

# 基于多焦点阵列的动态激光并行加工

史志勇<sup>1</sup>, 周立强<sup>1</sup>, 张立春<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 史强<sup>1,2</sup>, 朱林伟<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>鲁东大学物理与光电工程学院, 山东 烟台 264025;

<sup>2</sup>北京魔技纳米科技有限公司, 北京 102208

**摘要** 为了提高激光并行加工中多焦点阵列的均匀度及可操控性, 基于物镜聚焦系统的矢量傅里叶变换特性, 设计了一种矢量迭代优化相位算法。基于此算法, 可以制备具有高均匀度的多焦点阵列, 且阵列中每个焦点的空间位置可精确调控。数值模拟与实验结果表明, 优化出的相位可以用来制备具有高均匀度的多焦点阵列。利用自主搭建的基于空间光调制器的飞秒激光加工系统, 以金膜为例, 验证了激光并行加工的可行性。实验结果表明, 利用所提算法, 可以实现具有任意排列结构的多焦点阵列的并行激光加工。利用动态加载相位图的方式, 可以实现动态扫描加工。

**关键词** 激光技术; 激光并行加工; 光束整形; 空间光调制器; 计算全息

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1014004

## Dynamic Laser Parallel Fabrication Based on Multifocal Array

Shi Zhiyong<sup>1</sup>, Zhou Liqiang<sup>1</sup>, Zhang Lichun<sup>1</sup>, Li Zhigang<sup>1</sup>, Shi Qiang<sup>1,2</sup>, Zhu Linwei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronics Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

<sup>2</sup>Beijing Magie Nano-Technology Co. Ltd., Beijing 102208, China

**Abstract** To improve the uniformity and controllability of the multifocal array in laser parallel fabrication, a vector iterative optimization phase algorithm is proposed based on the property of the vector Fourier transform in an objective focusing system. Based on this iterative algorithm, a multifocal array with high uniformity can be produced and the position of each focal spot can be precisely controlled. The numerical simulation and experimental results show that the optimized phase can be utilized to generate a multifocal array with high uniformity. Furthermore, applying the homemade femtosecond laser fabrication system based on a spatial light modulator and taking gold films as the sample, we confirm the validity of laser parallel fabrication. The experimental results demonstrate that using the proposed algorithm, one can achieve the laser parallel fabrication based on multifocal array with an arbitrary arrangement structure. In addition, the dynamic scanning laser fabrication can also be realized by dynamically loading phase patterns.

**Key words** laser technique; laser parallel fabrication; laser beam shaping; spatial light modulator; computer holography

**OCIS codes** 140.3300; 220.4610; 070.6120; 090.1760

## 1 引 言

近年来,随着飞秒激光技术的发展,飞秒激光在材料加工领域获得了越来越多的应用<sup>[1-6]</sup>。飞秒激光具有超短的激光脉冲和超高的激光能量密度,使得加工的精度可以达到纳米级,而且还可以用于实现三维的超精细结构加工。比如,利用单个紧聚焦的飞秒激光脉冲,加工制备具有不同三维形貌的纳米结构,以实现信息的加密读写技术<sup>[7]</sup>;利用飞秒激光,对超表面材料的形态进行精确改造,实现激光着

色<sup>[8]</sup>;利用飞秒激光加工二维材料,实现全彩色的三维全息成像<sup>[9]</sup>;利用飞秒激光的非线性效应,实现三维光学高密度光存储<sup>[10]</sup>;利用飞秒激光制备仿生结构<sup>[11]</sup>。因其空间分辨率高、热影响小等优势<sup>[12]</sup>,飞秒激光加工在微光学器件<sup>[13]</sup>、微机械<sup>[14-15]</sup>及生物学等诸多领域也有着非常重要的应用。

从实际应用考虑,制备大面积的结构均匀的功能表面是十分必要的。但是传统的飞秒激光微加工大多采用单点扫描<sup>[16]</sup>,这种方式的缺点是加工效率低下,能量利用率低,加工过程缓慢,耗时长。

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-01-18; 录用日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61675093)、山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2019JZZY020219)

\* E-mail: lwzhu@siom.ac.cn

在长时间的激光加工过程中,激光器功率的波动以及环境的变动,都会影响加工的精度,所以传统的单点扫描加工方式限制了微纳激光加工技术的发展。为了提高加工效率,通常使用透镜阵列、达曼光栅等衍射光学元件对激光进行分束,以实现多光束并行加工,但这类方法仅适用于具有固定周期的结构加工,不能对不同的加工结构进行灵活调控。因此,基于空间光调制器(SLM)对光场进行分束调控的方法得到广泛使用<sup>[17-18]</sup>。通过使用 SLM 加载不同的相位图案,可以将激光调制为具有期望形状的阵列结构并进行微纳激光加工。基于 SLM 的方法,不仅能够灵活地调控微纳加工的结构,而且还能够显著地提高加工的效率<sup>[19-22]</sup>。

通常情况下,使用 SLM 调制入射光场以产生多个聚焦焦点的方法,需要利用相应的优化算法计算出入射光场的相位分布<sup>[23]</sup>。常用的 Gerchberg-Saxton (G-S) 优化算法具有结构简洁易懂、计算方便快捷等优势,被广泛应用在光场设计中。然而,传统的 G-S 迭代优化相位算法大多采用标量场的聚焦光斑进行设计,没有考虑入射光的偏振状态以及高数值孔径物镜在聚焦条件下的光场分布特性。因此,在实际应用中尤其是在高数值孔径物镜聚焦下,利用设计出来的相位分布,无法实现对焦场的任意、

精确设计,聚焦后产生的多焦点阵列的聚焦均匀性不高,进而影响激光加工的效果。基于高数值孔径物镜聚焦系统的矢量傅里叶变换性质,本文提出了一种基于矢量聚焦场分布的 G-S 迭代优化相位算法。此算法充分考虑了入射光场的偏振特性对聚焦光场分布的影响,针对不同偏振入射光提取合适的相位,获得了高质量的多焦点阵列分布。其次,本算法还可以根据实际物镜的聚焦参数,迭代优化出与实际物镜聚焦场分布对应的目标场,并可以准确调节多焦点的空间位置分布。本文提出的矢量 G-S 迭代优化相位算法可用于制备具有任意排列结构的多焦点阵列。最后,针对此算法得出的多焦点阵列相位图,利用 SLM 实验验证了并行激光加工的可行性。实验结果与数值模拟结果吻合较好。

