

# 基于混合算法的高均匀度超快激光分束及精密加工研究

杨磊<sup>1</sup>, 徐新宇<sup>1</sup>, 王建磊<sup>3</sup>, 叶云霞<sup>1,2\*</sup>, 任旭东<sup>1</sup>, 陈卫标<sup>3</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

<sup>2</sup>江苏大学微纳光电子与太赫兹技术研究院, 江苏 镇江 212013;

<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 基于空间光调制器外光路分束进行并行加工是提高超快激光加工效率的有效方法。高均匀度分束算法是实现外光路分束的关键。在实际光路中,由于光路不完全满足理论条件,经典的GS算法生成的多光束均匀度远低于理论值,不满足阵列化激光加工的要求。基于GS-GA算法的思想与图像处理技术,在程序设计中引入了实时反馈的功能,以达到提高分束均匀度的目的。并采用加载菲涅耳透镜相位的方式分离零级光,避免重建光场离轴带来的畸变。最终实现了均匀度接近94%的分束,并通过加工实验验证了高均匀度分束算法在精密加工中的应用效果。

**关键词** 激光技术; 空间光调制; 分束整形; 超快激光精密加工; 遗传算法; GS算法

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221543

## 1 引言

超快激光具有脉冲宽度短、峰值密度高的特点,在精密加工领域中具有独特的优势。但是,高精度、高质量加工一般要求单脉冲能量和总平均功率不能过大,否则影响其加工效率的提升。尤其是在大面积加工或者大体积去除时,效率问题成为限制其推广应用的瓶颈之一。通过外光路分束实现阵列式并行加工是提高超快激光精密加工效率的方案之一,目前实现超快激光光束分束主要有以下几种方案:微透镜阵列法<sup>[1-4]</sup>、多光束干涉法<sup>[5-6]</sup>和空间光调制器(SLM)整形法<sup>[7-10]</sup>。在上述方法中,微透镜阵列法存在制造繁琐且分束结构单一的问题,多光束干涉法光路的复杂度较高且只适用于周期性结构加工,然而基于液晶空间光调制器实现分束整形具有更加灵活且光路复杂度相对较低的优势<sup>[11]</sup>。

液晶空间光调制器主要通过加载计算全息图(CGH)来实现对激光光束的相位调制<sup>[12]</sup>,进而实现分束。目前针对分束整形的全息图生成算法有迭代傅里叶算法、全局搜索算法和混合算法等。迭代傅里叶算法通过分析光束在衍射平面与成像平面的传播关系来进行迭代计算,计算量少,但是容易陷入局部不收敛的困境,其中最为经典的是GS算法<sup>[13]</sup>。为了提高计算

精度,在GS算法基础上又衍生出了权值GS(GSW)算法<sup>[14]</sup>、自适应权值GS(AWGS)算法<sup>[15]</sup>等。常见的全局搜索算法有模拟退火算法<sup>[16]</sup>、遗传算法<sup>[17]</sup>等。全局搜索算法避免了程序易陷入局部最优的问题,计算精度很高,但是计算量非常大。混合算法尝试采用恰当的方法在最优解的邻近区域使用GS算法获取全局最优解,如GS-GA混合算法<sup>[18]</sup>、平滑修正法<sup>[19]</sup>。尽管这些算法在一定程度上解决了计算精度与时间成本相矛盾的问题,但是在实际的光路系统中,整形出的多光束均匀度会受到光学系统的限制,远低于理论值。针对这个问题,苏亚辉等<sup>[20]</sup>通过改变光束的排列方式,得到了均匀度几乎接近100%的三焦点阵列,但该方法不适用于任意排列方式的多焦点阵列。翟中生等<sup>[21]</sup>提出了基于相机实时检测的反馈GS算法,按一定权值对能量低于平均值的光束进行增强,对能量高于平均值的光束进行削弱,得到了均匀度不低于92%的多光束阵列。由于在GS算法的计算过程中目标多光束与重建光场并不是完全满足一一对应的关系,该算法仍有优化空间。史志勇等<sup>[22]</sup>充分研究了入射光场的偏振特性以及物镜的聚焦参数,提出了一种矢量GS迭代优化相位算法,实现了任意排列的多光束生成,但使用闪耀光栅消除零级光会导致光场偏离光轴,引起光场畸变,影响了激光精密加工效果。

收稿日期: 2022-12-19; 修回日期: 2023-02-02; 录用日期: 2023-03-07; 网络首发日期: 2023-03-13

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20170559)、江苏省博士后科学基金(2020Z016)、镇江市重点研发计划(GY2019005)、江苏省重点研发产业前瞻项目(BE2020037)

通信作者: \*yeyunxia@ujs.edu.cn

本文在改进 GS-GA 混合算法与 GS 算法的基础上,提出了一种基于实时反馈的 GS-GA 算法,该算法考虑到 GS 算法对初始值敏感的问题,利用遗传算法 (GA) 并结合反馈相机的实时捕获方式寻找到适合 GS 算法的初始值,提高了重建光场的均匀性。另外,本文采用叠加菲涅耳透镜相位的方式分离零级光,避免了重建光场离轴带来的畸变,同时实现了整形光束焦平面位置的动态调控,最后实验验证了新算法在精密加工中的应用效果。

## 2 研究方法

### 2.1 实验设备与加工方法

本文所采用的皮秒激光加工系统光路如图 1 所示,其中,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  皮秒激光器(具体参数如表 1 所示)输出线偏振光束,经过  $1/2$  波片被调制为偏振方向平行于空间光调制器的线偏振光束,经扩束镜扩束,然后反射到空间光调制器上(具体参数如表 2 所示)。经

SLM 调制的光束通过由两片焦距相同的平凸透镜 (lens 1, lens 2, 焦距  $f=500\text{ mm}$ ) 组成的  $4F$  系统后,经过非偏振分束镜(透反比为  $1:9$ , 入射角度为  $45^\circ$ ) 被分为两束。一束透过非偏振分束镜,再经平凸透镜 (lens 3, 焦距  $f_2=160\text{ mm}$ ) 会聚到面阵相机上,用于检测重建光场均匀性和实时反馈;另一束激光反射到聚焦透镜 (lens 4, 焦距  $f_2=160\text{ mm}$ ) 上,进而聚焦到样品上表面,用于样品加工。本实验样品放置在机械平台上,平台在  $X$ - $Y$  平面的定位精度为  $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ , 在  $Z$  轴方向的定位精度为  $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ , 有效行程为  $400\text{ mm}$ , 最大速度为  $1000\text{ mm/s}$ 。实验中我们通过在加工系统的焦平面附近刻蚀多条直线确定焦平面的位置。激光的光束质量与光斑大小对光束整形有影响,在实验中我们对激光进行 4 倍扩束,扩束后的光斑直径可达  $12\text{ mm}$ , 入射到 SLM 上的光斑可覆盖更多的像素单元,进而提高了光束质量。此外,SLM 加装了水冷装置,以减小激光功率变化对分束均匀性的影响。

