,Wang 等^[9]提出了利用双焦点在金薄膜上制备纳米线的方法,如图 5 所示。当双焦点的相位差为 π 时,两焦点的能量相等。实验研究了激光能量对纳米线结构的影响,随着激光能量的增加,纳米线宽度减小,纳米线从马鞍形状转变为抛物线形状。当激光能量为 195 J/m^2 ,扫描速度为 $100 \mu\text{m/s}$,重复频率为 1 kHz 时,制备得到 $50 \mu\text{m}$

长的纳米线,进一步提高激光能量能够提高纳米线的加工质量。Xu 等^[10]基于以上方法,在金表面上加工蝴蝶结形状的纳米缝。研究者通过调整激光能量可以控制纳米缝的尺寸,其中最小的纳米缝可以达到 30 nm ,为激光波长的 $1/26$ 。研究者进一步在光路添加了狭缝,对光束进行了整形,实现对纳米缝的尖端尺寸进行控制。基于上述加工系统,实现了 5×5 的纳米结构阵列,纳米结构表现出较高的一致性,密度达到了 $2.13 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。这种大面积制造的微间隙结构,可应用于太赫兹超表面的加工。Wang 等^[11]进一步提出了一种图案化的纳米线加工方法。基于空间光调制器三光束和四光束干涉,在硅表面上利用烧蚀物制备得到六边形和正方形纳米

线图案。随着能量的增加,弹坑相邻烧蚀物相互接触,如图6所示。研究者采用扫描速度 $2000 \mu\text{m/s}$, 重复频率 40 Hz , 单脉冲加工面积为 $40 \mu\text{m} \times$

$40 \mu\text{m}$, 仅用 23 min 即可实现 1 cm^2 区域纳米图案的加工。而传统的单点加工需要 140 h , 该方法极大地提高了纳米图案的加工效率。

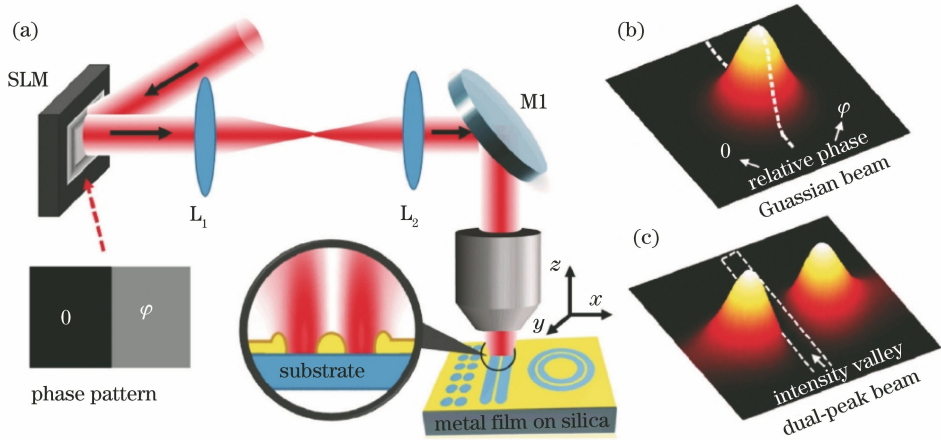


图5 纳米线加工实验原理图^[9]

Fig. 5 Experimental setup for fabricating nanowire^[9]

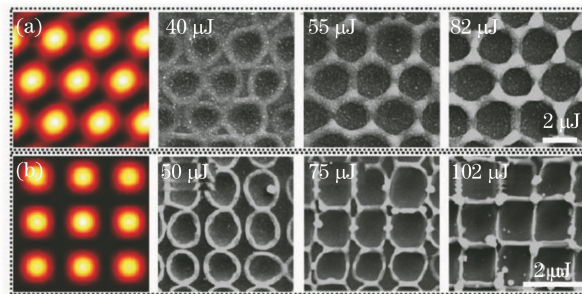


图6 实验结果。(a)三光束干涉加工表面结构;(b)四光束干涉加工表面结构^[11]

Fig. 6 Experimental results. (a) Surface structures fabricated by three-beam interference; (b) four-beam interference^[11]

2.3 改性加工

由于熔石英和蓝宝石具有良好的光学性能,常用于制备光学器件。若利用飞秒激光直写加工,加工后的表面粗糙度较大,不满足器件要求。飞秒激光改性结合化学腐蚀法是加工光学器件常用方法,但该方法存在加工效率低的问题。为此,Cao等^[12]提出利用空间光调制器生成多焦点阵列,对蓝宝石进行并改性行加工,再用浓磷酸和浓硫酸混合液对烧蚀表面进行腐蚀,获得间距分别为 $25 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 的微凹透镜阵列。结果表明,飞秒激光加工效率得到提高,并且间距为 $40 \mu\text{m}$ 的微凹透镜阵列的成像效果较好。加工原理如图7所示。

在以上研究的基础上,Cao等^[13]提出了一种二维光点阵列制备三维透镜阵列加工的方法。将焦点阵列设置为正六边形排布,各焦点间距为 $10 \mu\text{m}$,并且焦点从中心到边缘的相对能量从1递减到0.7。采用 $7.1 \mu\text{J}$ 的激光能量对石英进行改性,在氢氟酸溶液腐蚀 40 min 后,获得曲率半径约为 $120 \mu\text{m}$ 的

曲面微透镜阵列,如图8所示。该课题结合ORA (Optimal Rotation Angle)算法进一步将飞秒激光在激光传输方向上调制为双焦点,实现在激光传输方向的并行加工^[14]。通过控制两焦点能量比,结合化学腐蚀,在蓝宝石表面制备出双焦点透镜,加工方法如图9所示。

飞秒激光结合空间光调制器的多焦点并行改性方法,可以进一步提高飞秒激光的加工效率。结合以上文献分析,飞秒激光改性区域大小与激光能量存在相关性。通过控制各个焦点的相对能量,可实现对改性区域大小的控制,在曲面微结构制备方面具有价值。目前的研究集中于聚焦平面上的多焦点并行加工,而针对三维多焦点并行加工尚且较少。

飞秒激光还能在玻璃内部诱导结晶,在光学器件的制备具有潜在的应用。采用高重复频率的飞秒激光加工玻璃会产生热累积效应,并在热累积区域实现对材料的结晶。但是,高重复频率的飞秒激光单点曝光往往会诱导内部离子的扩散,导致结晶区

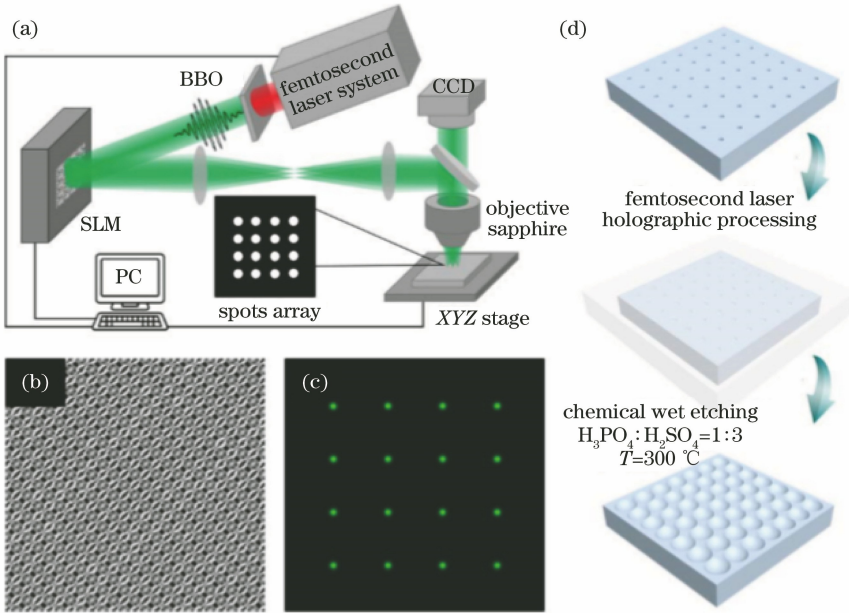


图 7 飞秒激光多焦点制备微透镜阵列装置^[12]

Fig. 7 Femtosecond laser holographic processing system^[12]

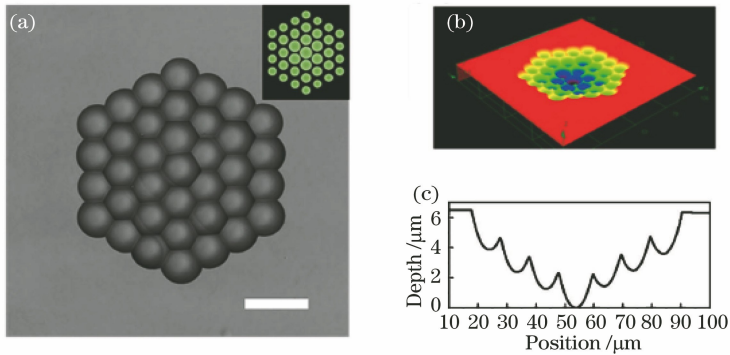


图 8 3D 微透镜阵列^[13]

Fig. 8 3D microlens array^[13]

