

文章编号 1004-924X(2013)08-1936-06

## 飞秒激光全息并行加工中的多焦点均一性

苏亚辉<sup>1,3\*</sup>, 汪金礼<sup>1</sup>, 杨亮<sup>2</sup>, 李家文<sup>2</sup>, 黄文浩<sup>2</sup>

(1. 安徽大学 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601;

2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

3. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘要:**为了提高飞秒激光加工的效率 and 灵活性,设计了一套飞秒激光全息并行加工系统,并对该系统中加载计算全息图(CGH)生成的多焦点均一性和空间位置分布的关系进行了研究。首先,将空间光调制器(SLM)引入飞秒激光加工光路;然后,采用GS(Gerchberg-Saxton)算法设计了直线型和三角型分布的三焦点阵列。最后,通过数值仿真和实验研究比较了用两种不同空间分布的焦点阵列设计的全息图对均一性的影响。结果表明,在焦点阵列间距较小的情况下,直线型分布设计的焦点阵列不易获得好的均一性,三焦点 $U$ 仅有79%;而用三角型分布焦点阵列设计时,可以获得很好的均一性,三焦点 $U$ 约等于100%。实验数据表明,三角形分布的三焦点可以实现高质量的并行加工,加工的半球状微结构阵列具有微透镜阵列的功能。

**关键词:**飞秒激光;并行加工;空间光调制器;计算全息图;焦点均一性;GS算法

**中图分类号:**TG665;O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.1936

## Uniformity of multi-foci for holographic femtosecond laser parallel fabrication

SU Ya-hui<sup>1,3\*</sup>, WANG Jin-li<sup>1</sup>, YANG Liang<sup>2</sup>, LI Jia-wen<sup>2</sup>, HUANG Wen-hao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of the Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China)

\* Corresponding author, E-mail: ustcsyh@ahu.edu.cn

**Abstract:** To improve the efficiency and flexibility of femtosecond laser fabrication, a holographic femtosecond laser parallel fabrication system was built. The relationship between the uniformity and the spatial distribution of multi-foci generated by Computer-generated Hologram (CGH) was studied. Firstly, a Spatial Light Modulator (SLM) was introduced into the femtosecond laser fabrication system. Then, Gerchberg-Saxton(GS) algorithm was used to design three foci arrays of straight-line distribution and triangular distribution. Finally, the effects of holograms designed by foci arrays of

**收稿日期:**2013-02-27; **修订日期:**2013-04-22.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51275502);安徽省高等学校自然科学基金重点项目(No. KJ2011A014);安徽省自然科学基金资助项目(No. 1308085ME76);中国博士后科学基金资助项目(No. 2012M511416)

straight-line distribution and triangular distribution on the uniformity were compared by numerical simulation and experiments. The results show that the foci array of straight-line distribution is not easy to obtain higher uniformity, and its three-foci  $U$  is only by 79%; however, that of the triangular distribution tends to achieve higher uniformity and its three-foci  $U$  is about 100%. The experiment shows that the three foci of triangular distribution can implement a high quality parallel processing and obtained hemispheric microstructures have microlens array functions.

**Key words:** femtosecond laser; parallel fabrication; Spatial Light Modulator(SLM); Computer-generated Hologram(CGH); focus uniformity; GS algorithm

## 1 引言

飞秒激光加工在微纳米加工中有着无可比拟的优势,如真三维、高分辨、热影响小和加工材料广泛等<sup>[1]</sup>,因此它在微机械、微光学以及其它复杂三维结构的加工中有着广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。但是,当前飞秒激光双光子/多光子吸收一般采用激光直写逐点扫描的加工方法<sup>[4]</sup>,加工一种微结构往往需要几十分钟甚至数小时<sup>[5]</sup>,从而致使飞秒激光微纳加工技术一直难以用于批量化制造,严重阻碍了它的产业化推广。为了提高飞秒激光的加工效率,科学家们在飞秒激光系统中采用了多光束干涉<sup>[6]</sup>、微透镜阵列<sup>[7]</sup>和衍射分束器<sup>[8]</sup>分束聚焦等方法,这些方法大大提高了飞秒激光的加工能力,但是加工成本高,而且只能加工出固定间距或者周期性的结构,加工灵活性差。