## 2 基本原理

### 2.1 聚焦场的矢量傅里叶变换

图 1 所示为紧聚焦光场示意图,其中 $(x_0, y_0)$ 为入射场直角坐标, $\mathbf{k}_i$ 为透射光传播方向的波矢, $\mathbf{k}_t$ 为入射光传播方向的波矢, $S$ 为透镜上一点。根据 Richards-Wolf 矢量衍射积分公式,在无像差高数值孔径物镜紧聚焦场中,任意位置处的电场分布<sup>[24-25]</sup>可表示为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = A \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} P(\theta) \mathbf{E}_i(\theta, \phi) \exp(ikz \cos \theta) \sin \theta \times \exp\{-ik \sqrt{x^2 + y^2} \sin \theta \cos \theta [\arctan(y/x) - \phi]\} d\phi d\theta, \quad (1)$$

式中: $A$ 是与焦距和波长有关的常数; $k$ 是波数, $k = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 是波长; $\alpha$ 是物镜的最大折射角; $\theta$ 为折射角,其由公式 $\sin \theta = rNA/(Rn_t)$ 得出, $R$ 为物镜在入射光瞳处的光阑半径, $NA$ 为物镜的数值孔径, $n_t$ 为场介质的折射率; $P(\theta)$ 为切趾函数; $r$ 和 $\phi$ 是入射孔径平面的极坐标; $x, y, z$ 分别为紧聚焦场区域的笛卡儿直角坐标; $\mathbf{E}_i$ 为入射光进入物镜后的透射场,计算公式<sup>[26]</sup>为

$$\mathbf{E}_i(\theta, \phi) = \sqrt{\cos \theta} [(\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{e}_p) \mathbf{e}_t + (\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{e}_s) \mathbf{e}_s + (\mathbf{E}_i \cdot \mathbf{e}_z) \mathbf{e}_k], \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}_i$ 为入射场; $\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_s, \mathbf{e}_z$ 分别为入射场中极坐标的径向、角向和轴向单位矢量; $\mathbf{e}_t$ 和 $\mathbf{e}_k$ 分别为经透镜偏折后透射场中的径向单位矢量和轴向单位矢量。 $\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_s$ 与直角坐标单位向量 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ 的关系为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_p = \cos \phi \mathbf{e}_x + \sin \phi \mathbf{e}_y \\ \mathbf{e}_s = -\sin \phi \mathbf{e}_x + \cos \phi \mathbf{e}_y \end{cases} \quad (3)$$

如图 1 所示,径向单位矢量和轴向单位矢量经过透镜偏折后变为 $\mathbf{e}_t$ 和 $\mathbf{e}_k$ ,其与直角单位矢量的关系可

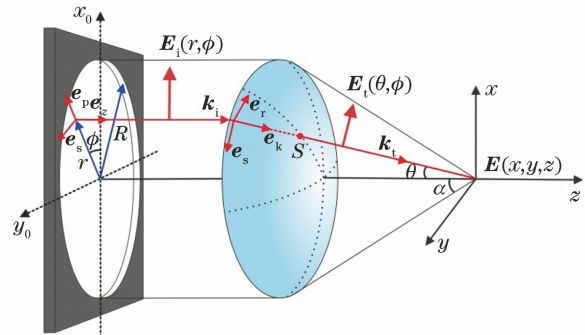


图 1 矢量光场聚焦示意图

Fig. 1 Diagram of vector light field focusing

以表述为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_r = \cos \phi \cos \theta \mathbf{e}_x + \sin \phi \cos \theta \mathbf{e}_y + \sin \theta \mathbf{e}_z \\ \mathbf{e}_k = -\sin \theta \cos \phi \mathbf{e}_x - \sin \theta \sin \phi \mathbf{e}_y + \cos \theta \mathbf{e}_z \end{cases} \quad (4)$$

因此,将(3)式和(4)式代入(2)式后,最终可求出透射场为

$$\begin{bmatrix} E_{tx} \\ E_{ty} \\ E_{tz} \end{bmatrix} = \sqrt{\cos \theta} \begin{bmatrix} 1 + (\cos \theta - 1) \cos^2 \phi & (\cos \theta - 1) \cos \phi \sin \phi & -\sin \theta \cos \phi \\ (\cos \theta - 1) \cos \phi \sin \phi & 1 + (\cos \theta - 1) \sin^2 \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \\ E_{iz} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $E_{tx}, E_{ty}, E_{tz}$ 分别为透射场 $\mathbf{E}_t$ 在 $x, y, z$ 轴的分量值,即 $\mathbf{E}_t = E_{tx}\mathbf{e}_x + E_{ty}\mathbf{e}_y + E_{tz}\mathbf{e}_z$ ;  $E_{ix}, E_{iy}, E_{iz}$ 分别为入射场 $\mathbf{E}_i$ 在 $x, y, z$ 轴的分量值,即 $\mathbf{E}_i = E_{ix}\mathbf{e}_x + E_{iy}\mathbf{e}_y + E_{iz}\mathbf{e}_z$ 。这里需要指出的是,(5)式为考虑全偏振矢量时得出的透射场分布,而在一般情

况下,轴向分量 $\mathbf{e}_z$ 可以忽略不计。

假设物镜聚焦系统满足阿贝正弦条件,则(1)式表示的紧聚焦光场的分布 $\mathbf{E}$ 可以表示为波矢量 $\mathbf{k}$ 空间的函数<sup>[27]</sup>,即

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} P(\theta) \mathbf{E}_t(\theta, \phi) \exp[i(k_z z - k_x x - k_y y)] \sin \theta d\phi d\theta, \quad (6)$$

式中:波矢量 $\mathbf{k} = k_x \mathbf{e}_x + k_y \mathbf{e}_y + k_z \mathbf{e}_z$ ,  $k_x = -k \cos \phi \sin \theta, k_y = -k \sin \phi \sin \theta, k_z = k \cos \theta$ 。为

了简洁起见,(6)式中省略了常数项。令 $\xi = -\cos \phi \sin \theta / \lambda, \eta = -\sin \phi \sin \theta / \lambda$ ,则(6)式可改写为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \iint P(\theta) \mathbf{E}_t(\theta, \phi) / \cos \theta \times \exp(ik_z z) \exp[-i2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta. \quad (7)$$

因此,通过(7)式可以看出, $\xi$ 和 $\eta$ 分别表示 $x, y$ 方向的空间频率。也就是说,物镜聚焦系统的光场分布可以表示为加权场 $\mathbf{E}_t$ 的傅里叶变换(FT),其光场分布可以进一步写为

$$\mathbf{E}(x, y, z) = F[P(\theta) \mathbf{E}_t(\theta, \phi) \times \exp(ik_z z) / \cos \theta], \quad (8)$$