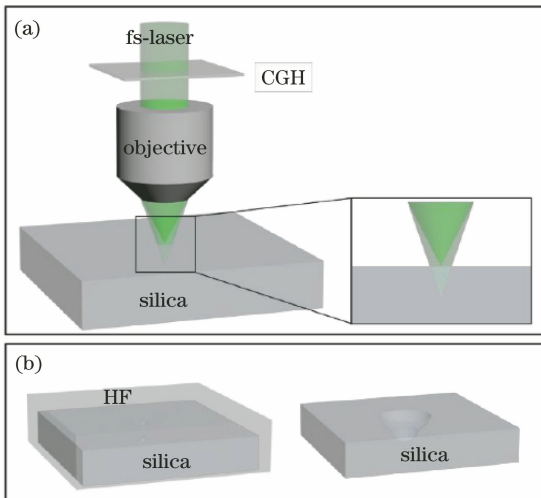


图 9 双焦点透镜制备流程示意图^[14]

Fig. 9 Schematic of bifocal lens preparation process^[14]

域呈现环状^[15]。为了对结晶区域形状进行控制, Du 等^[16]结合多焦点并行加工的方法, 在玻璃内部获得正方形的 ZnO 结晶区域。实验分别采用了重复频率为 250 kHz 和 1 kHz 的飞秒激光, 利用高重复频率的飞秒激光进行单点加工, 获得环状的结晶区域。而将低重复频率的飞秒激光调制为四焦点阵列并在玻璃内部加工, 可实现环状结晶区域到正方形结晶区域的转变。多焦点并行加工在控制结晶区域形状具有可行性, 但焦点之间的距离需要精确控制。

综合可见, 加工效率通常取决于焦点的数量, 并随着焦点数量的增加而提高。由于焦点数量存在上限, 加工效率并不能无限的提高。当焦点数量过多时, 每个焦点的能量将会降低, 焦点能量低于材料加工阈值。尽管提高入射光场能量可以在保证各焦点能量大于材料加工阈值的同时, 能够提高焦点数量

上限,但是当入射光的功率密度高于 SLM 的损伤阈值时,SLM 的温升过高,导致调制相位发生偏差,影响光场质量,甚至对空间光调制器造成不可逆的损伤。虽然 SLM 能够对多焦点的间距、分布、数量和能量的控制,实现微纳结构的可控加工,但是加工质量仍然是需要考虑的问题,如微孔径向和轴向上的一致性问题的。

3 结构光场并行加工

空间光调制器不仅能够将飞秒激光调制为多焦点阵列,还能够获得不同类型的光场,应用于特殊结构的加工,如直管道、斜管道、锥形管道、弯槽和手性结构等。目前,空间光调制器可以将光束调制为线形光场和面形光场,也可以调制为无衍射光束和涡旋光束。下面将围绕线/面形光场、无衍射光束和涡

旋光束三个方面的研究现状进行介绍。

3.1 线/面形光场

Yang 等^[17]利用投影双光子聚合的方法,研究了线形光场和面形光场的加工效果。实验以 560 mW 的能量曝光,研究了线形光场曝光时间为 0.2~5 s 的加工质量。与单点加工相比,由于线形光场平均能量较低,并且光场能量分布不均匀,为了提高加工质量,线形光场需要更长的曝光时间。研究者研究了像素点间距和曝光时间对面形光场加工的影响。结果发现,连续像素点构成的面形光场比离散像素点所加工表面粗糙度更小,加工图案如图 10 所示。由于光束整形具有能量损失,为了提高线/面形光场的加工效率,需要提高入射光场的能量以减小曝光时间。此外,高数值孔径的物镜产生的像差和迭代算法误差导致光场不均匀,从而降低加工质量。

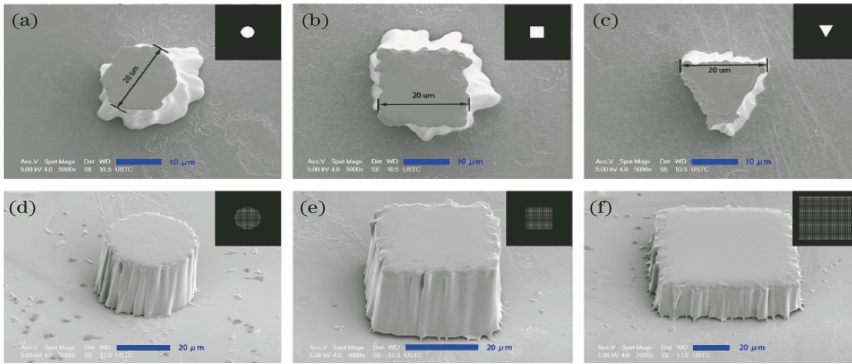


图 10 SLM 将飞秒激光调制为圆形/正方形/三角形,应用于双光子刻蚀^[17]

Fig. 10 Femtosecond laser reflected from the SLM was modulated to circle/square/triangular plane and then focused into the photoresist for two-photon polymerization^[17]

Hasegawa 等^[18]将光束整形为线形光场,实现对氧化铟锡 (ITO) 薄膜的去除加工。在加工过程中,激光能量密度必须要大于 ITO 的烧蚀阈值,并保证小于基底的烧蚀阈值,加工示意图如图 11 所

示。研究者发现,线形光场不但可提高薄膜去除的效率,还可减少飞溅物的产生。除此之外,研究者还采用曲线光场在玻璃内部加工弯曲结构,展现出线形光场三维加工能力。

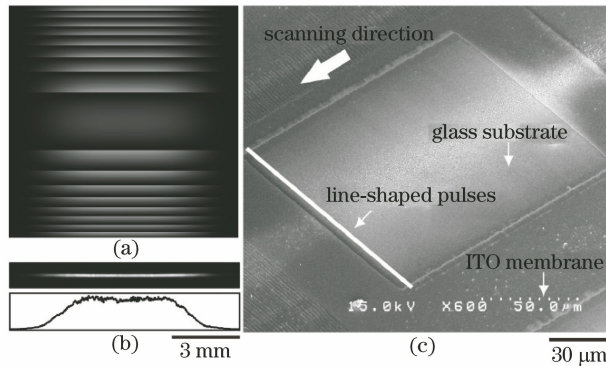


图 11 线形光场与抛光示意图^[18]。(a)全息柱透镜相位分布;(b)重建光场;(c)线形光场对玻璃表面 ITO 薄膜进行抛光

Fig. 11 Schematic diagram of line-shape beam and peeling^[18]. (a) Phase distribution of holographic cylindrical lens; (b) its optical reconstruction; (c) line-shaped laser peeling of ITO membrane on glass substrate

Li 等^[19]结合迈克耳孙干涉仪原理,通过设置相位模板灰度的连续变化,实现面形光场强度的连续变化。将 25 μJ 整形后的光束垂直辐照于硅晶圆表面,并以 500 $\mu\text{m/s}$ 的速度进行扫描,最终得到三部分加工区域,如图 12 所示,从左至右分别为高能量的烧蚀区、中能量诱导的 LIPSS 区和低能量诱导的 LIPSS 及改性区。该加工方法为微纳米结构的调控提供了启示。

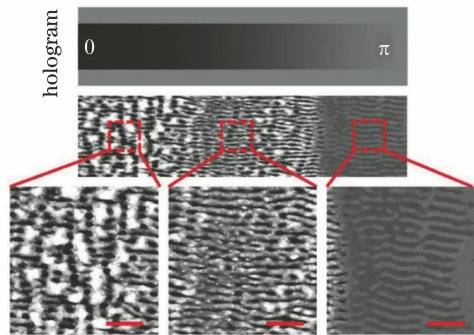


图 12 利用连续变化光场加工结果的电镜图^[19]

Fig. 12 SEM image of processing result with continuous intensity distribution^[19]

综上所述,线/面形光场的平均能量大小和光场均匀性限制了双光子聚合的加工能力。线形光场在抛光等领域具有优势,但曲线光场的加工精度不高。面形光场可用于图案化加工,通过设置光场能量梯度,可实现对微纳结构的调控。但由于面形光场的边缘质量较差,需要优化光场质量,以提高加工精度。

3.2 无衍射光束

除了线形光场和面形光场,基于空间光调制器整形的贝塞尔光束具有卓越的加工优势。研究者^[20-23]采用空间光调制器将光束整形为高阶贝塞尔光束,只需要在计算全息图中改变锥透镜半径 r_0 和拓扑荷数 n 两个参数,即可获得不同直径的高阶贝塞尔光束。结合双光子聚合加工,高阶贝塞尔光束成功应用于微管道加工,提高管道的加工效率和结构的可控性。

潘登等^[20]采用空间光调制器将光束整形为高阶贝塞尔光束,并用于水凝胶支架的加工,制备了壁厚为 800 nm,直径为 8~15 μm 的水凝胶(PEGDA)圆管道。在该方法的基础上,制备了双层细胞支架。加工的单个管道壁厚 0.8 μm ,直径为 8 μm ,高度为 30 μm 。第一层为 7×7 的管道阵列,第二层为 6×6 的加工阵列,如图 13 所示。该方法相对于单点曝光的加工方法,加工分辨率得到保证,且效率提高了 2 到 3 个数量级,大大节省了细胞支架加工的时间,具

