

# 基于空间光调制器的能量可控飞秒激光加工

饶生龙, 吴培超, 张晨初\*, 胡衍雷, 杨亮, 劳召欣, 吴东

中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230026

**摘要** 针对飞秒激光微纳加工技术中激光与加工样品相对运动的控制、聚焦光斑能量的控制中存在的问题, 提出一种基于硅基液晶空间光调制器动态加载计算全息图同时控制焦点位置和能量的新型加工方法。该方法通过加载叠加闪耀光栅的全息图, 控制单点运动来扫描加工二维结构, 无需平台移动。进一步控制全息图的挖空区域, 可以调制入射光斑的能量, 进而控制被加工点阵的形貌。利用这一加工效应, 成功实现各种可控环状结构的加工, 并在光学显微镜下测试达到相应效果, 证明这种加工方法在飞秒激光微纳加工领域具有可行性。

**关键词** 激光制造; 飞秒激光; 双光子聚合加工; 空间光调制器; 计算全息

中图分类号 O34

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0102008

## Energy-Controllable Femtosecond Laser Fabrication Based on Spatial Light Modulator

Rao Shenglong, Wu Peichao, Zhang Chenchu, Hu Yanlei, Yang Liang,  
Lao Zhaoxin, Wu Dong

*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China*

**Abstract** To address the problems of relative movement control of laser and samples and the focus energy control in the femtosecond laser micro-nanofabrication technologies, a new method, which is based on dynamically loading computer-generated holograms through a liquid crystal-on-silicon spatial light modulator, is proposed to simultaneously control the position and energy of the focal spot. By loading superposed blazed grating holograms, two-dimensional structure fabrication can be achieved by single point scanning without platform movement. Further, by controlling the active zone in the hologram, the incident beam energy can be modulated, and thus the lattice morphology can be controlled. Taking advantages of this method, we have fabricated ring structures successfully, and got the corresponding effect under an optical microscope. This proves that the method is feasible in the field of femtosecond laser micro-nanofabrication.

**Key words** laser manufacturing; femtosecond laser; two-photon polymerization fabrication; spatial light modulator; computer holography

**OCIS codes** 140.3390; 090.1760; 190.7110; 220.4000

## 1 引言

飞秒激光加工技术已成为微纳加工领域的前沿技术之一<sup>[1]</sup>。与传统连续长脉冲激光相比, 飞秒激光在

收稿日期: 2016-08-26; 收到修改稿日期: 2016-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(51275502, 61475149, 51405464, 91223203, 91423103, 11204250)、中国青年千人计划、安徽省自然科学基金(1408085ME104)、中央高校基本科研业务费专项资金(WK6030000004)

作者简介: 饶生龙(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光微纳加工方面的研究。

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

导师简介: 吴东(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事飞秒激光微纳加工方面的研究。

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

\* 通信联系人。E-mail: nanozcc@ustc.edu.cn

微纳加工方面具有许多不可比拟的独特优势,如真三维、分辨率高、热影响小和加工材料广泛等优点<sup>[2-3]</sup>。飞秒激光的这些优势,使其在微光学、微机械、微流体和生物医学等领域都有广泛的应用,例如加工相位型波带片<sup>[4]</sup>、达曼光栅<sup>[5]</sup>、微磁驱动器<sup>[6-8]</sup>、微流控芯片<sup>[9]</sup>等微纳器件。

飞秒激光双光子传统加工方法采用单点扫描方式,加工单个结构一般需要十几分钟甚至数小时<sup>[10]</sup>,对于当今要求高效率的产业化微纳加工过程而言,由于其效率低下,很大程度上制约了飞秒激光加工技术的发展。为了提高双光子聚合(TPP)加工效率,通常使用的方法有:使用分光元件将入射光分成多光束,实现多焦点并行加工<sup>[11]</sup>;利用空间光调制器(SLM)调制入射光场,实现无掩模图形化加工<sup>[12]</sup>等。空间光调制器凭借其可控并行加工的灵活性而倍受青睐,通过加载计算全息(CGH)图可以控制任意焦点列阵<sup>[13]</sup>,有效解决了双光子加工效率低下的问题,为飞秒激光并行加工提供了新的模式。