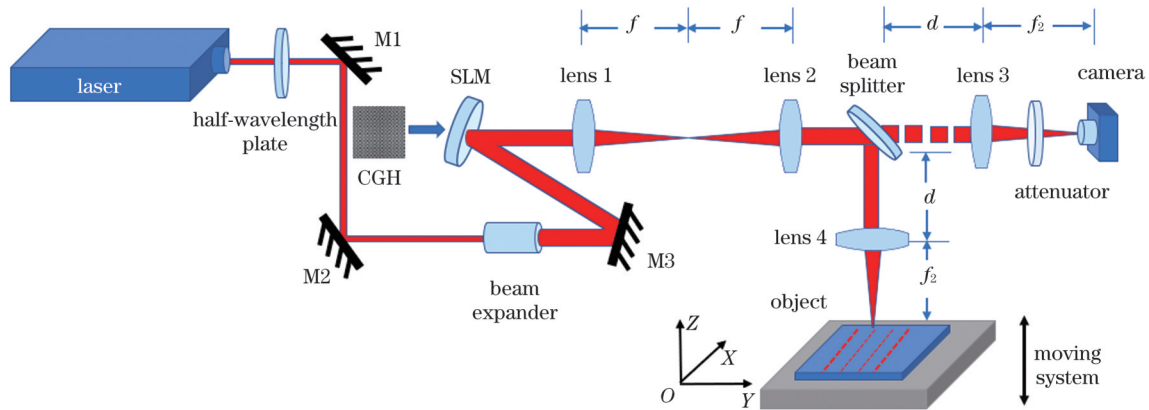


图 1 基于空间光调制器的皮秒激光并行加工系统

Fig. 1 Picosecond laser parallel processing system based on spatial light modulator

表 1 皮秒激光器的主要参数

Table 1 Main parameters of picosecond laser

Parameter	Spot diameter	Wavelength	Pulse duration	Frequency	Linear polarization degree	Beam quality	Beam mode
Content	3 mm	1064 nm	15 ps	500 kHz	100:1	$M^2 < 1.3$	$\text{TEM}_{00}$

表 2 空间光调制器的主要参数

Table 2 Main parameters of spatial light modulators

Parameter	Resolution	Pixel pitch	Effective area	Fill factor	Input signal level	Recommended average power	Refresh rate
Value	1272 pixel $\times$ 1024 pixel	12.5 $\mu\text{m}$	15.9 mm $\times$ 12.8 mm	96%	256	$\leq 100\text{ W}$	60 Hz

### 2.2 实验原理

#### 2.2.1 GS 算法与 GS-GA 算法

根据标量光学理论,透镜后焦面的光场复振幅分布与 SLM 上的光场复振幅分布呈傅里叶变换关系<sup>[23]</sup>。GS 算法的具体过程如图 2 所示。其中: source、rebuild 与 target 分别代表光源、重建光场与目标光场的振幅信息,而光源的初始相位一般是随机生

成的;CGH 是 GS 算法输出的计算全息图,包含 SLM 平面的相位信息;A 代表取振幅信息; $\varphi$  代表取相位信息;FFT 代表二维傅里叶变换;IFFT 代表二维傅里叶逆变换。在迭代的过程中,算法会对光源与重建光场的复振幅进行多次傅里叶变换和傅里叶逆变换,最终得到 SLM 平面的相位信息,最后将其转换为一张计算全息图。

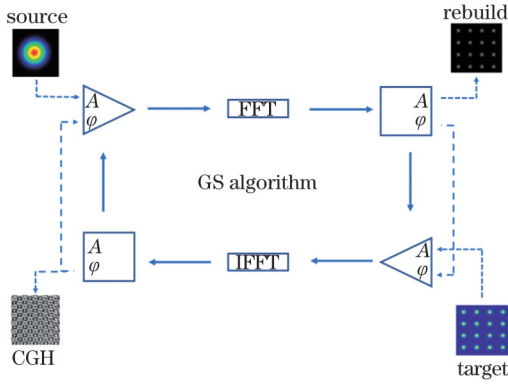


图 2 GS 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of GS algorithm

GS 算法对光源初始相位十分敏感,初始值的选取会直接影响重建光场质量<sup>[18]</sup>,但寻找合适的初始值极为困难。GS-GA 算法的主要原理是:在全部解空间上选取足够多的初始值作为“群体(population)”,利用

GS 算法计算每个初始值对应的重建光场,并用均方根误差(RMS)评价其光场质量;然后,根据每个初始值对应的光场质量,使用遗传算法中“优胜劣汰”的思想对群体进行更新,从而找到更接近最优解的初始值,其基本思路如图 3 所示。

### 2.2.2 基于实时反馈的 GS-GA 算法

在光束整形过程中,光路系统存在两个影响分束均匀性的问题:一是聚焦透镜存在场曲;二是激光器输出光斑并不是完美的高斯分布。上述问题对光束质量的影响无法通过 GS-GA 算法的内部反馈解决。本文基于 GS-GA 算法的思想与图像处理技术,在程序设计中引入了实时反馈的功能,以达到提高分束均匀度的目的。与 GS-GA 算法类似,本文提出的算法也是利用遗传算法寻找最优初始值,不同点在于重建光场是由光路中的反馈相机拍摄得到的而不是通过算法重建得到的,初始值(个体)的选取也作了相应的简化。 $\Phi_{\text{target}}$  为目标光场的复振幅,可以表示为

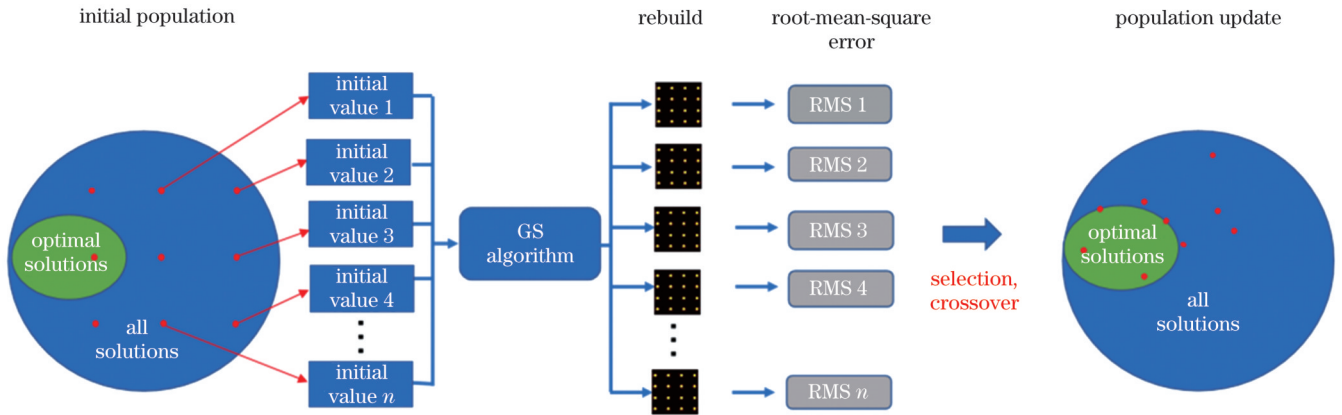


图 3 GS-GA 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of GS-GA algorithm

$$\Phi_{\text{target}} = A_{\text{target}} \exp(i\varphi_{\text{target}}), \quad (1)$$

式中: $A_{\text{target}}$  和  $\varphi_{\text{target}}$  分别是目标光场的振幅与随机生成的相位。在反馈 GS-GA 算法中光源的初始相位  $\varphi_{\text{source}}$  由目标光场  $\Phi_{\text{target}}$  作傅里叶逆变换并取相位得到,作为初始值参与反馈 GS-GA 算法的迭代运算:

$$\varphi_{\text{source}} = \arg[\mathcal{F}^{-1}(\Phi_{\text{target}})], \quad (2)$$