近年来,随着空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)的发展,它的动态性、灵活性和实现方法简单等特性越来越受到关注,在飞秒激光加工系统中引入 SLM 调制激光已成为并行加工的有效方法<sup>[9-12]</sup>。在全息并行加工中,SLM 加载计算全息图(Computer-Generated Hologram, CGH)在傅里叶变换面生成多焦点的均一性是并行加工成败的关键因素,而焦点阵列分布的设计会受到加工光路参数及显微镜系统孔径等因素的限制。在设计多焦点阵列时易出现空间焦点分布相对密集、间隔较小的情况,而采用盖斯伯格-萨克斯通算法<sup>[13]</sup>(Gerchberg-Saxton algorithm, GS)在实现这种分布恢复相位设计全息图设计时,数值运算容易陷入局部最优解,从而不能获得很好的一致性分布。本文针对上述情况,研究了 GS 算法设计 CGH 时的多焦点均一性问题,并获得了一致性高的简单点阵分布设计。由于 GS 算

法是迭代傅里叶算法,其运算具有叠加性,因此可以利用高均一性的 CGH 图为基础叠加设计更多点阵分布的全息图,为在放大级激光器下的焦点阵列优化设计奠定了基础。

## 2 实验系统

图 1 为本文设计的飞秒激光全息并行加工系统的结构示意图。实验中,飞秒激光光源采用相干公司 Chameleon 设备,其脉宽为 75 fs、频率为 80 MHz、中心波长为 800 nm。飞秒激光能量可以通过半波片和格兰泰勒棱镜调制,光闸开关控制加工过程的光路通断,经全反射镜和扩束镜后光束到达 SLM(面板型号为 Aurora systems ASI6001,像素大小为  $8.0 \mu\text{m}$ )。其中,GS 算法生成的 CGH 图通过电脑 1 复制模式显示加载到 SLM 上调制飞秒激光,然后再经过另一全反射镜,在傅里叶透镜  $L_1$  的变换面  $P$  处形成多焦点阵列,在  $P$  面滤除零级光等的干扰。因为透镜  $L_1$  和透镜  $L_2$  组成  $4f$  系统,故经过透镜  $L_2$  缩束后,多焦点形成的平行光束进入显微镜系统中,经过物镜(OL, NA 为 1.25)聚焦后在样品中形成加工多焦点,最终通过电脑 2 控制光闸和三维精密移动平台并行加工三维微纳结构。

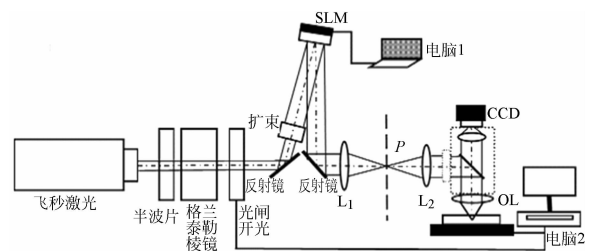


图 1 飞秒激光全息并行加工系统图

Fig. 1 Schematic of holographic femtosecond laser parallel fabrication system

### 3 全息图设计方法

SLM 是一种调制光波波前的衍射光学器件,通过加载 CGH 来实现对入射激光的调制。本文采用纯相位调制 SLM 加载由 GS 算法设计的相位全息图,实现对入射激光的位相调制,再通过傅里叶透镜衍射形成预定分布的多焦点。

在全息图设计时,入射到 SLM 上的光束表示为:

$$u = a \exp(i\phi), \quad (1)$$

其中:系数  $a$  是入射 SLM 全息面的振幅分布,辐角  $\phi$  是该面的相位分布。本文采用的硅基液晶空间光调制器(LCOS, 1 920 × 1 080)为纯相位 SLM 调制元件,其传递函数为:

$$t(x_h, y_h) = \exp[i\phi_h(x_h, y_h)]. \quad (2)$$

当入射光束入射到 LCOS 表面,经调制后的光束可以表示为:

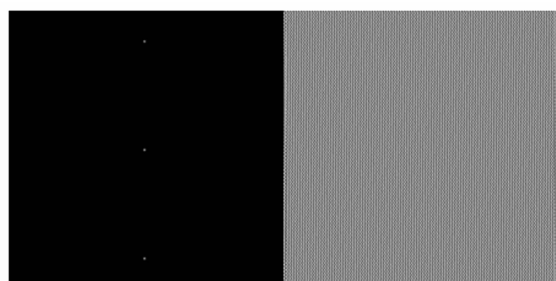
$$u_h = a \exp[i(\phi + \phi_h)]. \quad (3)$$

相位全息图设计的目标是求解  $\phi_h$ ,使得 SLM 调制后的光束  $u_h$  经过衍射场传播在成像空间内的光强分布为所需的多焦点阵列。下面将详细给出焦点间隔较小的情况下,两种不同的焦点列分布 CGH 的设计结果。