本文主要研究叠加闪耀光栅的全息图在加工过程中对光斑的调制作用,利用 SLM 的高灵活性,提出一种同时控制焦点位置和能量的加工方法。通过灵活改变焦点的能量和空间坐标,实现单层扫描加工 2.5 维浮雕结构。研究了这种加工模式下能够保证的加工精度与操作的可行性。该方法旨在降低微纳加工系统的经济成本,提高加工效率。

## 2 加工系统与基本原理

### 2.1 加工系统原理

实验采用图 1 所示的加工系统。飞秒激光的光源波长为 800 nm,频率为 80 MHz,脉冲宽度为 75 fs。激光能量由半波片和格兰激光分束器控制。光束经过反射镜、扩束器后,入射到 SLM 的液晶面。SLM 通过加载闪耀光栅,改变入射光的相位分布,实现光束反射角的调制。SLM 是一个衍射光学元件,被调制的光束会产生多个衍射级次,实验过程中只有 +1 级调制光通过光阑,其他衍射级次的光被阻挡在光阑之外。调制后的光束经过透镜 1 和透镜 2 组成的 4f 滤波系统,最后入射到物镜(Olympus 100X,日本,NA=0.9)进行加工。加工样品为滴涂于盖玻片表面的光刻胶 SZ2080 (IESL FORTH,希腊)。通过加载全息图,调制出不同图案、不同焦点位置的光束,以实现目标结构的加工。通过计算机控制光闸的开闭。调整外部光源的亮度,实时观测 CCD 中加工结构的形貌。

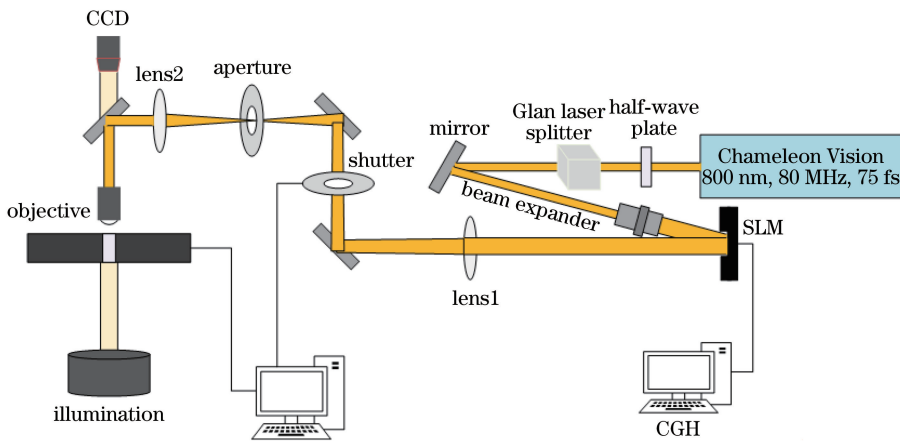


图 1 飞秒激光双光子加工系统示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond TPP fabrication system

### 2.2 焦点能量与坐标控制原理

硅基液晶 SLM 可以通过改变液晶分子排列实现对入射光场的相位调制。利用这种特性,可以在 SLM 上加载多种相位函数,实现对光场的灵活控制。

傅里叶计算全息原理如图 2 所示,入射激光为高斯分布的平行光,其复振幅可以表示为

$$\tilde{A}_0(i_1, i_2) = A_0(i_1, i_2) \exp[j\varphi_0(i_1, i_2)], \quad (1)$$

式中  $i_1, i_2$  是像素点坐标,  $A_0(i_1, i_2)$  是振幅,  $\varphi_0(i_1, i_2)$  是相位。加载计算全息图的 SLM 调制后的光束复