式中: $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$  表示傅里叶逆变换; $\arg(\cdot)$  表示取复数辅角。

基于实时反馈的 GS-GA 算法的执行流程如图 4 所示。首先,在设置多光束的数量与排列方式后,随机生成多个不同的初始值(群体);在 GS 算法中代入初始值得到对应的计算全息图,将 CGH 加载到图 1 所示的光路中,采用面阵相机对重建光场的每一束光强进行测量<sup>[24]</sup>,并计算多光束的均匀度( $\eta$ )作为每一个体的适应度<sup>[25]</sup>;通过遗传算法进行选择、交叉与变异,完成对群体的一次更新,最后选取适应度最高的个体生成的计算全息图作为算法的解。光束的均匀度  $\eta$  定

义<sup>[26]</sup>为

$$\eta = 1 - \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (3)$$

式中: $I_{\text{max}}$  是多光束阵列中强度最大的光束的强度; $I_{\text{min}}$  是多光束阵列中强度最小的光束的强度。

### 2.2.3 零级光的消除方法与动态变焦的实现

由于实验所用的空间光调制器的开口率的限制,存在无法调制的零级光,零级光对加工效果有重要影响<sup>[27]</sup>,如图 5(a)、(b)所示。为消除零级光对重建光场的影响,实验中将算法生成的全息图与菲涅耳透镜相位叠加,使零级光与重建光场纵向分离<sup>[27]</sup>。在空间光调制器上叠加的菲涅耳透镜相位在光路中相当于一个位于 SLM 处的透镜,菲涅耳透镜相位的计算公式<sup>[28]</sup>为

$$\varphi_{\text{fresnel}} = \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{f_1^2 + r^2} - f_1) \right]_{2\pi}, \quad (4)$$

式中: $\varphi_{\text{fresnel}}$  为菲涅耳透镜的相位; $r$  为像素点到空间光调制器中心的距离; $\lambda$  为激光的波长; $f_1$  为菲涅耳透镜的焦距; $[\cdot]_{2\pi}$  代表对  $2\pi$  取模。



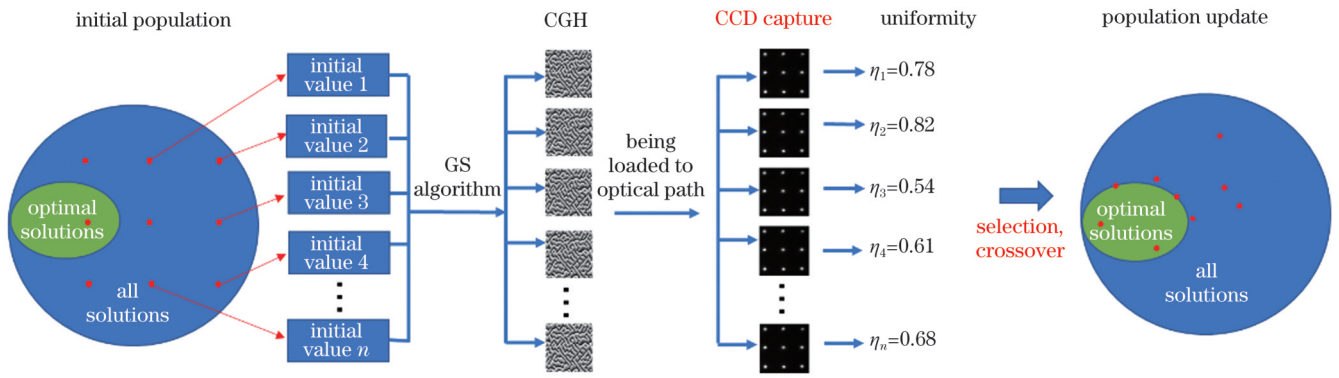


图 4 反馈 GS-GA 算法流程图  
Fig. 4 Flowchart of feedback GS-GA algorithm

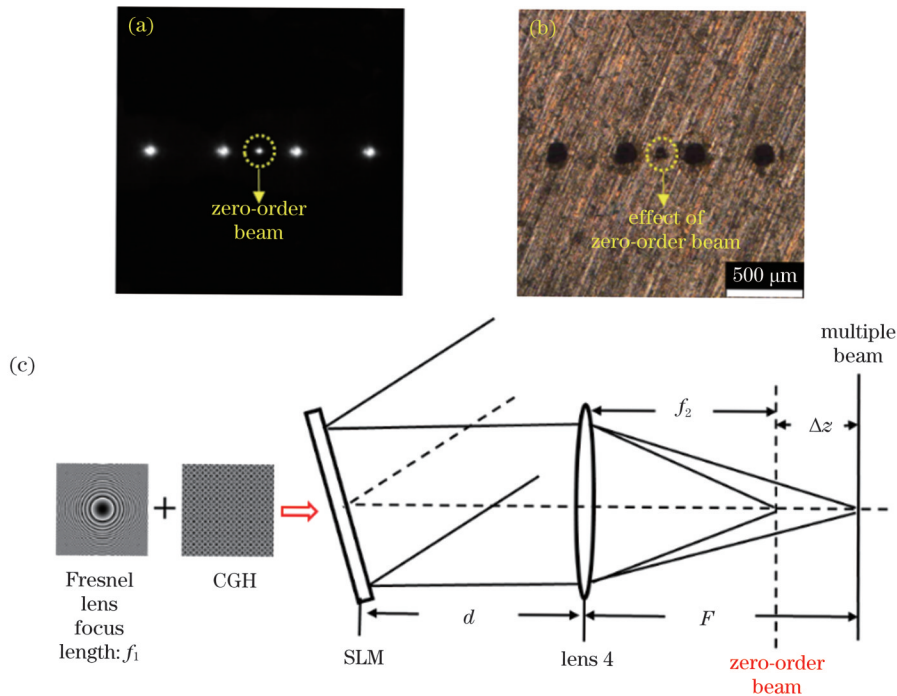


图 5 零级光的影响及消除方法。(a)零级光对多光束分束的影响;(b)零级光对加工的影响;(c)零级光的消除方法  
Fig. 5 Influence of zero-order beam and its elimination method. (a) Effect of zero-order beam on multi-beam splitting; (b) effect of zero-order beam on processing; (c) zero-order beam elimination method

如图 5(c)所示,零级光与重建光场分别会聚在透镜的焦平面上与焦平面之外,有效避免了重建光场偏离光轴造成的光学畸变现象。通过控制程序在 SLM 上以一定时间间隔更新不同的菲涅耳透镜相位,从而在轴向上对重建光场的焦平面进行动态控制<sup>[29]</sup>。根据几何光学理论,加载到 SLM 上的菲涅耳透镜焦距与焦平面轴向移动距离的关系<sup>[30]</sup>为

$$F = \frac{f_2(d - f_1)}{d - (f_1 + f_2)} - f_1, \quad (5)$$

$$\Delta z = F - f_1, \quad (6)$$

式中: $f_2$ 为聚焦透镜(图 1 中 lens 4)的焦距; $F$ 为加载菲涅耳透镜相位后 SLM 与 lens 4 的组合焦距; $d$ 为 SLM 与聚焦透镜 lens 4 的距离(不计 4F 系统中 lens 1 与 lens 2 之间的距离); $\Delta z$ 为聚焦透镜焦平面的偏移距