式中: $F[\cdot]$ 为傅里叶变换。由(8)式可以看出,此时物镜聚焦系统的光场分布为一个加权矢量透射场的傅里叶变换,聚焦场的分布与入射场的偏振分布有关,即由(5)式确定。因此,根据(5)式和(8)式,建立了入射场和聚焦场的傅里叶变换关系,并设计出与偏振矢量相关的G-S迭代优化相位算法,从而优化出与聚焦场分布相关的准确的相位图。

## 2.2 矢量G-S迭代优化相位算法

根据(5)式和(8)式,设计了一种矢量G-S迭代优化相位算法,并进行聚焦场的设计,其算法流程图如图2所示,其中 $P$ 为偏折运算, $M$ 为矩阵零值填充扩展处理,FFT为快速傅里叶变换,iFFT为傅里叶逆变换, $P^{-1}$ 为逆偏折运算, $\varphi_{1x}, \varphi_{1y}, \varphi_{1z}$ 为聚焦场

在直角坐标系中各分量的相位分布。基于此迭代优化算法,设计焦场的流程如下。

1) 流程图开始于一个具有随机相位的纯相位分布光场。以X线偏振光为例,即入射光 $\mathbf{E}_i = E_0 \exp(i\varphi_0) \mathbf{e}_x$ ,其中,入射光初始相位 $\varphi_0$ 为 $0 \sim 2\pi$ 的随机值,入射光振幅 $E_0$ 为一个圆域函数 $\text{circ}(r/R)$ ,当 $0 \leq r \leq R$ 时其值为1,其余为0。

2) 确定入射光场 $\mathbf{E}_i$ 之后,根据(5)式求出经物镜偏折后的透射场分布 $\mathbf{E}_t(\theta, \phi)$ ,然后乘以加权因子 $\exp(ik_z z) / \cos \theta$ ,得到傅里叶变换项 $\mathbf{E}'_t(\theta, \phi)$ 。

3) 在进行傅里叶变换之前,还需要进行矩阵零值填充扩展处理,这一步是设计焦场坐标与实际焦场坐标精确对应的关键步骤。

4) 通过(8)式进行零值填充扩展后,经过快速傅里叶变换,得到聚焦矢量光场的三个正交分量矩阵为

$$\begin{cases} E_{1x}(x_1, y_1, z_1) = F[E'_{tx}(\xi, \eta)] \\ E_{1y}(x_1, y_1, z_1) = F[E'_{ty}(\xi, \eta)] \\ E_{1z}(x_1, y_1, z_1) = F[E'_{tz}(\xi, \eta)] \end{cases}, \quad (9)$$

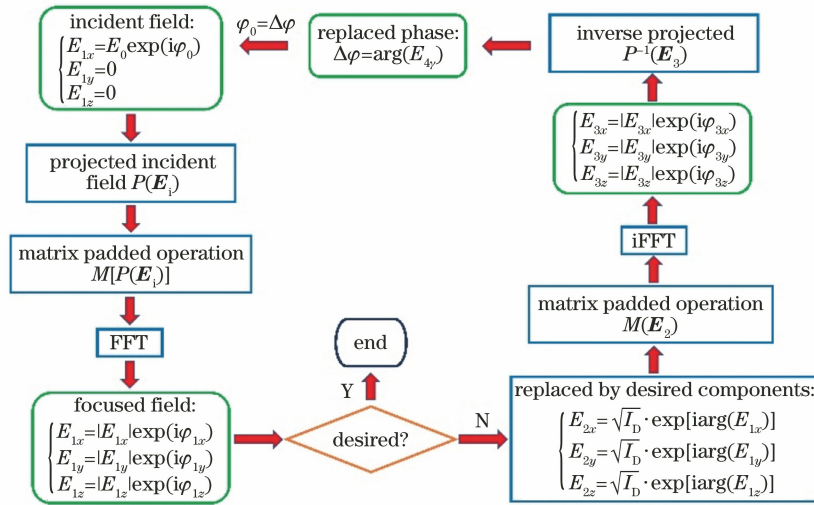


图 2 矢量 G-S 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of vector G-S algorithm

式中:  $(x_1, y_1, z_1)$  为聚焦场中的直角坐标系坐标;  $E_{1x}, E_{1y}, E_{1z}$  为聚焦场在直角坐标系中相互正交的分量;  $E'_{1x}, E'_{1y}, E'_{1z}$  为透射场在直角坐标系中相互正交的分量。聚焦场  $\mathbf{E}_1 = E_{1x}\mathbf{e}_x + E_{1y}\mathbf{e}_y + E_{1z}\mathbf{e}_z$ , 则定义多焦点阵列所在位置处的光强分布为  $I_1 = |E_{1x}|^2 + |E_{1y}|^2 + |E_{1z}|^2$ 。为了简洁起见, (8) 式同样省略了常数项。

5) 假如不满足判据条件, 则将三个分量振幅更新为设计聚焦场的分布形式:  $E_{2x} = \sqrt{I_D} \exp[i\arg(E_{1x})]$ ,  $E_{2y} = \sqrt{I_D} \exp[i\arg(E_{1y})]$ ,  $E_{2z} = \sqrt{I_D} \exp[i\arg(E_{1z})]$ , 并且保持相位不变, 其中  $I_D$  为设计聚焦场的归一化强度数据。

6) 对更新后的焦场数据再次进行补零扩展, 然后经过傅里叶逆变换, 得到光场分布  $\mathbf{E}_3 = E_{3x}\mathbf{e}_x + E_{3y}\mathbf{e}_y + E_{3z}\mathbf{e}_z$ , 其中  $E_{3x}, E_{3y}, E_{3z}$  为傅里叶逆变换后得到的直角坐标系中的各个分量, 其可以表示为各自分量对应的振幅  $|E_{3x}|, |E_{3y}|, |E_{3z}|$  和相位  $\varphi_{3x}, \varphi_{3y}, \varphi_{3z}$  的复振幅形式。

7) 将傅里叶逆变换得出的场分布除以加权因子  $\exp(ik_z z) / \cos \theta$ , 再根据 (5) 式, 通过逆偏折变换得到初始入射场  $\mathbf{E}_4 = E_{4x}\mathbf{e}_x + E_{4y}\mathbf{e}_y + E_{4z}\mathbf{e}_z$ 。

8) 提取相位分布。将得到的入射场  $\mathbf{E}_4$  分解为  $\mathbf{E}_4 = E_p\mathbf{e}_p + E_s\mathbf{e}_s + E_z\mathbf{e}_z$ , 其中,  $E_p, E_s, E_z$  分别为相互正交的径向分量、角向分量及纵向分量,  $\mathbf{e}_p(x_0, y_0)$  表示入射光的不同偏振态<sup>[28]</sup>。对于 X 线偏振, 相位提取为  $\Delta\varphi = \arg(E_{4x})$ 。将返回的入射场的相位更新为新的相位值  $\varphi_0 = \Delta\varphi$ , 再进行下一次的循环, 直到算法的判据函数达到预设值, 流程结束。最终输出的相位  $\Delta\varphi$  即可用来获得所设计的聚焦场。