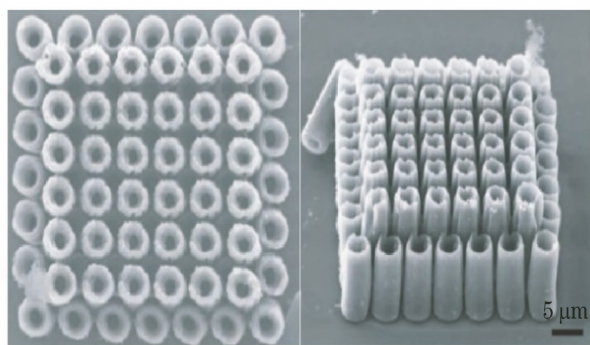


图 13 贝塞尔光束加工水凝胶细胞支架^[20]

Fig. 13 Hydrogel cell scaffold fabricated by Bessel beam^[20]

有较好的应用潜力。

Yu 等^[24]采用贝塞尔光束结合旋转平台,加工空心管道结构。该方法效率较高,1 s 即可完成 10 mm 长空心管道的,可应用于人工血管的生产加工。但由于热效应导致管壁面扭曲,降低了管道的均匀性。为了提高管道的质量,还需要对激光能量和扫描速度等参数进行优化。尽管该方法能够提高管道的长度和加工效率,但是加工质量的还有待提高。

以上文献关注直管道的加工,未涉及斜管道的加工。Yang 等^[21]采用空间光调制器将飞秒激光整形为高阶贝塞尔光束,通过设置不同的扫描方向,制备了斜管道和弯折管道。如图 14 所示,分别制备了夹角为 15°、30°、45°和 60°以及曲折的管道,并实现花状管道阵列排布。这种加工方法通过控制扫描速度和扫描时间,实现对微管道高度的精准控制,但由于曝光的能量的不均匀,管道的表面粗糙度会增大。结合动态加载计算全息图的方法,还能够实现变截面管道的加工。Ji 等^[22]研究了全息图锥透镜半径 r_0 、拓扑荷数 n 与管道外环直径和内环直径的关系。当锥透镜半径和拓扑荷数足够大,内环结构消失。在单环结构的情况下,外径和内径均与 r_0 呈负相关,与 n 呈正相关。基于以上研究,结合动态加载计算全息图,分别制备了锥形和鼓形阵列结构,如图 15 所示。实现内径从 5 μm 到 10 μm 的变化,外径从 8 μm 到 14 μm 的变化。当管道截面直径变化过大时,难以实现低粗糙表面的长管道制备。

采用动态加载计算全息图的方法可以制造截面变化的微管道,实现复杂三维结构的高效加工。但空间光调制器刷新全息图的速度受限的,其刷新速度与其固有特性有关。另外,斜管道和变截面管道的表面粗糙度也是有待解决的问题。目前,基于 SLM 构建新型贝塞尔光束也是可控制备微纳结构

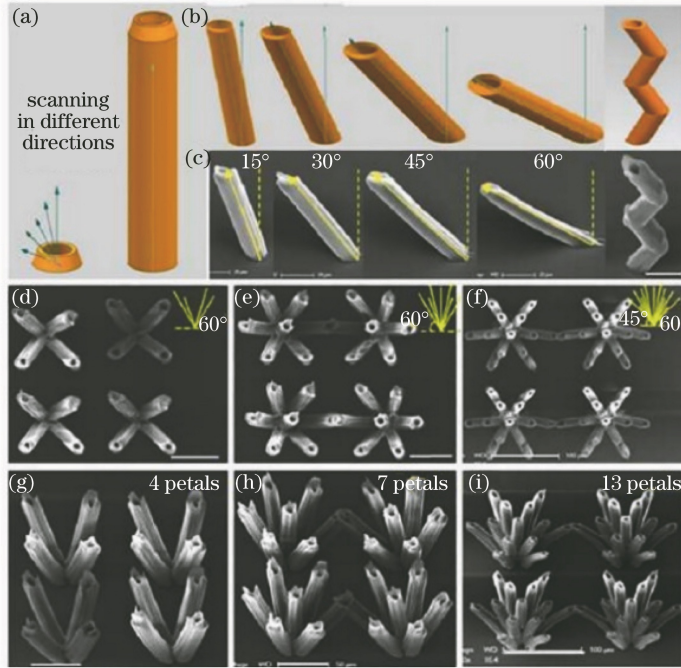


图 14 利用贝塞尔光束加工 3D 斜管道和花状微管道阵列^[21]

Fig. 14 3D slant microtubes and flower-like microtube arrays fabricated by tilted the Bessel beam scanning^[21]

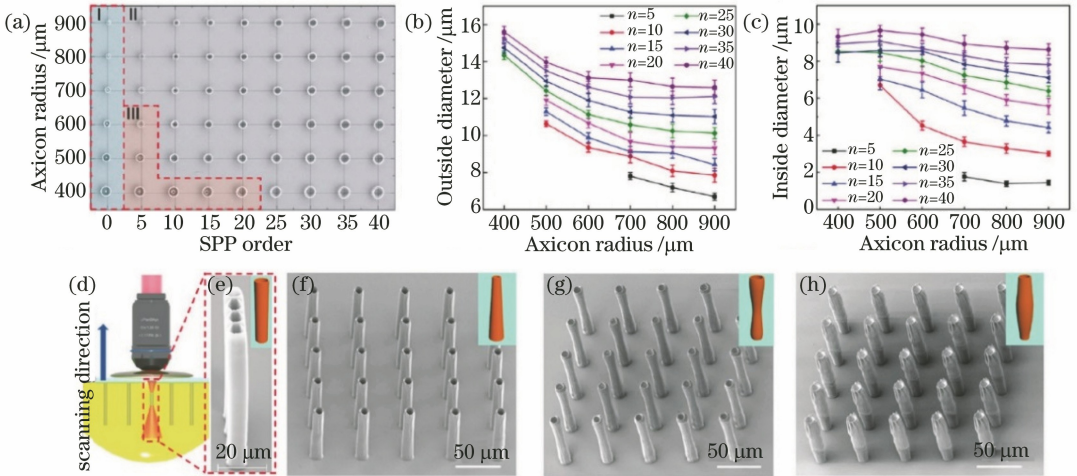


图 15 动态全息图制造变截面微管道^[22]。(a)微管道的类型与拓扑荷和锥透镜半径关系；(b)(c)单环结构外径和内径与锥透镜半径和拓扑荷的关系；(d)微管道加工示意图；(e)直管道电镜图；(f)锥微管道；(g)(h)鼓形微管道

Fig. 15 Dynamic holographic processing of various diameter-varying microtubes^[22]. (a) Dependence of different types of microstructures on topological charge and axicon radius; (b)(c) study on the outside diameter and the inside diameter of the single-ring microstructures as a function of axicon radius and topological charge; (d) schematic illustration of the holographic processing of a microtube array; (e) SEM of straight microtube arrays; (f) conical microtube arrays; (g)(h)drum-shape microtube arrays

的方法。Pan 等^[23]提出了一种新型的加工方法,生成 C 形贝塞尔光束,加工原理如图 16 所示。C 形贝塞尔光束需要叠加一个局部相位调制图,局部相位调制全息图由白色区域和黑色区域两部分组成。白色区域保持原相位信息,而黑色区域相位分布为 0,圆心到两个区域交界处的距离为 L 。设置锥透镜半

径 $r_0 = 800 \mu\text{m}$,拓扑荷数为 20,实验研究了距离 L 与光束中心角的关系。分析表明,距离 L 与中心角呈线性关系,实现光束中心角度从 75° 到 300° 的控制。研究者应用 C 形贝塞尔光束实现图案加工: X 形、三叶草形、花形和太极形,还实现了不同截面形状的三维管道加工,通过动态加载计算全息图,并制

备了开式螺旋管道。此外,应用 C 形贝塞尔光束,制备了新型人工气管,并实现人工气管开闭的控制。

该方法加工效率提高了 2 个数量级,并实现复杂三维结构的高效可控加工。

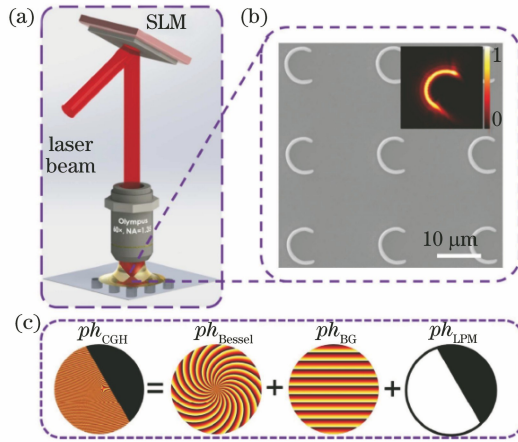


图 16 缺口环状光场生成方法^[23]。(a) SLM 加载预设计全息图生成缺口环光束; (b)菲涅耳衍射模拟聚焦光场;(c)计算全息图生成示意图

Fig. 16 Method of creating gap ring shaped light field^[23]. (a) Femtosecond gap ring shaped beam is generated by phase modulation using a predesigned hologram loaded in the SLM; (b) simulation of focused light field using Fresnel diffraction; (c) illustration of the computer-generated holograms (CGHs)