离。当 $f_1$ 的焦距设置在 $-410 \text{ mm}$ 到 $-400 \text{ mm}$ 区间时, $f_2 = 160 \text{ mm}$ , $d = 600 \text{ mm}$ , $\Delta z$ 将在 $300 \mu\text{m}$ 的范围内动态变化,重建光场的形态在动态移动焦点的过程中会发生一定的形变,但在本实验中焦平面的变化范围比较小,该影响几乎可以忽略不计。

### 2.3 实验过程

在本文的实验中采用空间光调制器以动态与静态加载全息图的方式对光场进行调控,实验装置如图 1 所示,实验的过程如下:

1) 激光输出功率设置为  $3.5 \text{ W}$ ,重复频率设置为  $500 \text{ kHz}$ ,使用 GS 算法、GS-GA 算法、反馈 GS-GA 算法生成不同排列方式(十字、环形、 $8 \times 8$ 阵列)对应的计算全息图,通过将生成的 CGH 静态加载到空间光调制器上对皮秒激光进行分束整形,使用功率计测量整

形后的多光束的能量并计算全息图的衍射效率,然后对反馈相机捕获的多光束图像进行处理,根据每一束光所在像素区域的灰度值总和标定其相对光强,进而由式(3)计算整形多光束的均匀度。

2) 加大激光功率,使用经三种算法整形后的多光束对铝样品进行激光打孔,采用全息图叠加菲涅耳相位的方式消除零级光束,菲涅耳透镜的焦距统一设置为 $-400\text{ mm}$ ,焦平面偏移量约为 $30.5\text{ mm}$ 。在光学显微镜下测量样品的烧蚀孔径,利用加工孔径的均匀度衡量不同算法的加工效果。

3) 使用反馈 GS-GA 算法产生 $10\times 10$ 阵列多光束,同样在全息图上叠加焦距为 $-400\text{ mm}$ 的菲涅耳透镜相位。设置激光功率为 $90\text{ W}$ 、脉冲宽度为 $15\text{ ps}$ 、重复频率为 $500\text{ kHz}$ ,对铝样品进行烧蚀打孔,在共聚焦显微镜下测量加工时间为 $10\text{ s}$ 时铝样品的烧蚀深度。

4) 将焦距为 $-400$ 、 $-405$ 、 $-410\text{ mm}$ 的菲涅耳透镜相位动态叠加到 $10\times 10$ 阵列多光束对应的计算全息图上,基于控制程序利用空间光调制器以 $0.02\text{ s}$ 的时间间隔动态加载计算全息图,在焦平面轴向 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的区间内对铝样品进行移动加工,并使用共聚焦显微镜观察烧蚀孔的深度,计算孔径与深度的均匀度。设 $a_{\max}$ 和 $a_{\min}$ 分别为样品加工孔径的最大值与最小值,

$d_{\max}$ 和 $d_{\min}$ 分别为烧蚀深度的最大值与最小值。孔径与孔深的均匀性 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 计算方式为

$$\eta_1 = 1 - \frac{a_{\max} - a_{\min}}{a_{\max} + a_{\min}}, \quad (7)$$

$$\eta_2 = 1 - \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}}. \quad (8)$$

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 分束整形效果

在图 1 所示的光路系统中,分别使用 GS 算法、GS-GA 算法与反馈 GS-GA 算法对皮秒激光进行分束。为了验证本文设计的算法对图案化与阵列化的光束排列方式都有效,设置了三种分束方式,如图 6 所示。其中,图 6(a1)~(a3)为 GS 算法分束效果,图 6(b1)~(b3)为 GS-GA 算法分束效果,图 6(c1)~(c3)为反馈 GS-GA 算法分束效果。在算法的运行时间上,GS 算法在几十秒内就可以完成一次计算。而 GS-GA 算法与反馈 GS-GA 算法每进行一次群体更新,都会多次使用 GS 算法代入所有个体的初始值。综合考虑计算精度和计算时间成本,GS-GA 算法与反馈 GS-GA 算法的种群数量都设为 32,群体的最大进化代数 100。三种算法的计算时间如表 3 所示。

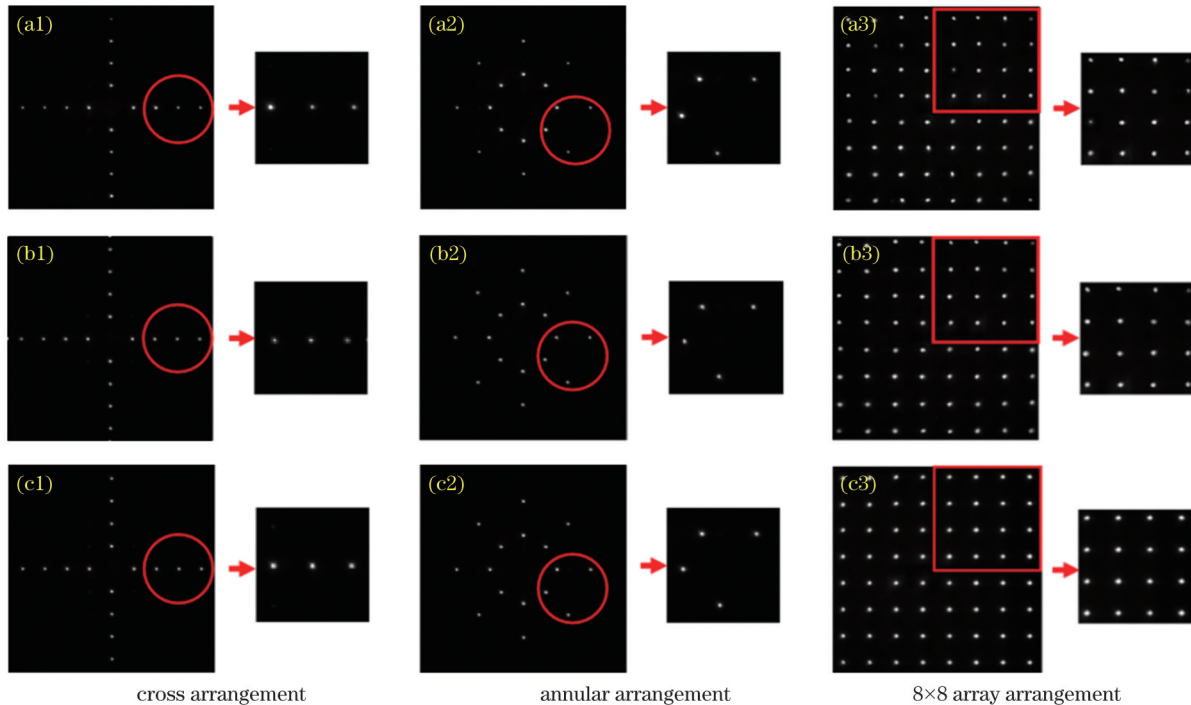


图 6 面阵相机捕获的三种算法的分束效果。(a1)(a2)(a3)GS 算法;(b1)(b2)(b3)GS-GA 算法;(c1)(c2)(c3)反馈 GS-GA 算法  
Fig. 6 Beam splitting effects of three algorithms captured by camera. (a1)(a2)(a3) GS algorithm; (b1)(b2)(b3) GS-GA algorithm; (c1)(c2)(c3) feedback GS-GA algorithm

分束均匀度如表 4 所示。从实验结果可以看出:由于光路系统存在一定程度的误差,仅由 GS 算法得出的多光束均匀度并不能达到理论值的 $80\%$ ,整形效果较差;相较于 GS 算法,GS-GA 算法的均匀