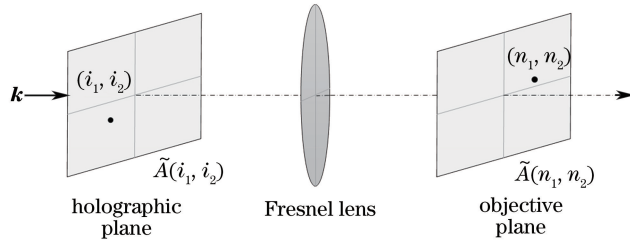


图 2 傅里叶计算全息原理示意图

Fig. 2 Schematic of Fourier computer generated holography

振幅为

$$\tilde{A}(i_1, i_2) = \tilde{A}_0(i_1, i_2) \exp[j\varphi_1(i_1, i_2)] = A_0(i_1, i_2) \exp[j\varphi(i_1, i_2)], \quad (2)$$

式中  $\varphi_1(i_1, i_2)$  为计算全息图对应的相位分布,即计算全息的求解目标。经相位调制后的光束  $\tilde{A}(i_1, i_2)$  经透镜聚焦,在成像空间内形成设计的目标光场,如多焦点阵列、图形化光场等。

通过加载闪耀光栅来精确控制焦点的空间位置,闪耀光栅全息图数学表达式(即出射光的偏移量与入射光的相位调制的关系)为

$$\varphi(x, y) = 2\pi(\Delta x \cdot x + \Delta y \cdot y), \quad (3)$$

式中  $x, y$  为 SLM 上的坐标,  $\Delta x, \Delta y$  为焦点的偏移量。控制全息图中的闪耀距离  $\Delta x, \Delta y$  就可以控制焦点在平面的位置。调整闪耀光栅的周期  $T$  时,偏移量  $\Delta x, \Delta y$  也随之改变,图 3(a)、(b) 为不同闪耀周期的全息图,由于图 3(a) 中的闪耀光栅周期较小,所以闪耀角也相对较大,这意味着使用图 3(a) 时,焦点的步进距离  $\Delta x, \Delta y$  小于图 3(b) 中的步进距离。通过合理调整周期,可以实现步进距离的精确控制。

除了控制焦点的空间位置,SLM 还可以通过控制活动区域实时控制焦点能量。图 3(c)、(d) 是不同活动区域的闪耀光栅全息图,图中黑色部分直接反射入射光,不叠加任何调制,因此,照射在黑色挖空区域的激光能量会被直接反射入 0 级,而在加工中只利用 +1 级能量,因此可以通过控制黑色区域的大小实时控制总能量利用率,继而控制焦点能量。图 3(c) 中挖空面积相对于图 3(d) 更小,活动区域更大,得到的焦点能量也更高。

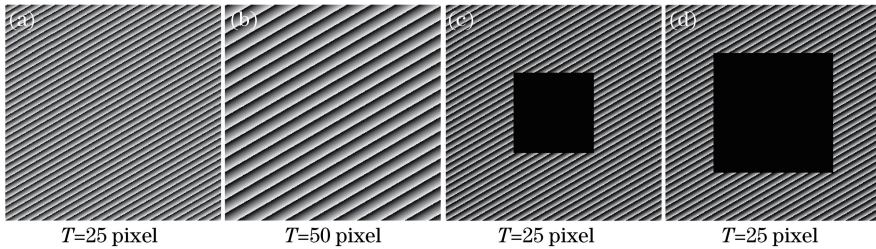


图 3 闪耀光栅全息图。(a)(b)不同周期;(c)(d)不同挖空区域

Fig. 3 Holograms of blazed gratings. (a)(b) Blazed grating with different periods; (c)(d) blazed grating with different active zones