其判据函数可以由均匀度函数  $\mu$  来定义, 即

$$\mu = 1 - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (10)$$

式中:  $I_{\max}, I_{\min}$  分别为多焦点阵列中各焦点中心位置处的最大光强和最小光强。

图 3 所示为基于矢量 G-S 算法和传统标量 G-S 算法优化设计的一个  $3 \times 3$  正方多焦点阵列的相位及聚焦场光强分布。图 3(a) 所示为基于矢量 G-S 算法, 优化迭代 10 次后得出的相位图, 其中模拟设计参数为: 入射波长  $\lambda = 400 \text{ nm}$ , 物镜数值孔径  $NA = 0.25$ , 相邻聚焦光斑之间的距离为  $40\lambda$ 。图 3(b) 为数值模拟的物镜焦平面上的光强分布, 其中  $I$  为光强。图 3(c) 为实验中电荷耦合成像器件 (CCD) 记录的物镜焦平面上的光强分布。可以看出, 在物镜的焦平面上产生了  $3 \times 3$  正方多焦点阵列, 且阵列光斑是均匀分布的, 如图 3(d) 所示, 其点阵的均匀度达到  $\mu = 92\%$ 。图 3(e) 所示为基于标量 G-S 算法, 优化迭代 10 次后得出的  $3 \times 3$  正方多焦点阵列相位图。图 3(f)、(g) 分别为数值模拟和实验中 CCD 记录的物镜焦平面上的光强分布, 其点阵均匀度可以达到  $\mu = 46\%$  (如图 3(h) 所示)。图 3(i)~(l) 为基于标量 G-S 算法, 优化迭代 100 次后得出的结果, 其点阵均匀度可以达到  $\mu = 89\%$ 。图 4 给出了由矢量 G-S 算法与标量 G-S 算法得出的多焦点阵列的均匀度随迭代次数的变化曲线。从图 4 可以看出, 由标量 G-S 算法得出的点阵均匀度随着迭代次数的增加而增加, 要得到较高的均匀度, 至少需要迭代 100 次以上; 而本文提出的矢量 G-S 算法, 因充分考虑了入射光的矢量特性对聚焦场的影



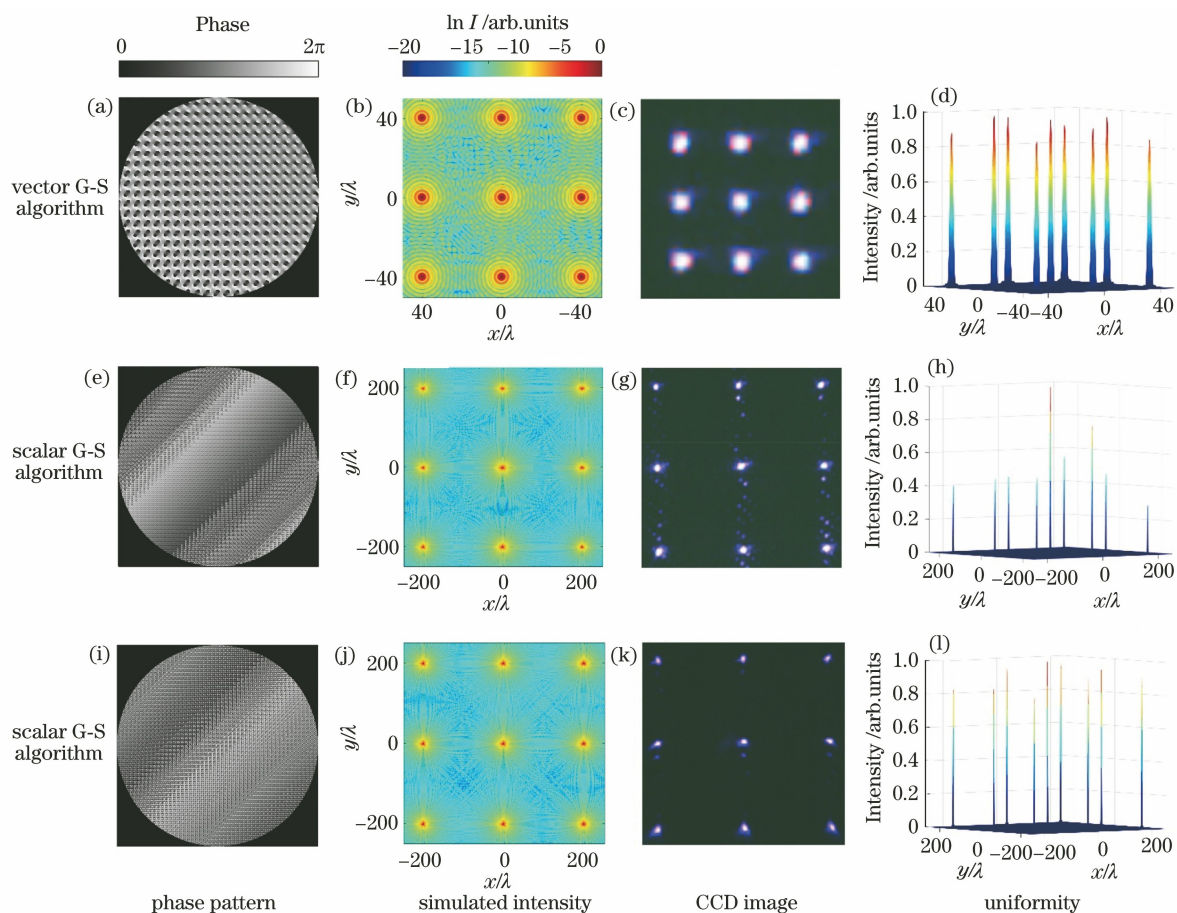


图 3 矢量 G-S 算法与标量 G-S 算法所得结果之间的对比。(a)~(h)迭代 10 次后;(i)~(l)迭代 100 次后  
Fig. 3 Comparison of results obtained by vector G-S algorithm and scalar G-S algorithm.