### 4 实验结果与分析

#### 4.1 直线型分布

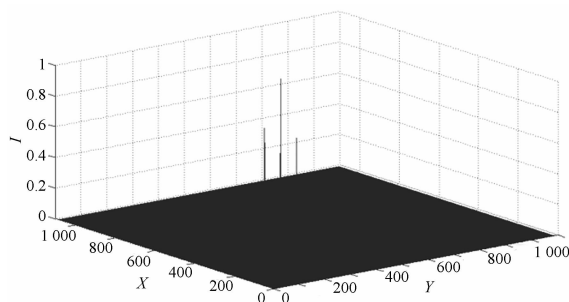
本文以目标图案设计焦点间隔为 80 pixel(总采样数 1 080 × 1 080)为实验对象展开论述。图 2(a)为三焦点直线型分布的目标焦点图案(为



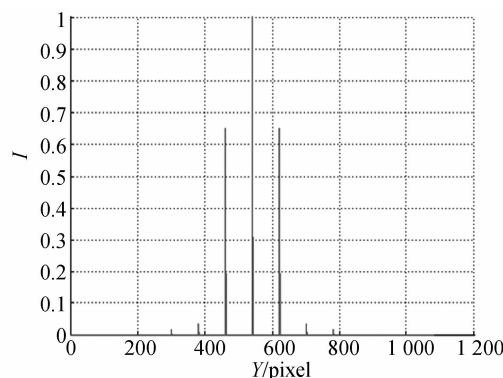
(a) 目标图 (b) 全息图  
(a) Goal pattern (b) Hologram

图 2 三焦点直线分布目标图和其全息图

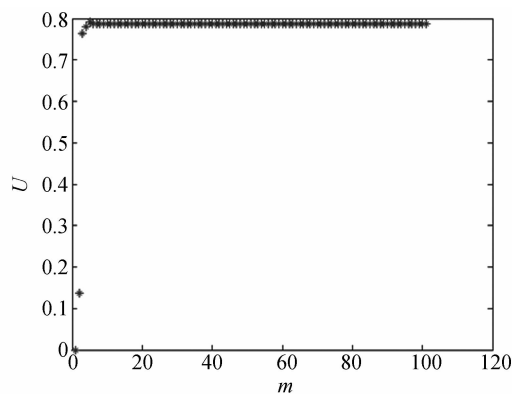
Fig. 2 Straight-line distribution of three foci and its hologram



(a) 三维视场焦点强度分布模拟值  
(a) Intensity of three foci in 3D view



(b) Y 轴侧视图  
(b) Side view in Y-axis



(c) 均一性与迭代次数关系图  
(c) Uniformity  $U$  vs. iteration number  $m$

图 3 直线型分布仿真结果

Fig. 3 Numerical results of straight-line distribution of three foci

清晰观察,图取 200 pixel × 200 pixel);图 2(b)是 GS 算法所得的全息图(总像素数为 1 080 × 1 080)。

图 3(a)为计算机仿真得到的目标图案强度值的三维分布图,将该图投射到 Y 轴上可以直观

显示三焦点的能量分布,如图 3(b)所示。从图 3(b)可以看出,三焦点能量的最小值只有最大值的 0.65 倍。图 3(c)为计算机运算过程的均一性  $U$  与迭代次数  $m$  的关系图。其中,均一性定义为: $U=1-\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}}$ ,  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  为焦点列中焦点能量的最大值和最小值。由图 3(c)可知,迭代最终的均一性只有 0.79。将三焦点引入到显微镜加工系统中,在光刻胶中加工出的微齿轮如图 4 所示。由于三焦点的均一性低,加工出的微结构质量不好,所设计的全息图不能满足全息并行加工的需求。

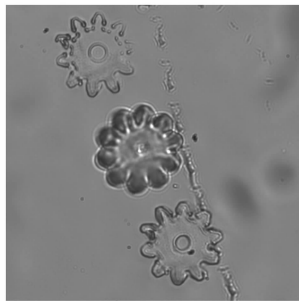
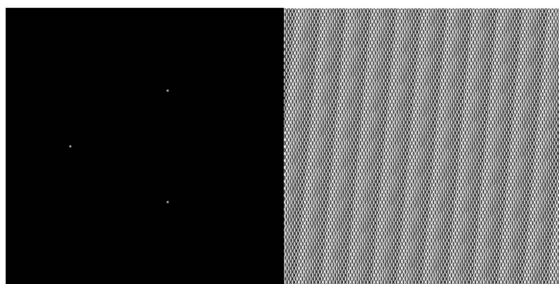