综合以上两种控制方法,通过控制不同闪耀周期,可以实现不同加工步距的单点扫描,而通过控制活动区域的大小,可以实现对焦点的能量控制。

### 3 实验过程与结果

动态加载不同周期闪耀光栅加工的矩形扫描电子显微镜(SEM)图如图 4(a)~(c)所示。叠加的闪耀光栅周期分别为 540, 1080, 2160 pixel,与理论分析结论相似。闪耀光栅的周期越大,闪耀角越小,对应的步进距离越小,也就更容易得到平整的表面,可以看出,闪耀光栅周期为 2160 pixel 更适合控制焦点加工平整的表面结构。

使用周期为 2160 pixel 的闪耀光栅扫描加工平整表面的同时,可以加入活动区域实时控制,得到不同高度的单点结构,通过单层扫描加工出表面起伏的浮雕结构,如图 4(d)、(e)所示。图 4(d)未加入焦点能量控制,焦点能量相同,加工出的平面结构也是平整的,加入能量实时控制后,设置扫描到中心位置时活动区域更

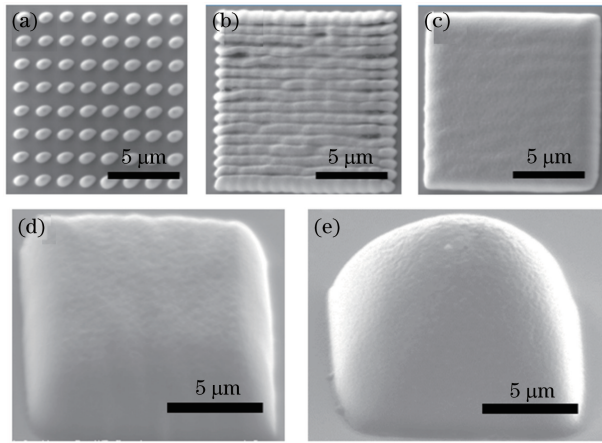


图 4 采用计算全息图控制加工结构的扫描电子显微镜图。(a)(b)(c)对应的闪耀光栅周期分别为 540,1080,2160 pixel; (d)(e)加工过程中不控制能量和实时控制能量得到的加工结果

Fig. 4 SEM images of microstructures fabricated with computer generated holograms. (a)(b)(c) Corresponding to the blazed grating periods of 540 pixel, 1080 pixel and 2160 pixel; results fabricated (d) without energy control and (e) with real-time energy control

大,能量更高,扫描到边缘位置时活动区域更小,能量更低,通过焦点能量控制,单层扫描加工出的结构出现明显的中心凸起。

已经证实,利用 SLM 控制焦点的位置和能量可以实现浮雕结构的单层扫描加工。将闪耀光栅全息图的中部挖空,可以实时控制聚焦点的能量,并且能量的控制程度是可以调节的,活动区域的挖空边长  $d$  为

$$d = (255 - G)a, \quad (4)$$

式中  $G$  为目标图的灰度值, $a$  为能量调制的权重值,调整  $a$  的大小,则对应的能量调制程度不同。如图 5(a)所示,环状目标图的边缘处灰度值较小,控制  $a$  值分别为 0、3、5,可以得到不同的结构侧壁倾斜度。 $a = 0$  时,加工出的结构几乎没有弧度,离焦后也不会对光线产生会聚作用, $a = 3$  时,结构有轻微弧度,离焦后对光线有轻微会聚作用, $a = 5$  时,弧度继续增大,对入射光的会聚作用增强。

将 SZ2080 型光刻胶旋涂于玻片上,保持光刻胶厚度为 200~300  $\mu\text{m}$ 。将制备好的样品置于 100  $^{\circ}\text{C}$  下保持 15 min,烘干光刻胶中的水分。完成结构加工之后,将样品放置在正丙醇溶液中显影,除去未固化的光刻胶。理论目标结构与实际显微镜下观察的结构如图 5 所示。