度有所提升,但在分束数量较多的情况下算法性能下降明显;由于加入了系统实时反馈,反馈 GS-GA 算法得到的多光束能量分布的均匀度明显高于前两者。

表 3 GS 算法、GS-GA 算法与反馈 GS-GA 算法的计算时间

Table 3 Running time of GS algorithm, GS-GA algorithm and feedback GS-GA algorithm

Beam arrangement	GS algorithm		GS-GA algorithm		Feedback GS-GA algorithm	
	Runtime	Number of iterations	Runtime	Number of population updates	Runtime	Number of population updates
Cross	<1 min	45	3.5 h	22	6 h	28
Circle	<1 min	50	3 h	19	5 h	25
8×8 array	<1 min	43	6.5 h	40	14.5 h	57

表 4 不同排列方式下 GS 算法、GS-GA 算法与反馈 GS-GA 算法分束的能量均匀性

Table 4 Energy uniformity of split beams generated by GS algorithm, GS-GA algorithm, and feedback GS-GA algorithm under different arrangements

Beam arrangement	Uniformity of GS algorithm / %	Uniformity of GS-GA algorithm / %	Uniformity of feedback GS-GA algorithm / %
Cross	64.3	82.3	93.8
Circle	75.8	84.2	95.1
8×8 array	59.4	68.3	94.5

### 3.2 分束加工效果

采用三种算法分束所得的光束进行激光加工。在激光输出功率为 3.5 W 时,通过反馈相机测得分束后的聚焦光斑直径约为 30 μm;在光斑大小变化为 ±5% 时,相机移动距离约为 100 μm,因此,焦深约为 100 μm。加工效果如图 7 所示,分束数量为 16 束时激光功率为 20 W,分束为 8×8 阵列时激光功率为 70 W,激光加工时间、脉冲宽度、重复频率统一设定为 1.5 s、15 ps、500 kHz。

激光分束能量大小与激光器的功率正相关,单束光功率增大,打孔尺寸也会有所增加。随着分束数量的增加,为保证打孔尺寸一定,需要提高激光的输出功率。为便于评价孔径和孔深均匀性,选择部分小孔作为测量对象。图 8(a)、(b)分别为十字和环形排列方式下小孔的选取方式。在 8×8 矩阵排列方式下选取了第一行、第五行和第八行的小孔,小孔的序号已在图 8(c)中标出。图 9(a)、(c)、(e)分别为十字、环形、8×8 矩阵排

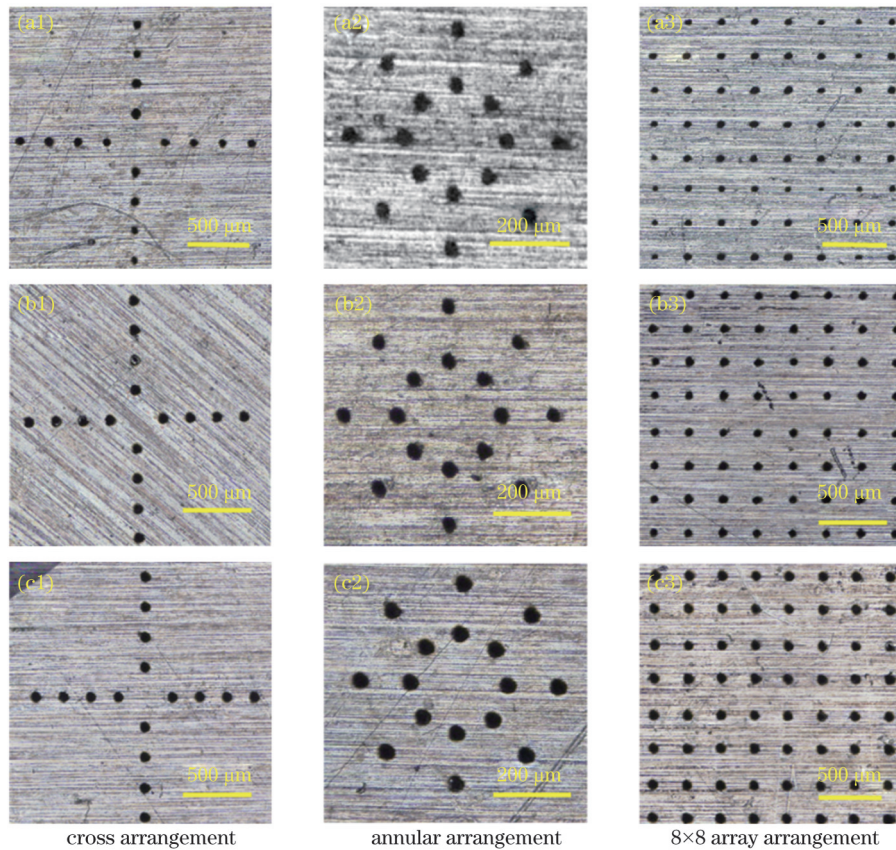


图 7 三种算法的分束加工效果。(a1)(a2)(a3)GS 算法;(b1)(b2)(b3)GS-GA 算法;(c1)(c2)(c3)反馈 GS-GA 算法  
Fig. 7 Beam splitting processing effects of three different algorithms. (a1)(a2)(a3) GS algorithm; (b1)(b2)(b3) GS-GA algorithm; (c1)(c2)(c3) feedback GS-GA algorithm



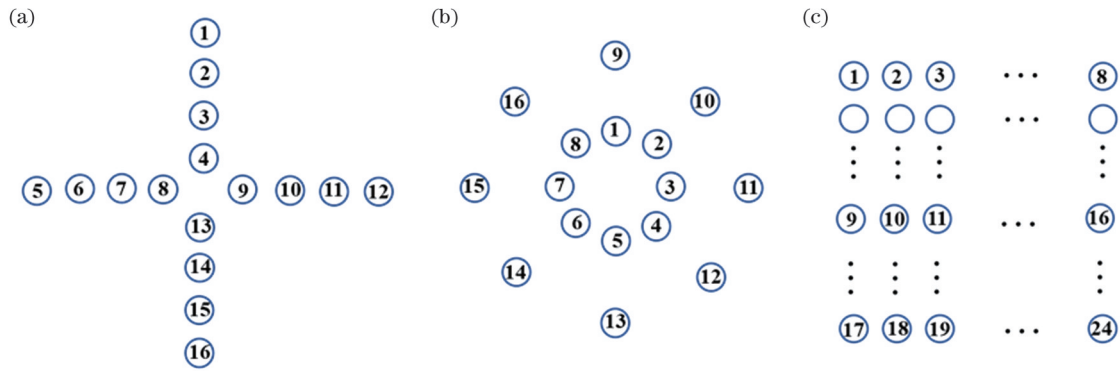


图 8 选取孔的方式。(a)十字排列下孔的编号;(b)环形排列下孔的编号;(c)8×8矩阵排列下孔的编号

Fig. 8 Ways to selecting holes. (a) Serial numbers of holes under cross arrangement; (b) serial numbers of holes under annular arrangement; (c) serial numbers of holes under 8×8 array arrangement