结合双光子聚合原理,高阶贝塞尔光束能够实现微管道的制备。而在烧蚀加工方面,由于贝塞尔光束具有长焦深,能够应用于高深径比微孔的加工。但实验光路固定,难以灵活控制贝塞尔光束的无衍射段长度,因而不易对微孔可控加工。针对上述问题,Yao 等^[25]对模拟的锥透镜改进,将其变成圆弧形,实现光束相位的非线性变化,获得准贝塞尔光束,如图 18 所示。实验表明,不同圆弧的曲率半径影响着无衍射段长度,当曲率半径为 $+9 \times 10^5 \mu\text{m}$ 时,无衍射段长度超过 30 cm;而曲率半径为 $-3 \times 10^5 \mu\text{m}$ 时,无衍射段长度小于 10 cm。研究者将准贝塞尔光束用于微孔的加工,当曲率半径由 $-3 \times 10^5 \mu\text{m}$ 变化至 $+9 \times 10^5 \mu\text{m}$ 时,获得了深度范围是

248~904 μm 的微孔,微孔直径变化仅为 1.6 μm。该研究证明了准贝塞尔光束应用于微孔加工的可行性,并实现了微孔的可控加工。

采用贝塞尔光束光加工的时候,需要考虑高阶光环的附加损伤。尽管通过降低激光的能量,可同步降低同心环光的能量,以保证中心光束高于材料烧蚀阈值的同时,使高阶光环能量密度低于材料烧蚀阈值。然而,该方法限制了贝塞尔光束的加工能力。为了解决该问题,Yu 等^[26]结合拉盖尔高斯光束叠加的 $1+(-1)$ 级生成贝塞尔光束,并应用于钼薄膜的加工。结果表明,与单贝塞尔光束相比,由于叠加的贝塞尔光束光场边缘的强度接近为 0,减少沟槽两侧的损伤,降低了表面粗糙度,如图 18 所示。

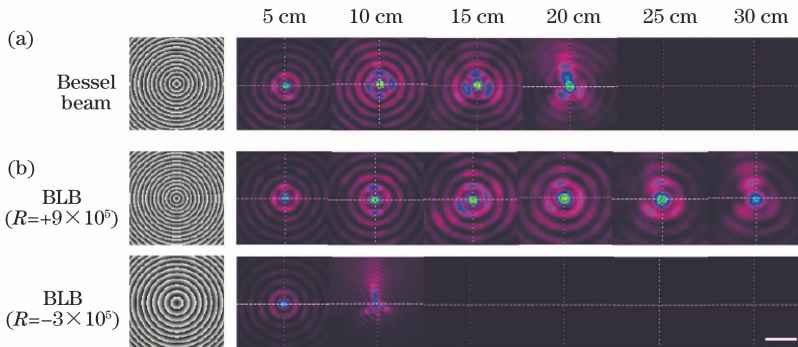


图 17 由 SLM 生成的三种光束的相位图,以及在 5,10,15,20,25,30 cm 处光场强度截面图^[25]。

(a)贝塞尔光束(2° 锥角);(b)准贝塞尔光束, $R = +9 \times 10^5$ 和 $R = -3 \times 10^5$

Fig. 17 Phase and cross-section intensity profiles at 5, 10, 15, 20, 25, and 30 cm from the SLM for the three types of beams^[25]. (a) Bessel beam (2° cone angle); (b) Bessel-like beam, $R = +9 \times 10^5$, and $R = -3 \times 10^5$

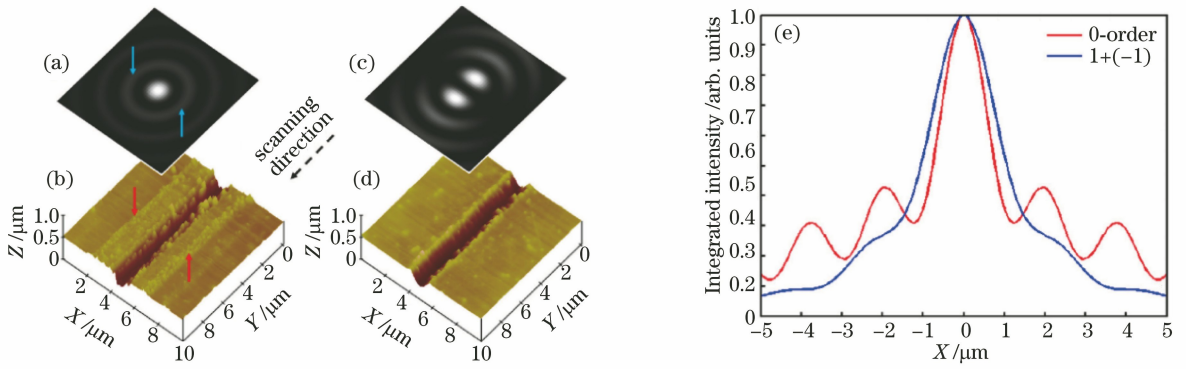


图 18 零级贝塞尔光束和 $1+(-1)$ 级叠加贝塞尔光束刻蚀沟槽比较^[26]。(a)(c)计算光场形状；(b)(d)对应光束刻蚀沟槽的原子力显微镜观察图；(e)两种情况下沿扫描方向的光场强度

Fig. 18 Comparison of groove scribing with zero-order and $1+(-1)$ superposed Bessel beams^[26]. (a)(c)Calculated beam shapes; (b)(d) atomic force microscope images of grooves scribed with corresponding beams; (e) comparison of intensities integrated along the scanning direction between two cases

除了贝塞尔光束之外,艾里光束和马丢光束等无衍射光束在微纳加工领域也具有潜在应用价值。目前艾里光束主要研究方向为光学性质和信息传输两方面,对艾里光束在微纳加工的研究较少。下面分别介绍艾里光束和马丢光束的加工。

刘毅^[27]采用空间光调制器将飞秒激光整形为艾里光束,在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)上加工得到弯

槽结构,并研究了弯槽结构与离焦量和扫描次数的关系。实验表明,离焦量能够引起弯槽弧度的变化,但扫描次数对弯槽形态影响不大,如图 19(a)~(e)所示,离焦量分别为 $-20, 0, 20, 40, 60 \mu\text{m}$ 。该研究证实了艾里光束在弯槽加工的可行性,但对于艾里光束弯曲的控制还有待研究,例如精准控制艾里光束光斑的离焦量,此外还需要考虑到旁瓣烧蚀的影响。

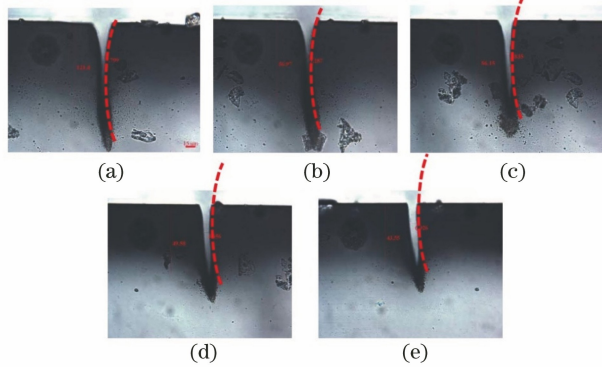


图 19 利用艾里光束以不同的离焦量加工弯槽结构^[27]

Fig. 19 Curved structure were processed by Airy beam with different focuses^[27]

Wang 等^[28]通过动态加载马丢光束和贝塞尔光束制备微笼,分别对比了结构光场曝光和单点曝光的加工效率,加工示意图和结果如图 20 所示。研究者通过改变马丢光束的阶数和椭圆参数,分别控制焦点数目和其分布圆环的直径。实验利用马丢光束和贝塞尔光束以 $50 \mu\text{m/s}$ 的纵向扫描速度进行微柱阵列和连接环的加工,并通过动态加载计算全息图,实现多层微柱的连接。与单点曝光法对比,该加工方法的效率提高了两个数量级。通过分层制造的方法,制备了高度为 $90 \mu\text{m}$,直径为 $10.8 \mu\text{m}$ 的微

笼,纵横比高达 $9:1$ 。此外,通过设计微柱的间距,微笼能够应用于不同尺寸微粒的捕获。该结构也可应用于细胞支架的制备,用于细胞的培养和观察。

无衍射光束的引入能够提高微纳结构加工的可控性和灵活性,只需要改变计算全息图,即可实现对无衍射光束的光场参数进行控制,而不需要改变光路。目前的研究仍然以贝塞尔光束加工为主,对其他无衍射光束的研究相对较少,如艾里光束和马丢光束等。结合动态加载全息图的方法,引入不同类型的无衍射光束,可实现特殊微纳结构的加工。