在 60 $\times$ 光学显微镜下观察的结构图如图 5(b)~(d)所示,图中  $h$  表示不同的扫描次数。由图中结构的

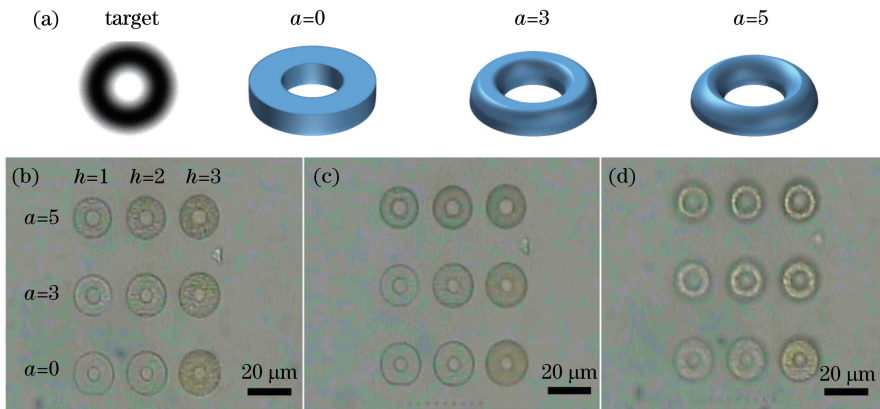


图 5 环状结构设计目标图与加工结构显微镜图。(a)目标结构灰度图与不同  $a$  值的理论示意图; (b)(c)(d)观测平面离基底分别为 0,1,2 mm

Fig. 5 Schematic and microscopic images of annular microstructures fabricated with real-time energy control. (a) Schematic of annular structures fabricated with different  $a$  values; (b)(c)(d) microscopic images captured at focal plane, focal plane 1 mm to the focal plane and 2 mm to the focal plane, respectively



聚光效果可以看出,图 5(d)中  $h=2$ ,  $a=5$  时聚光效果最好,实际加工得到的结构与图 5(a)的理论结构相符合。

## 4 结 论

利用空间光调制器加载闪耀光栅相位全息图,实现对二维结构的扫描加工,并利用空间光调制器的高灵活性,实现加工中焦点能量的实时控制,单层扫描加工出表面凹凸的浮雕结构。相对于传统逐点扫描加工方式,这种方法效率更高,更加简便灵活,只需要动态加载全息图即可完成。实验证明了这一新型加工方法的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Mourou G A, Barty C, Perry M D. Ultrahigh-intensity laser: physics of the extreme on a tabletop[J]. *Physics Today*, 1998, 51(1): 22-28.
- [2] Sugioka K, Hanada Y, Midorikawa K. Three-dimensional femtosecond laser micromachining of photosensitive glass for biomicrochips[J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2010, 4(3): 386-400.
- [3] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 219-225.
- [4] Chen Q D, Wu D, Niu L G, *et al.* Phase lenses and mirrors created by laser micronanofabrication via two-photon photopolymerization[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(17): 171105.
- [5] 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.
- [6] Xia H, Wang J, Tian Y, *et al.* Ferrofluids for fabrication of remotely controllable micro-nanomachines by two-photon polymerization[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(29): 3204-3207.
- [7] Zhu W, Li J X, Leong Y J, *et al.* 3D-printed artificial microfish[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(30): 4411-4417.
- [8] Wang J, Xia H, Xu B B, *et al.* Remote manipulation of micronanomachines containing magnetic nanoparticles[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 581-583.
- [9] Lim T W, Son Y, Jeong Y J, *et al.* Three-dimensionally crossing manifold micro-mixer for fast mixing in a short channel length[J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(1): 100-103.
- [10] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, *et al.* Finer features for functional microdevices[J]. *Nature*, 2001, 412(6848): 697-698.
- [11] Matsuo S, Juodkakis S, Misawa H. Femtosecond laser microfabrication of periodic structures using a microlens array[J]. *Applied Physics A*, 2005, 80(4): 683-686.
- [12] Zhang C C, Hu Y L, Li J W, *et al.* A rapid two-photon fabrication of tube array using an annular Fresnel lens[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3983-3990.
- [13] Takahashi H, Hasegawa S, Takita A, *et al.* Sparse-exposure technique in holographic two-photon polymerization[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16592-16599.