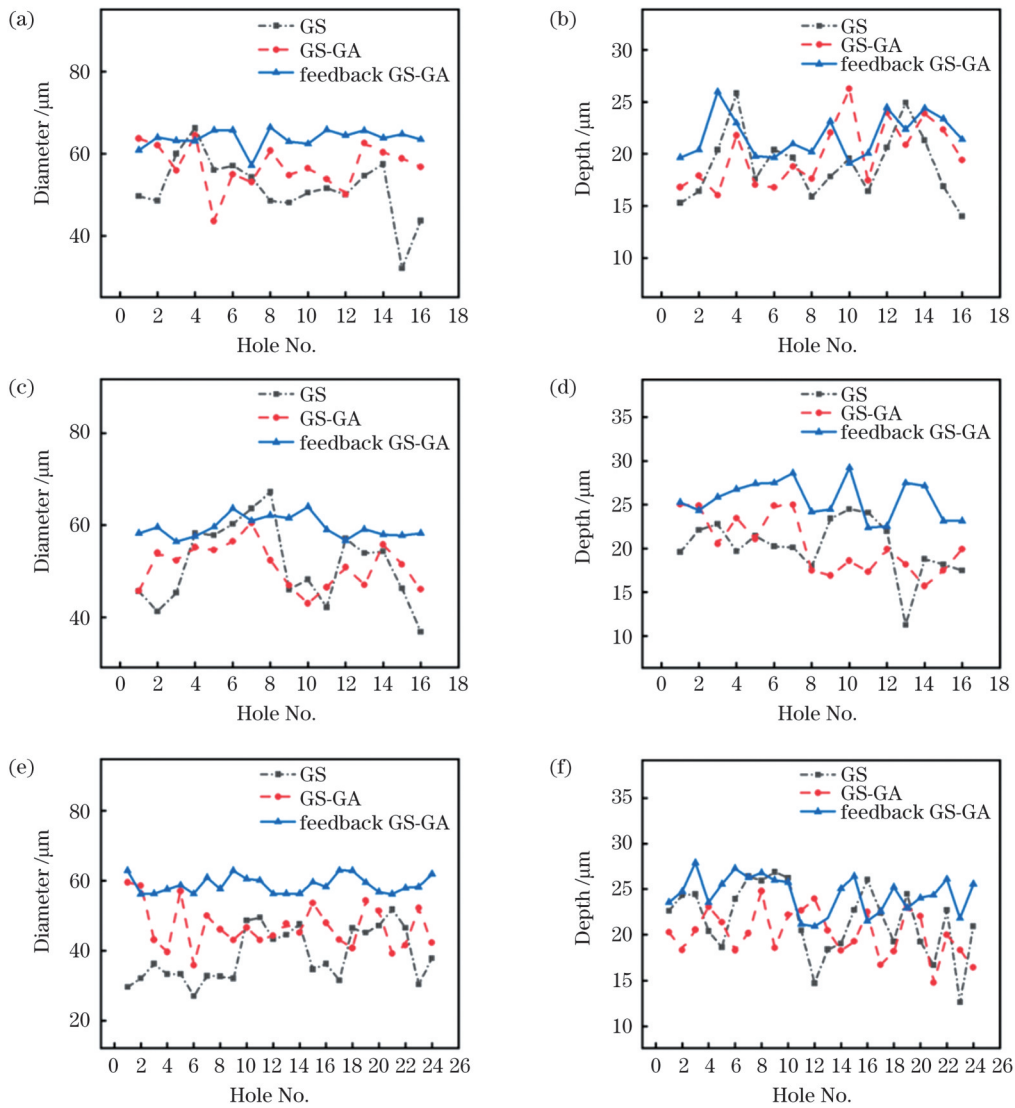


图 9 三种算法的加工孔径与深度。(a)十字排列下的加工孔径;(b)十字排列下的加工深度;(c)环形排列下的加工孔径;(d)环形排列下的加工深度;(e)8×8矩阵排列下的加工孔径;(f)8×8矩阵排列下的加工深度

Fig. 9 Machining hole diameters and depths obtained by three algorithms. (a) Machining hole diameter under cross arrangement; (b) machining hole depth under cross arrangement. (c) machining hole diameter under annular arrangement; (d) machining hole depth under annular arrangement; (e) machining hole diameter under 8×8 array arrangement; (f) machining hole depth under 8×8 array arrangement

列下的孔径数据,横坐标是小孔的序号,纵坐标是小孔孔径,单位为  $\mu\text{m}$ ;图 9(b)、(d)、(f)分别为十字、环形、 $8\times 8$ 矩阵排列下的孔深数据,横坐标是小孔的序号,纵坐标是孔深,单位为  $\mu\text{m}$ 。

通过式(7)和式(8)计算出孔径和孔深的均匀性,以便评价不同算法获得的分束均匀程度,结果如表 5、6 所示,其中,  $I_1$  为反馈 GS-GA 算法加工孔径的均匀性相较于 GS-GA 算法的提升百分比,  $I_2$  为反馈 GS-GA 算法加工孔径的均匀性相较于 GS 算法的提升百分比,  $I_3$  为反馈 GS-GA 算法加工孔深度的均匀性相较于 GS-GA 算法的提升百分比,  $I_4$  为反馈 GS-GA 算法加工孔深度的均匀性相较于 GS 算法的提升百分比。从表 5、6 和图 9 可以看出,相比于前两种算法,使用反馈 GS-GA 算法获得的孔阵列,孔深和孔径的一致性均得

到显著提升。与常规 GS-GA 算法相比,其孔深和孔径的一致性提高了 12% 以上(如表 5、6 所示);与 GS 算法相比,其孔深和孔径的一致性提高 40% 左右。在衍射效率方面,由于反馈 GS-GA 算法只是通过相机反馈动态改变输入到 GS 算法的目标光束模型参数,因此其衍射效率与 GS 算法相当,约为 85%。需要说明的是,所使用的机械加工平台的 Z 轴方向的移动精度偏低,导致利用 GS 分束、GS-GA 分束、反馈 GS-GA 分束激光进行加工实验时,样品放置位置有偏差,进而导致入射至样品表面的实际光斑大小有偏差,进一步使得在激光器输出功率、分束阵列分布相同的情况下,三种算法所得的孔径平均值有差别,如图 7 所示。但是,样品在 Z 轴方向上的放置位置偏差不影响分束均匀度分析。

表 5 不同排列方式下 GS 算法、GS-GA 算法与反馈 GS-GA 加工孔径的均匀性

Table 5 Machining hole diameter uniformity obtained through GS algorithm, GS-GA algorithm, and feedback GS-GA algorithm under different arrangements

Beam arrangement	Hole diameter uniformity			$I_1$	$I_2$
	GS algorithm	GS-GA algorithm	Feedback GS-GA algorithm		
Cross	65.3%	80.6%	92.5%	14.8%	41.7%
Annular	70.8%	83.1%	93.7%	12.8%	32.3%
$8\times 8$ array	52.9%	67.1%	94.3%	40.5%	72.9%

表 6 不同排列方式下 GS 算法、GS-GA 算法与反馈 GS-GA 加工深度的均匀性

Table 6 Machining hole depth uniformity obtained through GS algorithm, GS-GA algorithm, and feedback GS-GA algorithm under different arrangements

Beam arrangement	Hole depth uniformity			$I_3$	$I_4$
	GS algorithm	GS-GA algorithm	Feedback GS-GA algorithm		
Cross	60.2%	74.3%	85.1%	14.5%	40.1%
Annular	63.0%	77.2%	86.7%	12.3%	37.6%
$8\times 8$ array	59.4%	74.7%	85.1%	13.9%	43.3%