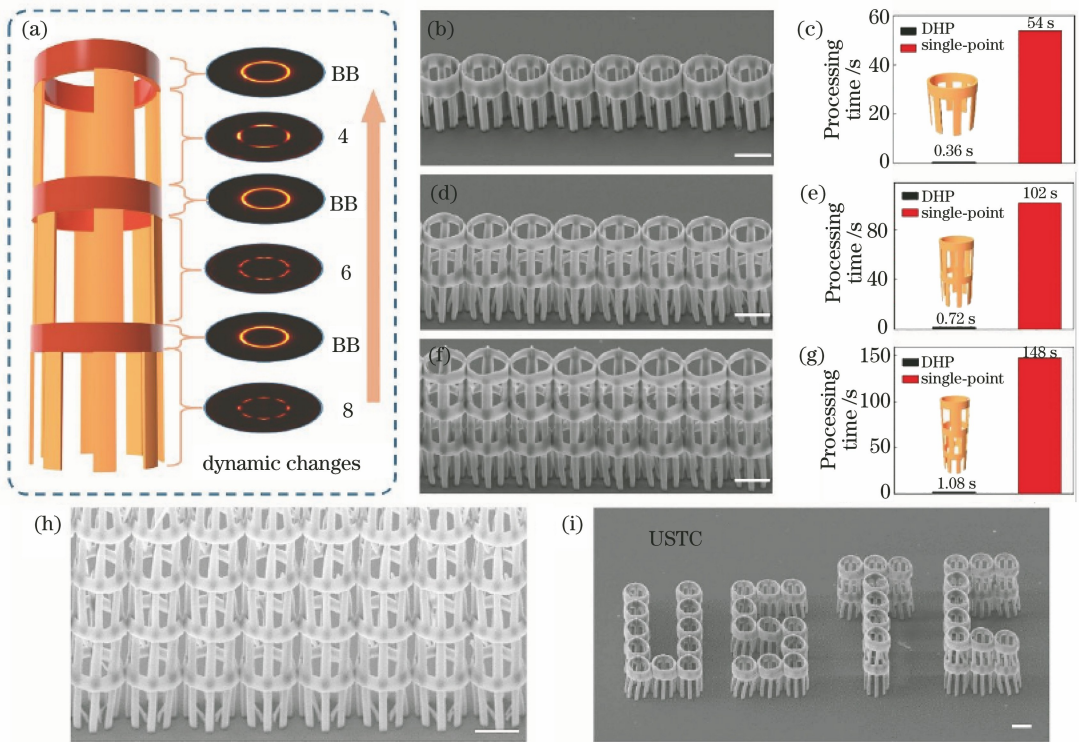


图 20 利用动态全息加工技术实现多种 3D 微笼的加工^[28]

Fig. 20 Various kinds of 3D microcages fabrication with the dynamic holographic processing technique^[28]

3.3 涡旋光束

手性微纳结构可使手性分子的信号得到增强,在产量受限药物的手性检测应用中能更加快捷准确地获得结果,可应用于光电材料和生物检测。因此,其制造方法是目前的研究热点之一。手性结构可采用双光子聚合单点法制备,但该方法加工效率低,难以实现手性结构大面积制备。为此,研究者通过涡旋光束实现手性结构的加工。下面介绍基于空间光调制器生成的涡旋光束在手性结构加工方面的研究。

Ni 等^[29]利用 SLM 实现涡旋光束与平面波共轴传播。外圈相位随方位角变化产生涡旋光,而中心采用等相位光束产生平面波,最后通过径向相位偏移实现涡旋光与平面波的干涉。实验设置涡旋光拓扑荷数为 ± 3 , ± 4 和 ± 6 ,分别制备了螺旋叶为 3, 4, 6 的手性结构。改变平面波的相位和拓扑荷数,可实现手性结构的旋转。与单点加工相比,该方法加工效率提高了两个数量级。Ni 等^[30]进一步采用全息叠加相反相位涡旋光的方法,实现微斜柱结构的加工。通过单次曝光,在光刻胶中加工出镜像对称的倾斜微柱。倾斜微柱在毛细力的作用下与相邻结构进行自组装,得到倾斜微柱阵列,可应用于微粒的捕获。

Li 等^[31]利用拉盖尔高斯函数在 5 种模式下叠

加形成螺旋光束,通过双高斯函数和阶跃函数相结合优化了双螺旋焦点光强。在紧聚焦下,制备了周期为 $4\ \mu\text{m}$ 的 10×10 的双螺旋阵列结构,如图 21 所示。该方法在保持结构螺旋数的同时,抑制了旁瓣光强,降低了双螺旋结构粘结。

Liu 等^[32]将光束整形成螺旋光场,一次曝光还原银离子,形成金属双螺旋结构。为了减少旁瓣的影响,实验采用高数值孔径物镜,在保持较高的螺旋数的情况下,实现了主瓣的分离。结果表明,银双螺旋阵列表现出明显的光学手性,波长范围为 $3.5\sim 8.5\ \mu\text{m}$,如图 22 所示。

由此可见,基于空间光调制器的光束整形技术为飞秒激光加工注入新的活力,线/面形光场、无衍射类光束和涡旋光束的引入,提高了飞秒激光加工的效率 and 的灵活性,尤其是三维微纳结构的加工。目前,基于空间光调制器的光束整形技术应用集中于增材制造,以提高二维结构甚至是三维结构的加工效率。将 SLM 和运动平台相结合,通过动态加载计算全息图可实现变截面三维结构的制备。但是,对于线/面形光场而言,加工质量还有待提高。无衍射类光束如贝塞尔光束、艾里光束和马丢光束,仍然广泛应用于光束整形。贝塞尔光束是实验上研究较多的光束,可应用于微管道和微孔的加工,而对

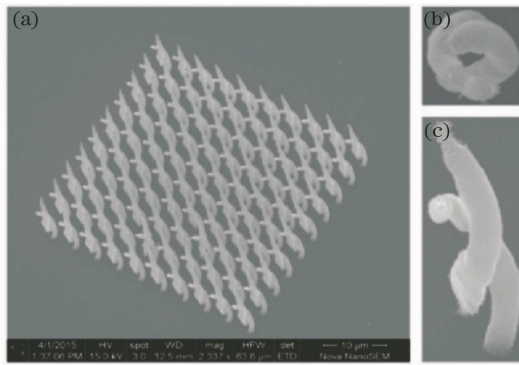


图 21 聚合制备的双螺旋结构 SEM 图^[31]。(a) 双螺旋结构阵列；(b)(c) 双螺旋结构的俯视图和侧视图
Fig. 21 SEM images of polymerized double-helix microstructures^[31]. (a) Double-helix microstructure array; (b)(c) top and side view of a single double-helix microstructure

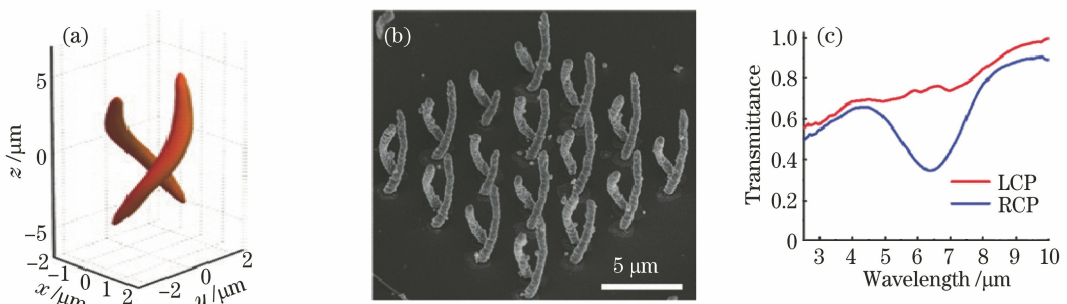


图 22 利用双螺旋光束还原银双螺旋结构^[32]。(a) 双螺旋聚焦光场分布；(b) 双螺旋阵列的 SEM 图；
(c) 测量银双螺旋阵列以常规入射角对左旋圆偏振和右旋圆偏振入射光的透过率
Fig. 22 Photoreduction of silver double helix with double-helix beam^[32]. (a) Double-helix focal intensity distribution; (b) SEM images of an array of silver double helix.; (c) measured transmittances of the double-helix silver array for left circular polarization and right circular polarization light at normal incidence

于艾里光束和马丢光束的应用相对较少,可以根据所设计的微纳结构特点结合多种光束进行加工。此外,涡旋光束可应用于手性结构的加工,通过改变计算全息图参数,可实现对螺旋叶数和旋向进行控制。

4 矢量光场加工

激光加工常用的偏振态包括线偏振态、圆偏振态和椭圆偏振态。这三种偏振光在与其传播方向垂直的横截面空间上是均匀分布的,只是标量光场^[33],与之相对的是矢量光场。空间光调制器能够对飞秒激光的振幅、相位和偏振状态进行调制。由于激光的偏振态影响加工质量,因此利用空间光调制器对飞秒激光的偏振状态调制也是研究热点之一。结合空间光调制器,飞秒激光的偏振态可调制为径向偏振和角向偏振,这两种偏振光在激光微加工方面具有独特的优势^[34-35]。下面介绍基于空间光调制器的矢量光场在微纳加工研究进展。

目前利用矢量光场的加工可应用于钻孔和切割。为了提高飞秒激光打孔精度,郭钊^[36]研究了偏

振态对柔性电路板(FPC)微孔加工的孔径大小、烧蚀程度和圆度的影响。结合空间光调制器、半波片和四分之一波片,分别生成线偏振光、圆偏振光、径向偏振光和角向偏振光,调制方法如表 1 所示。结果表明,与线偏振光和圆偏振光相比,径向偏振光和角向偏振光所加工的孔径大小略大,圆度更高。娄凯^[37]利用空间光调制器将调制全息光栅空间分布以及初始相位分布,获得不同偏振态的多焦点阵列,并应用于微孔阵列的加工,该方法提高了微孔加工的效率和质量。

