

文章编号:1002-2082(2016)02-0315-06

# 基于空间光调制器的飞秒并行加工方法研究

胡勇涛<sup>1</sup>, 翟中生<sup>1</sup>, 吕清花<sup>2</sup>, 陈 列<sup>1</sup>, 姜德元<sup>1</sup>, 杨奇彪<sup>1</sup>, Peter Bennett<sup>1</sup>, 刘 顿<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 湖北 武汉 430068; 2. 湖北工业大学 理学院, 湖北 武汉 430068)

**摘 要:**针对飞秒激光微加工中能量利用率和加工效率低的问题,提出一种基于空间光调制器的飞秒并行加工方法。在讨论衍射光栅入射角与衍射角关系的基础上,分析了叠加多个衍射光栅产生多光束的原理,运用 GS 算法对目标多光束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多光束。采用脉宽 100 fs、波长 800 nm 的飞秒激光,进行聚焦 PMMA 样品内部的并行加工实验,观察到 PMMA 上多点组合的“一”和“工”字型,得到了光束能量均匀的图形。实验结果论证了该方法对于多光束并行加工控制的有效性。

**关键词:**激光加工;并行加工;空间光调制器;GS 算法;多光束

中图分类号:TN249

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0207003

## Parallel processing with femtosecond laser using spatial light modulator

Hu Yongtao<sup>1</sup>, Zhai Zhongsheng<sup>1</sup>, Lyu Qinghua<sup>2</sup>, Chen Lie<sup>1</sup>, Lou Deyuan<sup>1</sup>,

Yang Qibiao<sup>1</sup>, Peter Bennett<sup>1</sup>, Liu Dun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of low energy utilization and low efficiency in femtosecond laser micromachining, a new method of femtosecond parallel processing based on spatial light modulator (SLM) was proposed. Based on the discussion of the relationship between incident angle and diffraction angle, the principle of superposition of multiple diffraction gratings was analyzed. Multiple beams were generated by loading the phase holograms calculated using Gerchberg and Saxton (GS) algorithm on the SLM. The parallel femtosecond laser beam with the pulse width of 100 fs and the wavelength of 800 nm was focused inside a polymethyl methacrylate (PMMA) sample, uniform multi-point patterns of “一” and “工” were observed. Experimental results show that it is an effective method for controlling multi-beam parallel processing.

**Key words:** laser machining; parallel processing; spatial light modulator; GS algorithm; multi-beam

## 引言

激光加工是一种非接触加工方式,具有能量密度高、方向性好、高相干性、热影响区小等优

点<sup>[1]</sup>,在工业加工领域中备受青睐。连续和长脉冲激光器主要依靠聚焦产生的高温来烧蚀材料,热扩散范围大,在对一些特殊材料,例如橡胶、塑

收稿日期:2015-10-10; 修回日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金(11204071, 51575164); 国家科技支撑计划(2015BAF20B03); 湖北省自然科学基金(2014CFB596); 湖北省科技支撑计划(2015BAA066)

作者简介:胡勇涛(1990—),男,湖北天门人,硕士研究生,主要从事飞秒激光微加工方面的研究工作。

E-mail: asdf260571085@163.com

通信作者:翟中生(1978—),男,湖北武穴人,副教授,主要从事精密测量及激光加工。E-mail: supersakula@163.com

料等,仍会出现明显的烧蚀现象<sup>[2]</sup>。而且加工精度有限,很难实现真正高精度加工<sup>[3]</sup>。传统激光加工主要利用单束激光聚焦后进行材料加工,由于激光器出射的光束能量过大,常需利用衰减器件对激光功率进行衰减,因此加工过程中能量利用率并不高。

飞秒激光脉冲作用时间短,具有非常高的瞬时功率,能使不同形态的物质瞬间变成等离子体,作用在物质上会产生非常奇特的现象,而且其具有热效应小、加工精度高的优点,越来越成为众多学者的研究热点<sup>[4]</sup>。飞秒激光能完成三维的微细加工,可实现多层三维光学高密度信息存储,在制作光波导、分束器和耦合器等很多领域都有重要应用<sup>[5]</sup>,但是飞秒激光微加工最大的缺点是加工效率低<sup>[6]</sup>。为了能提高飞秒微加工过程中的加工效率,研究者普遍采用多光束并行加工方法<sup>[7]</sup>。并行加工技术可以大大提高加工效率,因此被广泛应用于飞秒激光微加工领域。目前,产生多光束的方法主要有:多激光器法、干涉法、衍射光学元件法<sup>[8]</sup>等。这些方法不能对光束进行独立控制,缺乏控制的灵活性,难以实现多光束的动态精确控制。