图 4 微齿轮加工结果

Fig. 4 Result of three microgear fabrication

### 4.2 三角型分布

图 5 为三角型分布的目标焦点列和相位全息图分布,多焦点两两间隔 80 pixel,图 5(a)为目标焦点阵列的空间分布图案(为清晰观察,图示取 200 pixel×200 pixel 展示分布),图 5(b)是 GS 算法所得的全息图(总像素为 1 080×1 080)。



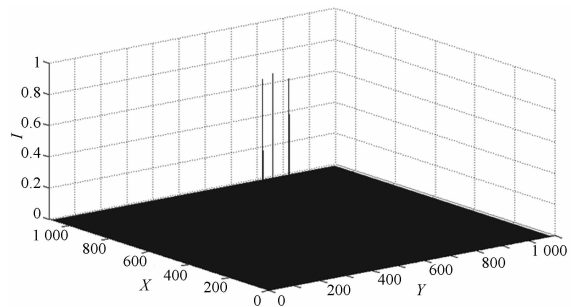
(a) 目标图 (b)全息图  
(a) Goal pattern (b) Hologram

图 5 三焦点三角型分布目标图及其全息图

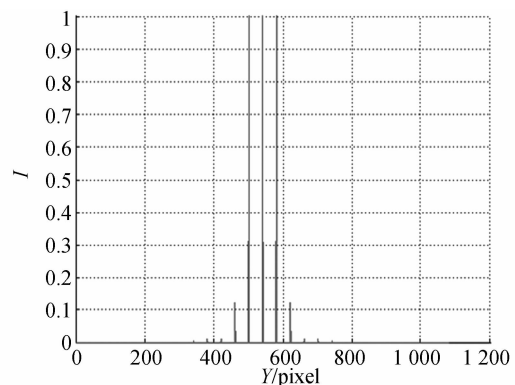
Fig. 5 Triangular distribution of three foci and its hologram

图 6(a)为计算机仿真得到的三焦点强度分布图,图 6(b)为三焦点强度投射到 Y 轴上的情况。

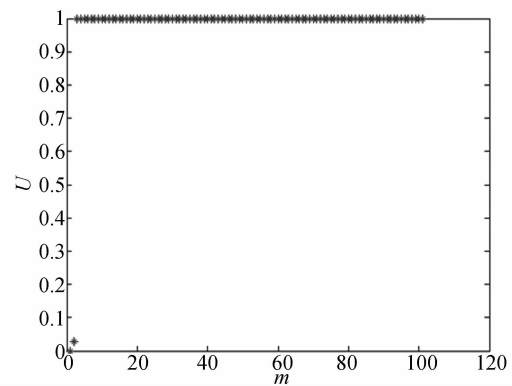
从图 6(b)可以看出三焦点的能量分布基本一致。图 6(c)为迭代过程一致性的关系图。由 6(c)图可知,三焦点均一性几乎达到 100%。将焦点引入显微镜加工系统,加工出的半球状微结构在 SEM 下拍摄的图片如图 7 所示。实验结果表明,多焦点均一性高,加工结果好。



(a) 三维视场焦点强度分布模拟值  
(a) Intensity of three foci in 3D view



(b) Y 轴侧视图  
(b) Side view from Y-axis



(c) 均一性与迭代次数关系图  
(c) Uniformity  $U$  vs. iteration number  $m$

图 6 三角型分布仿真结果

Fig. 6 Numerical results of triangular distribution of three foci

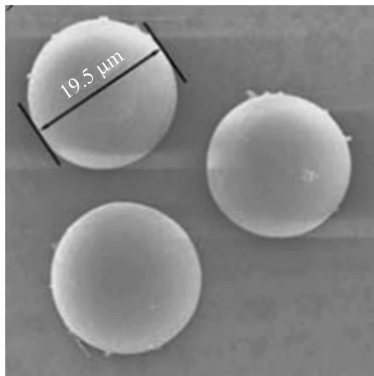
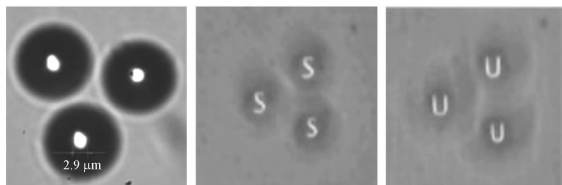


图 7 半球状结构加工的 SEM 图片

Fig. 7 SEM image of three hemispheric structures



(a) 聚焦效应 (b) “S” 成像图 (c) “U” 成像图  
 (a) Light focusing effect (b) Image of “S” (c) Image of “U”