Allegre 等^[34]对比了角向偏振光、径向偏振光和圆偏振光在微切割应用的效率和质量。实验分别利用三种偏振光分别切割厚度为 200、310、380 μm 的不锈钢片。结果表明,径向偏振光切割所用的时间最短,效率最高,主要因为径向偏振光能够使激光能量更好地耦合到侧壁上。实验对比发现,三种偏振光加工表面粗糙度差别不大,均为 1.0 μm 。

除了微孔和切割加工,SLM 还能够将实现光束整形和偏振调制两种方法相结合,实现特定区域

表 1 线偏振光、圆偏振光、径向偏振光和角向偏振光的产生方法^[36]
 Table 1 Generation of linear, circular, radial, and angular polarized light^[36]

Polarization	Half wave plate / (°)	SLM loading hologram	Quarter wave plate / (°)	Light field vector distribution
Linear polarization	0		0	
Circular polarization	0		-45	
Radial polarization	22.5		-45	
Angular polarization	22.5		-45	

诱导周期性条纹^[38]。Hasegawa 等^[39]采用双空间光调制器,将光束整形为多焦点阵列,并将其设置为两种不同的线偏振方向。实验参数为 1.26 μJ 的激光能量和 20 μm/s 的扫描速度,得到条纹结构的周期为 140 nm。Hasegawa 等^[40]进一步线形光场上实现不同的线偏振方向,如图 23 所示。实验设置了脉冲能量为 3.2 μJ,脉冲数分别是 1、100、10000[分别对应于图 23(f)~(h)]。以上方法将光束整形与

偏振控制相结合,实现了对纳米结构在特定区域的可控制造,可应用于各向异性纳米结构的制备。Hayasaki 等^[41]采用双空间调制器分别产生径向偏振光、角向偏振光、风车状偏振光,加工原理和结果如图 24 所示。双 SLM 加载全息图分别如图 24(a)、(d)、(g)所示,分别得到三种偏振光。实验参数为激光能量 270 nJ,脉冲数为 10000,在弹坑壁面得到纳米结构。该纳米结构间距为 180 nm,方

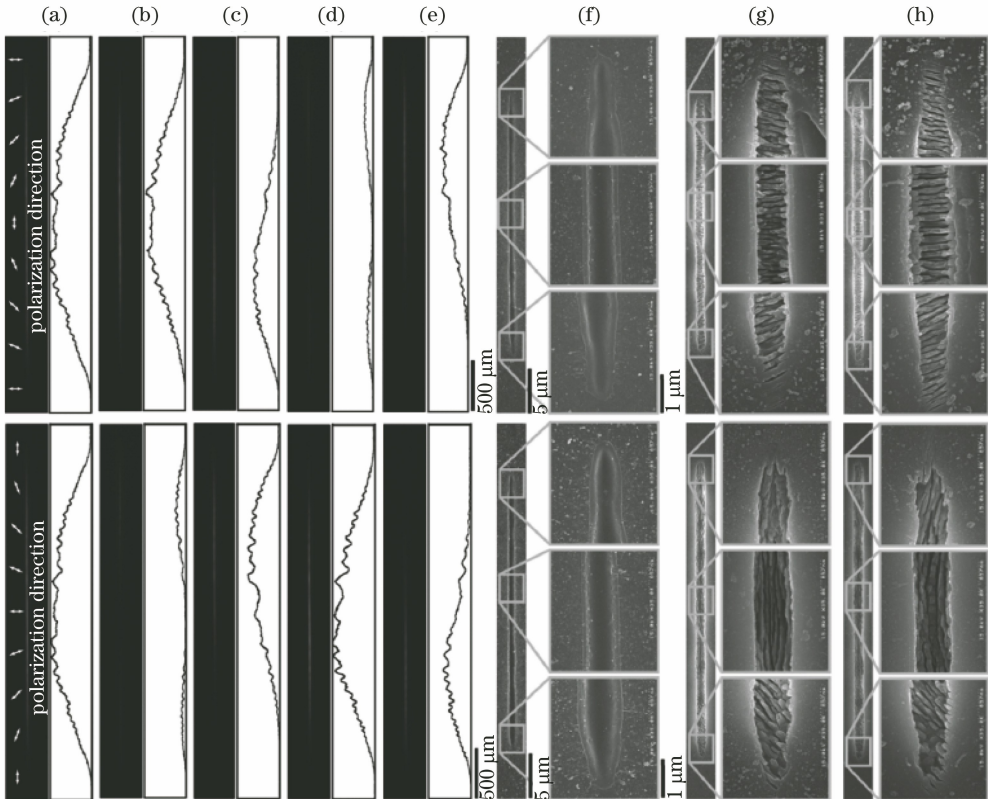


图 23 线偏振方向在线形光场随位置而发生改变^[40]

Fig. 23 Linear polarization directions change with positions in the line-shape beam^[40]

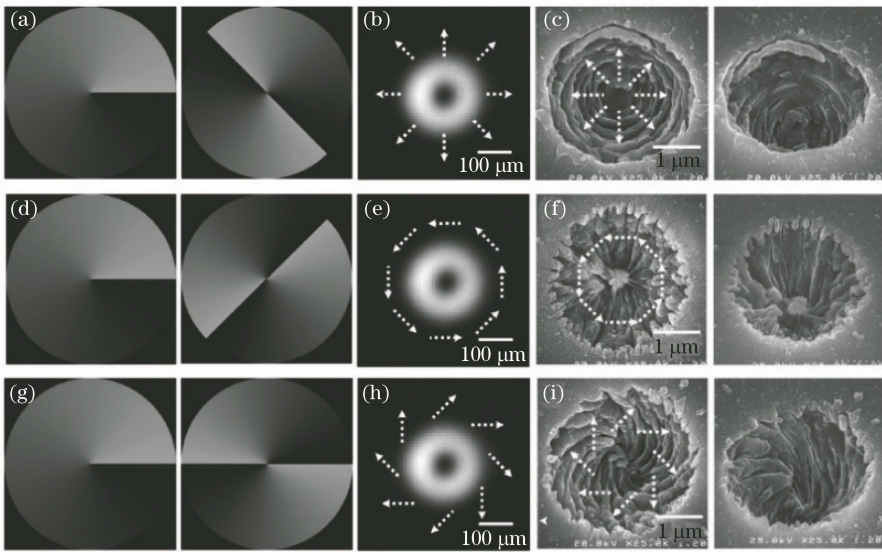


图 24 圆柱矢量光束的生成^[41]。(a)~(c)径向偏振光;(d)~(f)角向偏振光;(g)~(i)风车状偏振光。

从左到右依次为调制波前和偏振的全息图、光场重建图、SEM 图

Fig. 24 Generations of cylindrical vector beams^[41]. (a)-(c) Radial polarization beam; (d)-(f) azimuth polarization beam; (g)-(i) windmill polarization beam. From the left to right, two CGHs for the wavefront and polarization modulations, the optical reconstruction, and the SEM images of fabricated structure

向垂直于偏振方向。

目前,国内关于飞秒激光矢量光场的研究处于起步阶段,人们主要研究了这种加工方法在微孔或切割的应用。矢量光场可以结合多焦点和光束整形,可以实现纳米级复合结构的加工,例如结合线形光场和面形光场,通过加载不同的全息图可以实现纳米条纹的控制。该方法在摩擦控制、各向异性浸润性和减反射等领域具有潜在应用。

5 光场质量优化方法

空间光调制器像素之间具有间隙,这些间隙所构成的区域被称为“死区”。死区对入射光产生了不可忽略的恒相位调制作用,即产生了零级和其他级次衍射,降低调制光场质量。为了抑制零级光,通常需要在空间光调制器重载入辅助的全息图,如载入闪耀光栅和发散波球面因子^[42],将零级光与目标光场分离。此外,光场均匀性和衍射效率是目前加工主要考虑的问题,光场均匀性影响了加工质量,而衍射效率影响了对入射光能的利用率。下面从提高光场均匀性和衍射效率两个方面,综述了近几年对光场均匀性和衍射效率的研究。算法的优化可提高光场均匀性,常用算法包括 GS (Gerchberg-Saxton) 算法、GSW (Weighted Gerchberg-Saxton) 算法、MRAF (Mixed Region Amplitude Freedom) 算法和 ORA 算法。

苏亚辉等^[43]利用 GS 算法分别研究了焦点以直

线分布和三角形分布的光场质量。研究表明,直线分布的焦点阵列均匀性仅有 79%,而采用三角形分布的焦点阵列可以获得接近 100% 的光场均匀性。胡勇涛等^[44]采用叠加多个衍射光栅产生多光束的原理,利用 GS 算法对目标多焦点进行优化并计算出相应的相位全息图,将该全息图加载到空间光调制器中获得了焦点阵列。研究指出,由于各焦点的能量随其位置而发生变化,焦点光强的均匀性差,还需要进一步优化算法。以上研究表明,尽管采用 GS 算法生成计算全息图,多焦点的光场均匀性与焦点的分布有关。为了提高光场的均匀性,需要合理布置焦点的位置,并且避相邻焦点相互干涉^[45]。此外,GS 算法常用于生成焦点阵列,而不适用于连续的图形化光场^[46]。