(a)~(h) After 10 iterations; (i)~(l) after 100 iterations

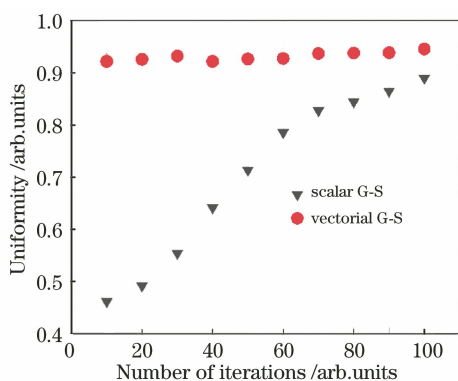


图 4 多焦点阵列的均匀度随着迭代次数的变化曲线  
Fig. 4 Uniformity of multifocal array as a function of number of iterations

响,可以在迭代次数少的情况下,获得较高均匀度的点阵聚焦光斑。传统的标量 G-S 算法无法精确控制设计焦场范围的大小,且不能对焦场实现精确设计,焦场范围及目标图案大小完全取决于设计焦场矩阵的大小。而本文提出的矢量 G-S 迭代优化相位算法,因为利用了矩阵零值填充变换,可以通过更

改相应的参数,精确控制焦场范围、点阵间距及各焦点的空间位置,进而实现对焦场的灵活、精确设计。为了进一步验证该算法的有效性及其在微纳激光加工中的可行性,设计了相关实验。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 基于 SLM 的飞秒激光加工系统

图 5 所示为自主搭建的基于空间光调制器的飞秒激光加工系统示意图。首先,飞秒激光器(EverBright-800,大恒新纪元科技股份有限公司,北京)发出的波长为 800 nm、光谱半峰全宽为 35 nm、脉宽为 50 fs、重复频率为 1 kHz 的激光经扩束镜扩束后,再经过由半波片和格兰棱镜组成的衰减器激光功率调节,之后经过偏硼酸钡晶体(BBO),产生 400 nm 波长的倍频光。倍频光经过偏振片和反射镜(mirror 1)后,入射到空间光调制器(PLUTO-2-UV-099,Holoeye,德国)上,然后经过 4f 滤波系统(lens 1 焦距为 400 mm,lens 2 焦距为 300 mm),零级被滤除,只有所需的阵列光斑透过。

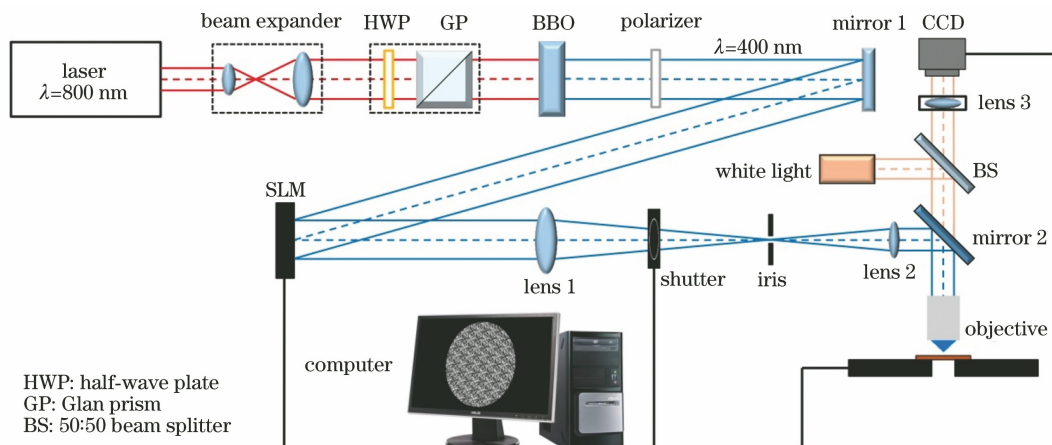


图 5 基于空间光调制器的飞秒激光加工系统示意图

Fig. 5 Schematic of femtosecond laser fabrication system based on spatial light modulator

最后,激光经反射镜(mirror 2,分束比为 9:1)反射后进入物镜,经物镜聚焦于材料表面。机械快门(GCI-73,大恒新纪元科技股份有限公司,北京)用于控制曝光时间,加工样品为镀在二氧化硅衬底上的厚度为 50 nm 的金膜。激光经金膜表面反射后,一小部分会反射到 CCD 相机(DH-GV400UC,大恒新纪元科技股份有限公司,北京)上,因此,可以得到聚焦平面上的光强分布。白光光源(GCI-060411 大恒新纪元科技股份有限公司,北京)发出的光经过半透半反镜被反射到物镜上,然后再经材料表面反射,一部分光经过物镜后再透过半透半反镜到达 CCD 相机。通过调节成像透镜(lens 3,焦距为 100 mm)与 CCD 相机之间的距离,可以同时观察到清晰的材料表面及激光焦斑的像,以实时监测加工过程。利用电脑将相位图加载到空间光调制器上,并控制快门时间以及三维位移台(MT3-Z8,Thorlabs,美国)的移动。激光经空间光调制器后,能量大约损失 10%,经 4f 滤波系统滤除零级之后能量大约损失 20%。

### 3.2 结果分析与讨论

基于以上飞秒激光加工系统,利用矢量 G-S 迭代优化相位算法设计了几种多焦点阵列光斑。图 6 所示为优化设计出的  $1 \times 3$  多焦点阵列在不同激光功率和扫描速度时的加工结果。扫描速度一定,不同激光功率时加工结果的显微放大图如图 6(a)所示,其显示的加工线宽由显微镜(DMI6000B,Leica,德国)测得。可以看出,将通过矢量 G-S 迭代优化相位算法得到的  $1 \times 3$  多焦点阵列的相位图加载到空间光调制器后,在金膜上可以加工出三条直线,且直线的线宽较为均匀。同时,当扫描速度不变时,激

光功率越高,加工的线宽就越大,随着激光功率的不断增大,线宽不会一直增加,而是增加到与焦点大小相似的尺寸后停止增加,如图 6(c)所示。激光功率一定,不同扫描速度时加工结果的显微放大图如图 6(b)所示。激光功率一定时,扫描速度随加工线宽的变化曲线如图 6(d)所示。可以看出,当激光功率不变时,扫描速度越快,加工的线宽越小。因此,对于脉冲频率不可调节的飞秒激光加工系统,可以通过激光功率与扫描速度相互配合的方式加工出具有亚微米级线宽的直线。