图 10 是反馈 GA-GS 算法生成的  $10\times 10$  光束阵列在动态变焦下对铝样品的加工效果(激光功率为 90 W、脉冲宽度为 15 ps、重复频率为 500 kHz,加工时间为 50 s,衍射效率为 82.1%)。其中,图 10(a)为铝样品加工效果的全部样貌,图 10(b)为多光束阵列的加工深度的三维形貌,图 10(c)为第一行孔的横截面形貌,图 10(d)为第五行孔的横截面形貌,图 10(e)为第六行孔的横截面形貌,图 10(f)为第十行孔的横截面形貌,横轴是坐标偏移量,纵轴为烧蚀深度。经计算, $10\times 10$ 阵列的孔径均匀度为 93.6%,孔深均匀度为 89.7%。

## 4 结 论

基于 GS 算法和 GS-GA 算法的思想以及图像处

理与控制技术,提出了一种实时反馈补偿的优化算法。该反馈算法通过使用 GS 算法与相机反馈的结果作为遗传算法中个体的适应度函数,利用遗传算法对输入到 GS 算法的初始值群体进行多次选择、交换、淘汰,成功获得光束均匀性接近 94% 的图形化多光束与阵列多光束;利用该反馈算法获得的光束阵列进行激光精密打孔,孔径均匀度大于 90%,孔深均匀度也接近 90%。所提出的方法可以对任意形式排列的多光束进行高均匀性整形,对光路系统精度要求不高,并且通过动态变焦的方式获得了在一定焦深范围内的分束均匀度接近 90% 的阵列多光束分布。所提出的方法可获得任意排列方式的光束分布,显著提高了分束均匀性,可应用于高质量超快激光的并行加工。所提方法计算时间偏长的问题可以通过优化算法的求解范围,选用



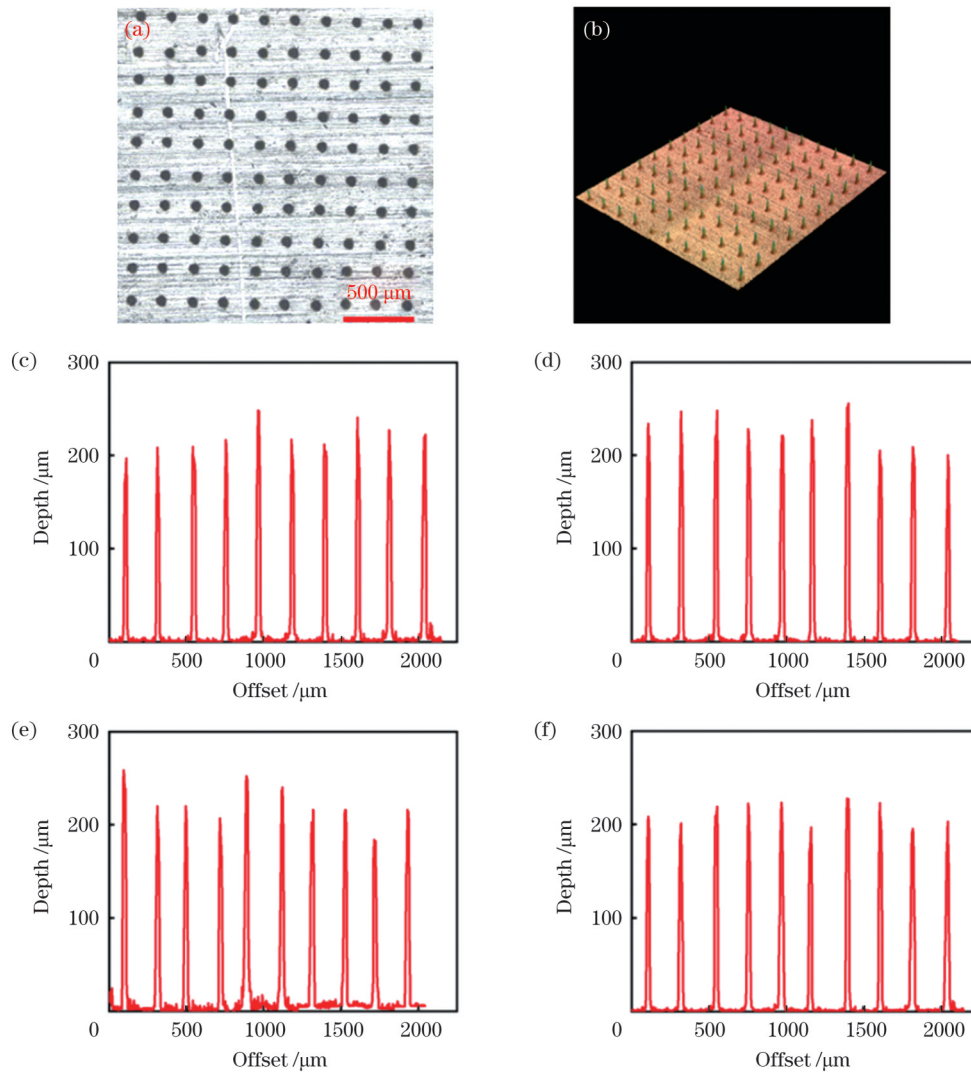


图 10 利用反馈 GS-GA 算法生成的  $10 \times 10$  光束阵列对铝样品的加工效果。(a) 加工后的铝样品全貌; (b) 孔阵列三维形貌; (c) 第一行孔的深度; (d) 第五行孔的深度; (e) 第六行孔的深度; (f) 第十行孔的深度  
 Fig. 10 Processing effects of  $10 \times 10$  beam array generated by feedback GS-GA algorithm on aluminum sample. (a) Full view of aluminum sample after processing; (b) 3D morphology of hole array; (c) depth of first row of holes; (d) depth of fifth row of holes; (e) depth of sixth row of holes; (f) depth of tenth row of holes

高性能计算机硬件加快算法迭代速度予以改善。

### 参 考 文 献

[1] Lei S T, Zhao X, Yu X M, et al. Ultrafast laser applications in manufacturing processes: a state-of-the-art review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142(3): 031005.

[2] Mait J N, Herzig H P. Diffractive optics and micro-optics: introduction to the feature issue[J]. Applied Optics, 1999, 38(14): 2977-2978.

[3] Suleski T J, Te Kolste R D. Fabrication trends for free-space microoptics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(2): 633-646.

[4] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2100001.  
 Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2100001.

[5] Kondo T, Matsuo S, Juodkazis S, et al. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(6): 725-727.

[6] Liu Y H, Kuo K K, Cheng C W, et al. Femtosecond laser two-beam interference applied to 4H-SiC surface hierarchical micro-nano structure fabrication[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 151: 108081.

[7] Kuang Z, Perrie W, Leach J, et al. High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 2284-2289.

[8] 朱妍, 张锦, 蒋世磊, 等. 新型  $5 \times 5$  束相位型达曼光栅的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1305002.  
 Zhu Y, Zhang J, Jiang S L, et al. Design of novel type of  $5 \times 5$  beam splitting phase Dammann grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1305002.

[9] 翟中生, 张艺, 吕清花, 等. 基于组合光栅的光束整形方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1305001.  
 Zhai Z S, Zhang Y, Lü Q H, et al. Beam shaping method based on combined gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1305001.

[10] 匡珺洁, 罗宁宁, 张静雅, 等. 基于空间光调制器的并行微纳光刻技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1100009.  
 Kuang J J, Luo N N, Zhang J Y, et al. Review on the progress of parallel micro/nano lithography based on spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1100009.