GSW 算法在 GS 算法基础上引入了权重因子,提高算法的迭代速度和光场均匀性。张骆等^[47]基于 GSW 算法生成计算全息图,并应用于在 FPC 表面上加工字母排布的微孔阵列。结果表明,所得到的焦点阵列一致性不低于 73%,高于 GS 算法的理论值 60%。并且,微孔阵列的一致性也达到了 89% 以上。

与 GS 算法和 GSW 算法不同,MRAF 算法引入了“信号区域”和“噪声区域”的概念,并定义能量利用率的下降程度与“信号区域”振幅在全目标光场所占比值为 M 值^[46]。为了提高图形化光场均匀性,Zhang 等^[48]基于 MRAF 算法优化 M 值,研究

了不同 M 值对面形光场加工质量的影响。当 M 值从 1 减小到 0.5 时,光场均匀性逐渐提高,但能量利用率从 65.73% 降低至 4.04%。当能量利用率过低时,需要提高激光能量或延长曝光时间,以达到材料的加工阈值。与 GS 算法和 GSW 算法相比,尽管 MRAF 算法得到的场均匀性较高,但其迭代速度慢,能量利用率不高^[49]。

ORA 算法考虑了全息平面上每个像素点对目标光场的综合影响。随着焦点数量的增加,该算法的迭代时间显著增加。该算法适用于焦点数量较少的情况,并且经过少次迭代,光场均匀性即可达到接近 100%^[13]。然而,该算法不适用于焦点较多的情

况,且焦点的均匀性往往受到了焦点分布的影响。

为了避免迭代算法的复杂性,Kuang 等^[50]考虑了灰度与 SLM 反射率的关系,利用几何掩模图来构建衍射光场,衍射效率随着几何掩模面积增大而增大。为了进一步提高光束质量,Liu 等^[51]在几何掩模板的基础上加入了二元光栅,形成叠加全息图。实验分别研究了二元光栅周期为 160、320、400、500 μm 时的光场质量,当光栅模板间距等于 160 μm 时, ± 1 级的衍射光完全被去除,能量利用率高达 77.67%,同时光场的均匀性较好,如图 25 所示。除此之外,若直接考虑相位和灰度之间的关系,能够在不使用迭代算法的情况下提高光场均匀性^[52]。

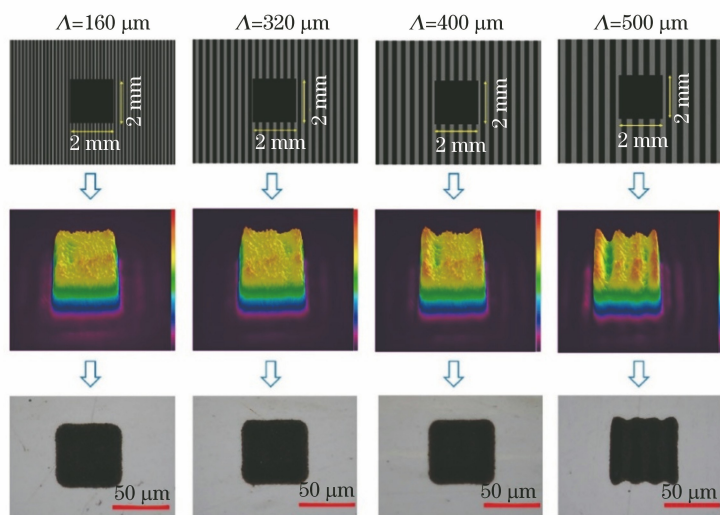


图 25 不同光栅周期对光场质量和加工形貌的影响^[47]

Fig. 25 Effects of different grating cycles on the quality of optical field and the shape of processing^[47]

尽管采用图案化掩模板能够避免复杂的算法,实现对光束整形。但在离焦面上,光场均匀性仍然不高,针对该问题,Zhang 等^[53]提出了多次曝光的方法,将 20 张全息图连续加载到空间光调制器,通过多次曝光,实现离焦平面光场均匀性的提高,从 0.02 提高到 0.6,如图 26 所示。Zhang 等认为,由于初始相位的不同导致算法的噪声不同,通过多次曝光,实现噪声的平均化,减少光场噪声。

目前,光场均匀性和衍射效率是影响加工质量和效率的重要因素。针对光场的均匀性和衍射效率,研究者主要围绕算法展开研究,如 GS 算法、GSW 算法、MRAF 算法和 ORA 算法等。与 MRAF 算法相比,GS 算法和 GSW 算法的收敛速度快,能量利用率较高,但光场均匀性不高。MRAF 和 ORA 算法产生的光场均匀性较高,但迭代速度较慢。因此,需要根据目标光场的特点选择合适的算法。尽管采用迭代算法优化,光场均匀性能够在

一定程度上得到提高,但光场均匀性和衍射效率通常不能同时提高,可以围绕新的加工方法开展研究,如考虑采用具有灰度掩模板进行整形。

6 结束语

空间光调制器可实现对激光振幅、相位和偏振态的调制,为飞秒激光加工领域注入新的活力。本文综述近年来利用空间光调制器的飞秒激光多焦点并行加工、结构光场并行加工和矢量光场加工的研究。与单焦点加工相比,多焦点并行加工可在保证原来的加工精度下提高加工效率。同时,该方法不但能够直接控制多焦点间距、数量、分布和能量比,还可以结合动态加载计算全息图的方法,实现对焦点的动态调控。利用线/面形光场、无衍射光束和涡旋光束可实现特殊结构的快速加工,但线/面形光场的质量还有待提高。在无衍射光束中,与艾里光束和马丢光束相比,贝塞尔光束在微纳加工中具有广

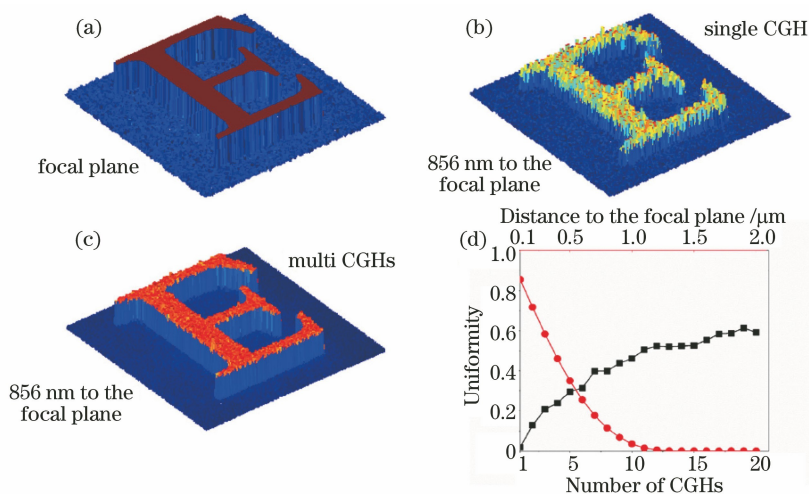


图 26 实验结果。(a)(b)一张计算全息图在聚焦平面和离焦平面的光场仿真;(c) 20 张计算全息图在离焦平面上的光场分布;(d)光场均匀性与全息图数(黑色方形)和离焦量(红色圆形)的关系^[44]

Fig. 26 Experimental results. (a)(b)Optical intensity simulations of single-CGH at the focal plane and defocused plane; (c)optical intensity distribution at the defocused plane of 20 CGHs; (d)plot of optical uniformity as a function of number of CGHs (black square) and defocused position (red circle)^[44]

泛应用。通过改变全息图,可实现调控贝塞尔光束的参数,提高加工灵活性。作为近年研究热点之一的涡旋光束主要应用于手性结构加工。径向偏振光和角向偏振光主要应用于微孔、切割和 LIPSS 调控。光场均匀性和衍射效率是光场质量研究的两个重要方面,提高光场均匀性的方法主要包括优化迭代算法、灰度掩模板法和多次曝光法;提高光场衍射效率主要利用复合掩模板法。但目前基于空间光调制器的飞秒激光加工有以下几方面问题还有待解决:

1) 提高加工质量。结合空间光调制器,飞秒激光加工效率有了较大的提高,但是加工质量还需要进一步提高。在微孔阵列加工方面,微孔径向和轴向的均匀性以及微孔的锥度都是需要考虑的问题。尽管结合动态加载计算全息图的方法,提高了加工灵活性和可控性,但由于 SLM 的刷新频率存在上限,加工质量的提高受限。因此,未来的研究可以围绕基于空间光调制器的飞秒激光加工质量展开研究。

2) 开发无衍射光束的应用。目前利用贝塞尔光束的加工技术研究较多,而对于艾里光束和马丢光束等无衍射光束研究较少。未来可以围绕艾里光束等无衍射光束,进一步开发无衍射光束的加工潜力。

3) 深入矢量光场加工研究。矢量光场在微纳加工研究较少。在未来,一方面可以考虑将矢量光场应用于表面摩擦、浸润性调控等领域。另一方面,为了加工的灵活性,可以将矢量光场与光束整形、动态加载计算全息图相结合。

4) 提高光场质量。通常光场均匀性和衍射效率不能同时提高,可通过算法的优化,进一步提高光场质量。此外,还可以开展灰度掩膜展开研究。

5) 探索新型复合加工方法。目前,飞秒激光并行加工已与湿法腐蚀技术相结合,未来可以开展与飞秒激光其它辅助制造技术研究,如飞秒激光辅助干法刻蚀和不同氛围下的飞秒激光加工等,提高加工精度、效率和灵活性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19989.
- [4] Xu B, Hu W J, Du W Q, et al. Arch-like microsensors with multi-modal and clogging-improved filtering functions by using femtosecond laser multifocal parallel microfabrication [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16739-16753.