为了进一步验证利用该矢量 G-S 迭代优化相位算法产生的多焦点阵列进行并行激光加工的可行性,设计了两组实验,分别使用矢量 G-S 迭代优化相位算法产生的  $10 \times 10$  多焦点阵列和  $20 \times 20$  多焦点阵列进行实验。图 7(a)、(e)分别为基于矢量 G-S 迭代优化相位算法迭代出的  $10 \times 10$  多焦点阵列及  $20 \times 20$  多焦点阵列的相位图,其中模拟设计参数为:入射波长  $\lambda = 400$  nm,物镜数值孔径  $NA = 0.25$ ,  $10 \times 10$  多焦点阵列相邻聚焦光斑之间的距离为  $20\lambda$ ,  $20 \times 20$  多焦点阵列相邻聚焦光斑之间的距离为  $25\lambda$ 。图 7(b)、(f)分别为  $10 \times 10$  多焦点阵列及  $20 \times 20$  多焦点阵列的模拟焦场图像,可以看出,多焦点阵列之间的距离及焦点数量符合设计参数,并且每个焦点清晰可见。图 7(c)、(g)分别为实验中 CCD 记录的物镜焦平面上的光强分布。图 7(d)、(h)分别为采集的  $10 \times 10$  多焦点阵列及  $20 \times 20$  多焦点阵列在金膜上的脉冲钻孔实验的光学显微镜图像。实验中,快门曝光时间为 0.1 s,其中  $10 \times 10$  多焦点阵列使用的激光功率(进入空间光调制器前测得的激光功率)为 10 mW,  $20 \times 20$  多焦点阵列使用



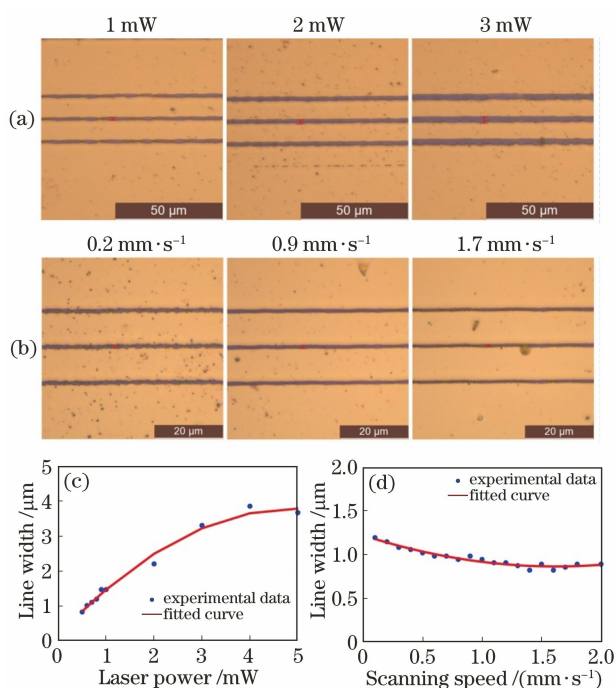


图 6 加工线宽与激光功率、扫描速度的关系。(a)当扫描速度为  $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,不同激光功率下的加工线宽;(b)当激光功率为  $0.5 \text{ mW}$  时,不同扫描速度下的加工线宽;加工线宽与(c)激光功率和(d)扫描速度的关系

Fig. 6 Relationship of line width with laser power and scanning speed. (a) Line widths under different laser powers when scanning speed is  $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b) line widths under different scanning speeds when laser power is  $0.5 \text{ mW}$ ; line width as functions of (c) laser power or (d) scanning speed

的激光功率为  $30 \text{ mW}$ 。可以看出,利用  $10 \times 10$  多焦点阵列及  $20 \times 20$  多焦点阵列,均可以在金膜上实现对应数量的烧蚀孔。但所用飞秒脉冲激光具有  $35 \text{ nm}$  的光谱宽度,经空间光调制器调制后会产生色散效应,导致聚焦光斑阵列的光斑形状和聚焦能量发生变化,使得离中心零级越远的聚焦光斑,其色散越严重,降低了聚焦光斑的峰值功率密度并增加了脉冲宽度,严重影响加工的效果。而在实验中,为了消除零级光斑的影响,在迭代优化相位的基础上又加载了一个偏置相位,使得聚焦光斑阵列沿某一方向偏离零级,这样可以轻易地在  $4f$  滤波系统中滤出需要的光斑阵列,但偏离中心零级带来的光场畸变,使得  $20 \times 20$  多焦点阵列的加工结果并不是十分理想,加工的孔大小沿一固定倾斜方向变化。实验结果显示,该矢量 G-S 迭代优化相位算法可用于多焦点阵列的并行激光加工,相比于单光束激光加工,该方法可极大地提高加工效率,如  $20 \times 20$  多焦点阵列的加工效率可提高 400 倍。

利用本文提出的优化算法,还可以设计具有任意排列结构的多焦点阵列,并用于特殊排列结构的并行加工。为了验证有效性,设计了由大量焦点组成的“鲁”、“东”、“大”、“学”四个字,并进行飞秒激光加工实验。图 8(a)为优化设计出的“鲁”、“东”、“大”、“学”四个字对应的相位图像,其中模拟设计参数为:入射波长  $\lambda = 400 \text{ nm}$ ,物镜数值孔径  $NA = 0.25$ ,实际焦场中字体大小约为  $400\lambda$ 。图 8(b)为实

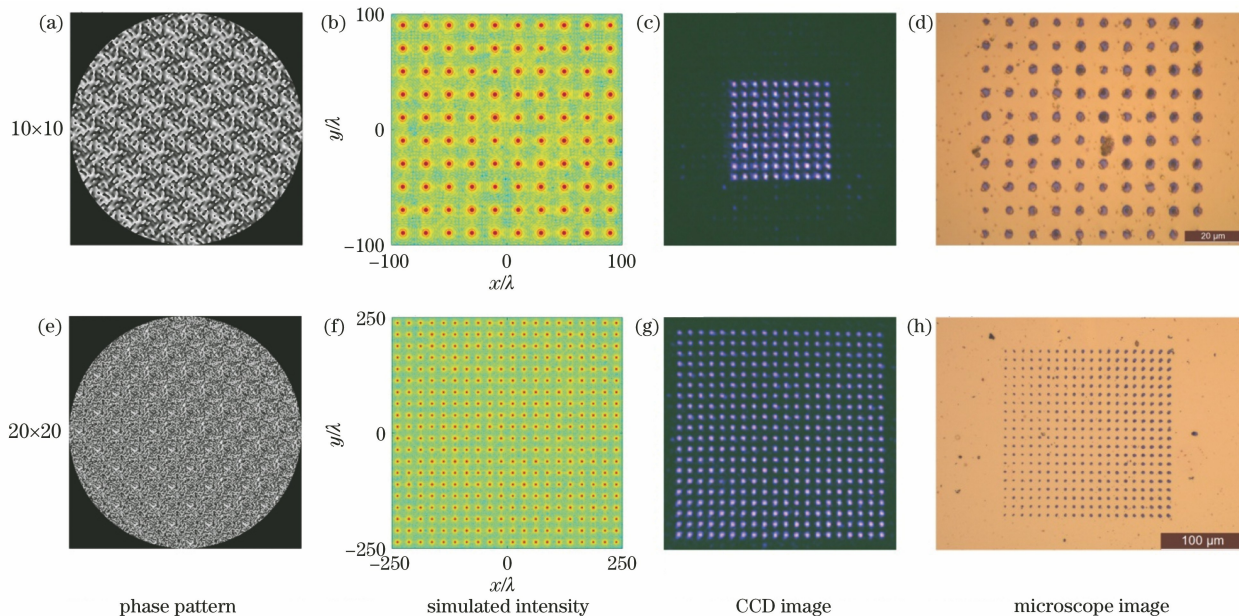


图 7 不同多焦点阵列的并行激光加工实验

Fig. 7 Experiment of parallel laser fabrication under different multifocal arrays