- [11] 孔德键, 孙小燕, 董卓林, 等. 飞秒激光空间光束整形加工技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111416.  
Kong D J, Sun X Y, Dong Z L, et al. Progress in femtosecond laser processing technology based on space beam shaping[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111416.
- [12] 何泽浩, 隋晓萌, 曹良才, 等. 基于参数空间遍历的空间光调制器量化取值优化[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1209002.  
He Z H, Sui X M, Cao L C, et al. Optimization of quantization value for spatial light modulators based on parameter space traversal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1209002.
- [13] Il'ina I V, Yu Cherezova T, Kudryashov A V. Gerchberg-Saxton algorithm: experimental realisation and modification for the problem of formation of multimode laser beams[J]. Quantum Electronics, 2009, 39(6): 521-527.
- [14] Kuzmenko A V. Weighting iterative Fourier transform algorithm of the kinoform synthesis[J]. Optics Letters, 2008, 33(10): 1147-1149.
- [15] Wu Y, Wang J, Chen C, et al. Adaptive weighted Gerchberg-Saxton algorithm for generation of phase-only hologram with artifacts suppression[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 1412-1427.
- [16] Liu J P, Tsai C M. Binary computer-generated holograms by simulated-annealing binary search[J]. Photonics, 2022, 9(8): 581.
- [17] Wen M T, Yao J P, Wong W K, et al. Holographic diffuser design using a modified genetic algorithm[J]. Optical Engineering, 2005, 44(8): 085801.
- [18] 林勇. 用于激光光束整形的衍射光学元件设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
Lin Y. Design of diffractive optical elements for laser beam shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [19] 于晓晨. 提高激光束整形质量的方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
Yu X C. Research on methods for improving the quality of laser beam shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [20] 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.  
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.
- [21] 翟中生, 刘愿, 汪于涛, 等. 基于实时图像反馈的能量高均匀性多光束加工技术研究[J]. 应用激光, 2020, 40(5): 884-889.  
Zhai Z S, Liu Y, Wang Y T, et al. Research on multi-beam machining technology with high energy uniformity based on real-time image feedback[J]. Applied Laser, 2020, 40(5): 884-889.
- [22] 史志勇, 周立强, 张立春, 等. 基于多焦点阵列的动态激光并行加工[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1014004.  
Shi Z Y, Zhou L Q, Zhang L C, et al. Dynamic laser parallel fabrication based on multifocal array[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1014004.
- [23] 金国藩, 张浩, 苏萍. 计算机全息图[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 6-11.  
Jin G F, Zhang H, Su P. Computational mechanism hologram[M]. Beijing: Science Press, 2020: 6-11.
- [24] Clark T W, Offer R F, Franke-Arnold S, et al. Comparison of beam generation techniques using a phase only spatial light modulator[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6249-6264.
- [25] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 41-60.  
Zhou M, Sun S D. Genetic algorithms: theory and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 41-60.
- [26] Di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [27] 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.
- [28] Bhattacharya S, Vijayakumar A. Design and fabrication of diffractive optical elements with MATLAB[M]. Washington, D.C: SPIE Press, 2017: 51-53.
- [29] 宋昶, 杨小君, 赵卫, 等. 基于空间光调制器的飞秒激光深微孔加工方法[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0814001.  
Song C, Yang X J, Zhao W, et al. Depth-micro laser drilling methods based on spatial light modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 0814001.
- [30] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2016: 16-37.  
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016: 16-37.

## High-Uniformity Ultra-Fast Laser Beam Splitting and Precision Machining Based on Hybrid Algorithm

Yang Lei<sup>1</sup>, Xu Xinyu<sup>1</sup>, Wang Jianlei<sup>3</sup>, Ye Yunxia<sup>1,2\*</sup>, Ren Xudong<sup>1</sup>, Chen Weibiao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Institute of Micro-nano Optoelectronics and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

<sup>3</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

### Abstract

**Objective** Ultrafast lasers possess desirable advantages in the field of precision processing owing to their short pulse widths and high-energy peak densities. However, single-focus ultrafast laser processing technology suffers from low processing efficiencies. Parallel processing by beam splitting using a spatial light modulator (SLM) is a solution for improving the efficiency of ultrafast laser precision processing. Improving the multibeam uniformity after beam splitting is a key issue in ultrafast laser parallel processing. Two factors deteriorate the quality of multiple beams: the approximations in beam-splitting algorithms, which leads to poor calculation accuracy, and the poor beam quality of the laser in optical paths. To address these issues, a feedback GS-GA algorithm based on real-time feedback is proposed in this study.

**Methods** A spatial light modulator is used for phase-only modulation by loading computer-generated holograms (CGHs). The algorithms for beam splitting and shaping are dominated by the Gerchberg-Saxton (GS) algorithm and its derivatives. The GS

algorithm is highly sensitive to the initial phase value of the light source, which directly affects the quality of the reconstructed light field. However, it is difficult to obtain a suitable initial value. In this study, real-time feedback based on GS and genetic algorithms is introduced in the process of hologram generation to improve the uniformity of beam splitting. In addition, a loaded Fresnel lens phase is used to separate the zero-order beam, avoiding the aberration caused by deviations from the optical axis of a reconstructed optical field. After several iterations of the proposed algorithm, a beam array with a high uniformity is designed.

**Results and Discussions** Three beam splitting methods, including the GS algorithm, GS-GA algorithm, and feedback GS-GA algorithm, are investigated in terms of the beam splitting and processing effect. Owing to a system error in the optical path, the multibeam uniformity derived from the GS algorithm is less than 80% of the theoretical value. Compared with the GS algorithm, the uniformity of the GS-GA algorithm is improved; however, the performance of the GS-GA algorithm decreases significantly when the number of split beams increases. Due to the real-time feedback from the system (Table 4 and Fig. 6), the uniformity of the multi-beam energy distribution obtained by the feedback GS-GA algorithm is superior to those of the other algorithms. Compared with the conventional GS-GA algorithm, the use of the feedback GS-GA algorithm significantly improves the consistency of both the hole depth and diameter by more than 12% in the resulting hole arrays. The consistent performance for the hole depth and diameter is improved by approximately 40% compared with that of the GS algorithm (Tables 5 and 6, and Fig. 7).

**Conclusions** An optimized feedback GS-GA algorithm is proposed for pre-compensation, and its effectiveness is experimentally demonstrated. Using the results from camera feedback as the individual fitness function in a genetic algorithm, this feedback algorithm utilizes the genetic algorithm to select, exchange, and eliminate the initial value population, thereby improving the beam uniformity by approximately 94% for graphic and array multibeams. Furthermore, a laser precision punching experiment is performed using the beam arrays obtained via this feedback algorithm, which shows large aperture and hole depth uniformities of over 90%. The method proposed in this paper can achieve high-uniformity shaping for any form of designed multibeam with minimal requirements on the accuracy of the optical path system. This method obtains a multibeam distribution with beam splitting uniformity close to 90% in a certain focal depth range by dynamic zooming. The proposed shaping strategy significantly improves the beam splitting uniformity, which paves the way for the application of high-quality ultrafast laser parallel processing. The time-consuming computation of the proposed method can be improved by optimizing the solution range of the algorithm and using high-performance computer hardware to speed up the iteration of the algorithm.

**Key words** laser technique; spatial light modulation; beam splitting and shaping; ultrafast laser precision machining; genetic algorithm; GS algorithm