图 8 微结构光学性质测试

Fig. 8 Test of optical property of microstructures

本文通过验证半球状结构的光学性能来进一步提高加工出的半球状结构的质量。如图 8 所示,这种半球状结构具有良好的微透镜性质。由此可知,以较小间隔设计多焦点阵列时,三角型分布比直线型分布设计可实现的均一性更高,加工出的微结构质量更高。

## 5 结 论

本文设计了一套飞秒激光全息并行加工系统,该系统能实现动态灵活可控的并行加工。采用 GS 算法设计位相全息图,通过计算机仿真和实验证明了在焦点阵列间距较小的情况下,直线型分布设计的焦点阵列获得的三焦点的均一性较差,仅有 79%;而三角型分布焦点阵列可以获得很好的三焦点均一性,其值接近 100%。将该结果用于加工微透镜阵列取得了较高的加工质量,本研究为并行技术在微光学器件加工领域的应用奠定了良好的基础。

## 参考文献:

- [1] 董贤子,陈卫强,赵震声,等. 飞秒脉冲激光双光子微纳加工技术及其应用[J]. 科学通报, 2008, 53(1):2-13.  
DONG X Z, CHEN W Q, ZHAO ZH SH, *et al.*. Femtosecond laser two-photon micro-/nano-fabrication and its applications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1):2-13. (in Chinese)
- [2] 龚小竞,褚家如,杨建军,等. 改进的飞秒激光加工微光波导方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 27-32.  
GONG X J, CHU J R, YANG J J, *et al.*. An improved way for fabricating micro-waveguide by femtosecond laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):27-32. (in Chinese)
- [3] ZHANG Y L, CHENG Q D, XIA H, *et al.*. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing [J]. *Nanotoday*, 2010, 5(5): 435-448.
- [4] 蒋中伟,袁大军,祝安定,等. 双光子三维微细加工技术及实验系统的开发[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3):234-238.  
JIANG ZH W, YUAN D J, ZHU A D, *et al.*. 2-photon 3-D microfabrication technology and its experimental system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3):234-238. (in Chinese)
- [5] TORMEN M, BUSINARO L, ALTISSIMO M, *et al.*. 3D patterning by means of nanoimprinting, X-ray and two-photon lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73:535-541.
- [6] SHOJI S, KAWATA S. Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photopolymerizable resin [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(19): 2668-2670.
- [7] KATO J, TAKEYASU N, ADACHI Y, *et al.*. Multi-

- ple-spot parallel processing for laser micromanufacturing [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(4): 044102-044104.
- [8] DONG X Z, ZHAO ZH SH, DUAN X M. Micro-nanofabrication of assembled three-dimensional microstructures by designable multiple beams multiphoton processing [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(12):124103-124105.
- [9] HAYASAKI Y, SUGIMOTO T, TAKITA A, *et al.*. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(3): 031101-031103.
- [10] GITTARD S D, NGUYEN A, OBATA K, *et al.*. Fabrication of microscale medical devices by two-photon polymerization with multiple foci via a spatial light modulator [J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(11):3167-3178.
- [11] LIN H, JIA B H, GU M. Dynamic generation of debye diffraction-limited multifocal arrays for direct laser printing nanofabrication [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3):406-408.
- [12] KUANG Z, PERRIE W, LIU D, *et al.*. Ultra short pulse laser patterning of indium tin oxide thin films on glass by uniform diffractive beam patterns [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(19):7601-7606.
- [13] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35:237-246.

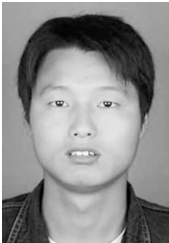
#### 作者简介:



苏亚辉(1968—),男,安徽凤台人,博士,副教授,2007年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事飞秒激光加工,光学全息等方面的研究。E-mail: ustcsyh@ahu.edu.cn



李家文(1971—),男,安徽六安人,博士,讲师,2011年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事微纳加工和测量技术、结构色机理与加工技术等方面的研究。E-mail: jwl@ustc.edu.cn



汪金礼(1987—),男,安徽六安人,硕士研究生,2010年于安徽大学获得学士学位,主要从事飞秒激光全息加工方面的研究。E-mail: jinli19880416@163.com



黄文浩(1944—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,1968年毕业于清华大学精密仪器系,1978年入中国科技大学精密仪器系工作至今,主要研究方向包括扫描探针显微术、微纳米加工技术及微纳米测量技术。E-mail: whuang@ustc.edu.cn



杨亮(1988—),男,湖北黄冈人,博士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事飞秒激光微纳加工的研究。E-mail: ygliang@mail.ustc.edu.cn