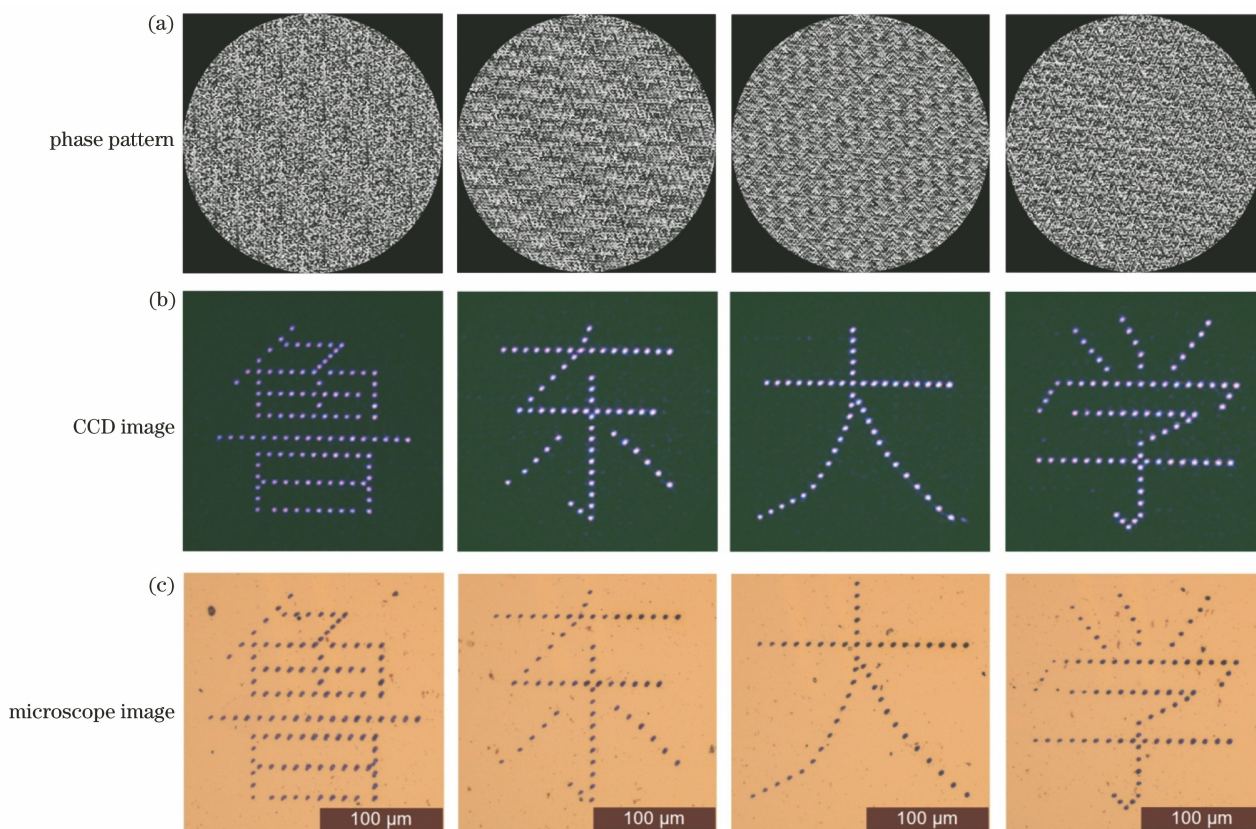


图 8 具有任意形状结构的多焦点阵列的并行激光加工实验

Fig. 8 Parallel laser fabrication experiment under multifocal array with arbitrary arrangement structure

验中 CCD 记录的“鲁”、“东”、“大”、“学”四个字对应的物镜焦平面上的光强分布。可以看出,产生了光斑呈均匀分布的非正交排列的多焦点阵列。利用此光斑阵列加工金膜,加工结果如图 8(c)所示。由加工结果可以看出,每个加工结果均可以很好地与设计结果相匹配,该矢量 G-S 迭代优化相位算法能够实现具有任意排列结构的多焦点阵列的并行激光加工。

通过在空间光调制器上动态加载相位图,还可以实现一种替代三维位移台的激光动态扫描加工。为验证该矢量 G-S 迭代优化相位算法用于动态并行激光加工的可行性,设计了一个 T 型多焦点阵列,该阵列由不同位置的 21 个焦点组成,每个位置的焦点对应一副相位图,所有相位图以 20 Hz 频率被加载到空间光调制器上,利用空间光调制器的动态可编程性实现动态扫描加工,加工结果如图 9 所示。图 9(a)、(b)分别为 T 型焦点阵列起点和终点的相位图像。图 9(c)为所有焦点阵列叠加后的模拟光场分布,可以看出,焦点组成了字母“T”,其中带有数字 1 的虚线圆圈所标注的焦点为动态加工的起点,带有数字 2 的虚线圆圈所标注的焦点为动态加工的终点,图中黑色箭头表示焦点动态行进的方向。

图 9(d)为光学显微镜下采集的实验结果图像。由实验结果可以看出,加工结果可以很好地与模拟设计结果相匹配,每个焦点对应的灼蚀孔清晰可见且大小均匀。实验结果显示,该矢量 G-S 迭代优化相位算法可用于脱离三维位移台的激光动态扫描加工。

## 4 结 论

根据物镜聚焦的矢量衍射理论,推导出了物镜聚焦系统的矢量傅里叶变换关系。基于这种矢量的傅里叶变换,提出了一种针对矢量场物镜聚焦的 G-S 迭代优化相位算法。由于此矢量迭代算法充分考虑了聚焦系统的矢量特性,且在迭代优化中引入了与聚焦场分布相关的运算,因此可以设计出具有高均匀度,且光斑阵列的形状、尺寸都精确可调的多焦点阵列。基于此光斑阵列,自主搭建了一套基于空间光调制器的飞秒激光加工系统。以金膜为例,研究了在并行加工中,多焦点阵列加工线宽与激光功率及扫描速度的关系。利用该多焦点阵列实现了激光并行加工,验证了所提算法在并行激光加工领域中的可行性,此多焦点阵列可提高激光加工的效率。同时,也实验验证了具有任意形状结构的多焦点阵