- [5] Obata K, Chichkov B N. Advanced femtosecond laser micro/nanostructuring using phase modulation technique [J]. *International Journal of Optomechanics*, 2013, 7(4): 296-303.
- [6] Qian D D, Yang L, Zhang Y C, et al. Flexible and rapid fabrication of silver microheaters with spatially modulated multifoci by femtosecond laser multiphoton reduction [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5335-5338.
- [7] Zhou Q. Silicon surface micro-structure fabrication by femtosecond laser [D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2013: 39-41.
周强. 飞秒激光制备单晶硅表面微结构研究 [D]. 西安: 西安邮电大学, 2013: 39-41.
- [8] Paivasaari K, Silvennoinen M, Kaakkunen J, et al. Femtosecond laser processing and spatial light modulator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8967: 89670F.
- [9] Wang A D, Jiang L, Li X W, et al. Mask-free patterning of high-conductivity metal nanowires in open air by spatially modulated femtosecond laser pulses [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(40): 6238-6243.
- [10] Xu Z J, Jiang L, Li X W, et al. Flashablation of tunable and deep-subwavelength nanogap by using a spatially modulated femtosecond laser pulse for plasmonic application [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(8): 4933-4941.
- [11] Wang A D, Jiang L, Li X W, et al. Nanoscale material redistribution induced by spatially modulated femtosecond laser pulses for flexible high-efficiency surface patterning [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31431-31442.
- [12] Cao X W, Lu Y M, Fan H, et al. Wet-etching-assisted femtosecond laser holographic processing of a sapphire concave microlens array [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(32): 9604-9608.
- [13] 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.
- [14] Cao X W. Study of femtosecond laser fabrication of micro-optical components based on SLM [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 31-63.
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 [D]. 长春: 吉林大学, 2019: 31-63.
- [15] Du X, Zhang H, Cheng C, et al. Space-selective precipitation of ZnO crystals in glass by using high repetition rate femtosecond laser irradiation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17908-17914.
- [16] Du X, Sakakura M, Kurita T, et al. Square-shape distribution of ZnO crystals in glass by using a spatial light modulator [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 448: 79-82.
- [17] Yang L, Li J W, Hu Y L, et al. Projection two-photon polymerization using a spatial light modulator [J]. *Optics Communications*, 2014, 331: 82-86.
- [18] Hasegawa S, Shiono K, Hayasaki Y. Femtosecond laser processing with a holographic line-shaped beam [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23185-23194.
- [19] Li B H, Jiang L, Li X W, et al. Flexible gray-scale surface patterning through spatiotemporal-interference-based femtosecond laser shaping [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(24): 1801021.
- [20] Pan D, Li J W, Yang L, et al. Femtosecond laserholographic fabrication of hydrogel cell scaffold [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2277-2282.
潘登, 李家文, 杨亮, 等. 水凝胶支架的飞秒激光全息加工 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2277-2282.
- [21] Yang L, Ji S Y, Xie K N, et al. High efficiency fabrication of complex microtube arrays by scanning focused femtosecond laser Bessel beam for trapping/releasing biological cells [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8144-8157.
- [22] Ji S Y, Yang L, Hu Y L, et al. Dimension-controllable microtube arrays by dynamic holographic processing as 3D yeast culture scaffolds for asymmetrical growth regulation [J]. *Small*, 2017, 13(34): 1701190.
- [23] Pan D, Cai Z, Ji S Y, et al. Microtubes with complex cross section fabricated by C-shaped Bessel laser beam for mimicking stomata that opens and closes rapidly [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(42): 36369-36376.
- [24] Yu X M, Zhang M, Lei S T. Axial control of two-photon polymerization with femtosecond Bessel beam [C] // *Proceedings of ASME Conference on ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated With the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*, 2017.
- [25] Yao Z L, Jiang L, Li X W, et al. Non-diffraction-length, tunable, Bessel-like beams generation by spatially shaping a femtosecond laser beam for high-aspect-ratio micro-hole drilling [J]. *Optics Express*,

- 2018, 26(17): 21960-21968.
- [26] Yu X M, Trallero-Herrero C A, Lei S T. Materials processing with superposed Bessel beams [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 360: 833-839.
- [27] Liu Y. New methods for femtosecond laser micromachining of controllable bending structures and application [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 52-59.
刘毅. 飞秒激光可控弯曲结构加工新方法及其应用 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 52-59.
- [28] 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.
- [29] 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: Science & Applications*, 2017, 6(7): 57-64.
- [30] Ni J C, Wang Z Y, Li Z Q, et al. Microoptics: multifurcate assembly of slanted micropillars fabricated by superposition of optical vortices and application in high-efficiency trapping microparticles [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(45): 1701939.
- [31] Li Y, Liu L P, Yang D, et al. Femtosecond laser nano/microfabrication via three-dimensional focal field engineering [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10092: 100920B.
- [32] Liu L P, Yang D, Wan W P, et al. Fast fabrication of silver helical metamaterial with single-exposure femtosecond laser photoreduction [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1087-1093.
- [33] Zhai Z S, Hu Y T, Lü Q H, et al. Research on controlling the polarization state of laser beam with a spatial light modulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 032601.
翟中生, 胡勇涛, 吕清花, 等. 基于空间光调制器的光束偏振态控制方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 032601.
- [34] Allegre O J, Perrie W, Edwardson S P, et al. Laser microprocessing of steel with radially and azimuthally polarized femtosecond vortex pulses [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(8): 085601.
- [35] Meier M, Romano V, Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation [J]. *Applied Physics A*, 2007, 86(3): 329-334.
- [36] Guo Z. Study on drilling technology of FPC with different polarized light [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017: 38-49.
郭钊. 不同偏振光对 FPC 打孔加工技术研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017: 38-49.
- [37] Lou K. Spatial control of femtosecond vector optical field and its application in micro/nano-fabrication [D]. Tianjin: Nankai University, 2013: 102-121.
娄凯. 飞秒矢量光场空间调控及其在微纳加工中的应用 [D]. 天津: 南开大学, 2013: 102-121.
- [38] Tang Y, Li J, Zhou T, et al. Dynamic beam shaping with polarization control at the image plane for material processing [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 581-584.
- [39] Hasegawa S, Hayasaki Y. Polarization distribution control of parallel femtosecond pulses with spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 12987-12995.
- [40] Hasegawa S, Hayasaki Y. Holographic vector wave femtosecond laser processing [J]. *International Journal of Optomechanics*, 2014, 8(2): 73-88.
- [41] Yoshio H, Hasegawa S. Holographic vector-wave femtosecond laser processing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9764: 97641C.
- [42] Wang C W, Su Y H, Wang J L, et al. Method for holographic femtosecond laser parallel processing using digital blazed grating and the divergent spherical wave [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(1): 016109.
- [43] Su Y H, Wang J L, Yang L, et al. Uniformity of multi-foci for holographic femtosecond laser parallel fabrication [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 1936-1941.
苏亚辉, 汪金礼, 杨亮, 等. 飞秒激光全息并行加工中的多焦点均一性 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 1936-1941.
- [44] Hu Y T, Zhai Z S, Lü Q H, et al. Parallel processing with femtosecond laser using spatial light modulator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 315-320.
胡勇涛, 翟中生, 吕清花, 等. 基于空间光调制器的飞秒并行加工方法研究 [J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 315-320.
- [45] Hayasaki Y, Nishitani M, Takahashi H, et al. Experimental investigation of the closest parallel pulses in holographic femtosecond laser processing [J]. *Applied Physics A*, 2012, 107(2): 357-362.
- [46] Zhang C C. High efficiency and high resolution

- femtosecond laser fabrication based on spatial light modulation technique [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 85-87.
- 张晨初. 基于空间光调制技术的高速高分辨飞秒激光加工[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 85-87.
- [47] Zhang L, Zhai Z S, Lü Q H, et al. Research on efficient parallel femtosecond laser micro-drilling technique [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2018, 33(4): 18-21.
- 张骆, 翟中生, 吕清花, 等. 飞秒激光高效并行微孔加工技术研究[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(4): 18-21.
- [48] 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]. Scientific Reports, 2016, 6: 33281.
- [49] Yang L. Research on parallel femtosecond laser fabrication technologies with spatial light modulator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 39-42.
- 杨亮. 基于空间光调制器的飞秒激光并行加工技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 39-42.
- [50] Kuang Z, Li J N, Edwardson S, et al. Ultrafast laser beam shaping for material processing at imaging plane by geometric masks using a spatial light modulator [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 70: 1-5.
- [51] Liu D, Wang Y T, Zhai Z S, et al. Dynamic laser beam shaping for material processing using hybrid holograms[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 102: 68-73.
- [52] Li J N, Tang Y, Kuang Z, et al. Multi imaging-based beam shaping for ultrafast laser-material processing using spatial light modulators[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112: 59-67.
- [53] Zhang C C, Hu Y L, Li J W, et al. An improved multi-exposure approach for high quality holographic femtosecond laser patterning [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(22): 221104.