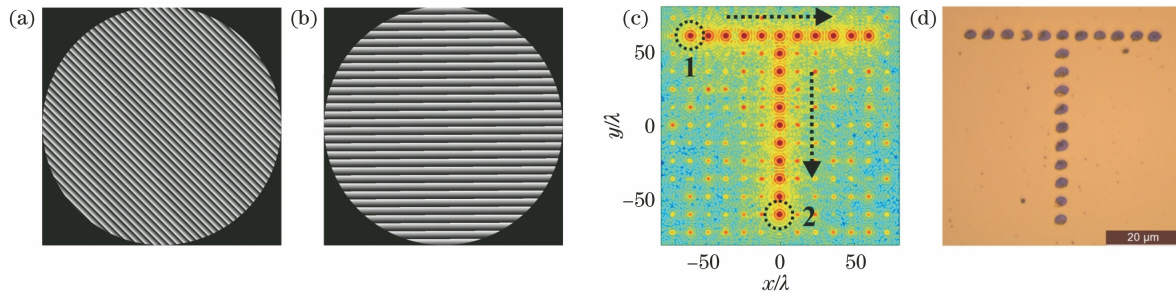


图9 “T”型图案的动态并行激光加工实验。(a)1位置处和(b)2位置处的焦点所对应的相位图；  
(c)所有焦点叠加后的模拟图像；(d)显微镜照片

Fig. 9 Experiment of “T”-pattern dynamic parallel laser fabrication. Phase pattern at (a) position 1 and (b) position 2;  
(c) simulated plot after all focal spots superimposed; (d) micrograph

列在激光并行加工中的可行性。通过在空间光调制器上动态加载相位图,还可以实现一种替代三维位移台的激光动态扫描加工。所提技术有望应用于激光材料处理、光学显微成像及光学微操纵等领域。

### 参 考 文 献

- [1] Zhu S J, Zhang C Y, Chu S L, et al. Research and application of massive microporous water assisted picosecond laser processing technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302002.  
朱帅杰, 张朝阳, 储松林, 等. 海量微孔水辅助法皮秒激光加工技术研究及应用 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302002.
- [2] Cheng J, Cao J L, Zhang H C, et al. Preparation of pump-free transport trajectory on infiltration controllable surface using ultrafast laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1102012.  
成健, 曹佳丽, 张恒超, 等. 基于超快激光的浸润性可控表面无泵运输轨迹制备 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1102012.
- [3] Liao J N, Wang X D, Zhou X W, et al. Femtosecond laser direct writing of copper microelectrodes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002013.  
廖嘉宁, 王欣达, 周兴汶, 等. 飞秒激光直写铜微电极研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002013.
- [4] Dong H Y, Liu C N, Sun S M, et al. Optical fiber high-temperature and refractive index sensor fabricated by femtosecond laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170633.  
董航宇, 刘昌宁, 孙四梅, 等. 飞秒激光制作的光纤高温和折射率传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170633.
- [5] Qin X Y, Huang T, Xiao R S. Periodic microstructure on Ti surface induced by high-power green femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002006.  
秦晓阳, 黄婷, 肖荣诗. 高功率绿光飞秒激光诱导产
- 生钛表面周期性微结构 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002006.
- [6] Chen P, Wang Y F, Dai Z J, et al. Large-area laser marking methods based on femtosecond laser filamentation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508019.  
陈平, 王云飞, 戴子杰, 等. 基于飞秒激光成丝的大幅面激光打标方法 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508019.
- [7] Hu D J, Lu Y D, Cao Y Y, et al. Laser-splashed three-dimensional plasmonic nanovolcanoes for steganography in angular anisotropy [J]. ACS Nano, 2018, 12(9): 9233-9239.
- [8] Zhang Y N, Shi L, Hu D J, et al. Full-visible multifunctional aluminium metasurfaces by *in situ* anisotropic thermoplasmonic laser printing [J]. Nanoscale Horizons, 2019, 4(3): 601-609.
- [9] Li X P, Ren H R, Chen X, et al. Athermally photoreduced graphene oxides for three-dimensional holographic images [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6984.
- [10] Li X P, Cao Y Y, Tian N, et al. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate [J]. Optica, 2015, 2(6): 567-570.
- [11] Florian C, Puerto D, Fuentes-Edfuf Y, et al. Fabrication of novel biomimetic structures on steel via femtosecond laser over-scans [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California, USA. Washington: OSA, 2017: STTh4J.3.
- [12] Fang Z W, Su Y H, Wang C W, et al. Analysis and set up of optical system for holographic femtosecond laser processing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0222002.  
方致伟, 苏亚辉, 汪超炜, 等. 飞秒激光全息加工光学系统搭建与分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0222002.

- [13] Chen Q D, Wu D, Niu L G, et al. Phase lenses and mirrors created by laser micromanufacturing via two-photon photopolymerization [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(17): 171105.
- [14] Xia H, Wang J, Tian Y, et al. Ferrofluids for fabrication of remotely controllable micromachines by two-photon polymerization [J]. Advanced Materials, 2010, 22(29): 3204-3207.
- [15] Zhu W, Li J X, Leong Y J, et al. 3D-printed artificial microfish[J]. Advanced Materials, 2015, 27(30): 4411-4417.
- [16] Rao S L, Wu P C, Zhang C C, et al. Energy-controllable femtosecond laser fabrication based on spatial light modulator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102008.  
饶生龙, 吴培超, 张晨初, 等. 基于空间光调制器的能量可控飞秒激光加工[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102008.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Kim D, Keesling A, Omran A, et al. Large-scale uniform optical focus array generation with a phase spatial light modulator[J]. Optics Letters, 2019, 44(12): 3178-3181.
- [22] Zhang G L, Gao X Z, Pan Y, et al. Inverse method to engineer uniform-intensity focal fields with arbitrary shape[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16782-16796.
- [23] Leonardo R D, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays [J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [24] Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems—I. An integral representation of the image field[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1959, 253(1274): 349-357.
- [25] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems—II. Structure of the image field in an aplanatic system [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1959, 253(1274): 358-379.
- [26] Leutenegger M, Rao R, Leitgeb R A, et al. Fast focus field calculations[J]. Optics Express, 2006, 14(23): 11277-11291.
- [27] Zhu L W, Sun M Y, Zhang D W, et al. Multifocal array with controllable polarization in each focal spot [J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24688-24698.
- [28] You S T, Kuang C F, Toussaint K C, et al. Iterative phase-retrieval method for generating stereo array of polarization-controlled focal spots [J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3532-3535.