空间光调制器(spatial light modulator, SLM)是一种能够对光波的空间分布进行调制的一类器件,在随时间、空间变化信号的控制下,可以改变光束的振幅、相位、偏振态等参数,可将飞秒激光聚焦到多个焦点,实现多个焦点同时加工,激光光束的数量和位置可以利用计算机全息图(computer generated hologram, CGH)CGH 进行灵活控制,实现灵活高效的精密加工<sup>[9]</sup>。因此 SLM 被广泛应用于许多领域,例如时域脉冲整形<sup>[10]</sup>、全息光镊<sup>[11]</sup>、光束空间整形<sup>[12-13]</sup>和多光束并行加工<sup>[14]</sup>。利用并行加工技术可以有效提高加工速度和加工效率,能够将加工效率提高一个数量级以上,显著缩短加工时间,大大节省加工成本<sup>[15]</sup>。

本文在讨论衍射光栅入射角与衍射角关系的基础上,分析利用多个衍射光栅<sup>[16]</sup>叠加产生多光束的原理,再结合 SLM 能模拟衍射光学元件的性质,通过 GS 算法<sup>[17]</sup>对目标多光束进行优化计算得到相应的 CGH,将该 CGH 加载到 SLM 中就能实现飞秒多光束并行加工。实验结果验证了利用 SLM 加载 CGH 能够单次实现多光束的加工,说明本文提出的多光束加工方法能有效利用激光能

量,提高加工效率。

## 1 空间光调制器调制原理

### 1.1 液晶空间光调制器衍射光栅的模拟

液晶空间光调制器(LCSLM)利用液晶对光的特定效应能够对光进行调制,一般由独立的像素单元组成矩阵阵列,矩阵的每个像素单元都可以独立地接受电信号(或光信号)的控制,并按此信号改变 SLM 介质本身相应的光电参数(透过率和折射率等),从而达到对入射到其单元上的光学参数(振幅、相位和偏振态等)进行调制的目的。控制每个液晶单元的输入电信号,使液晶分子偏向不同角度,从而改变 LCSLM 的折射率,进而可以模拟相位型衍射光学元件<sup>[18]</sup>。

对于衍射光栅,如图 1 所示,当有光射入时,经过光栅后光会发生衍射,图中  $d$  代表光栅间距,  $\alpha$  表示入射光与光栅平面法线之间的夹角,  $\beta$  表示衍射角。当入射光与衍射光为同一侧时  $\beta$  值取正号;当入射光与衍射光为异侧的时候  $\beta$  值取负号。则两束相邻的光束之间的光程差为

$$\Delta = d(\sin \alpha \pm \sin \beta) \quad (1)$$

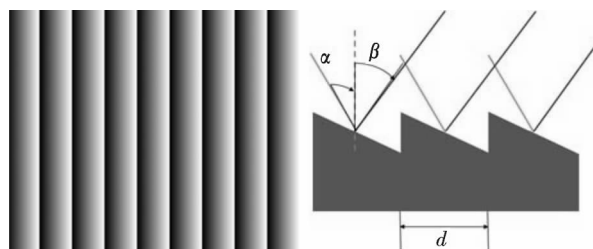


图 1 衍射光栅原理图

Fig. 1 Principle diagram of diffraction grating

因此,光栅方程普遍可以写为

$$d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = m\lambda \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

式中  $m$  表示明暗条纹光谱级数。由(2)式光栅方程可知,光栅常数  $d$ 、入射角  $\alpha$ 、衍射角  $\beta$ 、光谱级数和波长各参数之间相互影响,当光栅常数、光谱级次+1 阶和激光波长一定时,入射角发生改变,将导致衍射角跟着变化。

### 1.2 液晶空间光调制器对多光束的叠加调制原理

由光栅方程可知,光栅常数、入射角、衍射角、光谱级数和波长各参数之间相互影响,对于波长一定的激光束,欲获得多光束,可以利用多个衍射光栅进行叠加,并且这些光栅与入射光形成不同

的入射角。由(2)式可看出,同一光束将被这些衍射光栅衍射出不同的光束,利用此原理,可以实现由单光束变为多光束,利用 LCSLM 可以模拟相位型的衍射光栅。

多光束中的每束光可由对应的一幅 CGH 产生,因此由多幅不同 CGH 叠加就可实现多光束,在透镜的焦平面位置叠加就可得到任意形状的多光束图案,如图 2 所示。从图中可看出,单束光对应的相位全息图与图 1 中所示的衍射光栅相同,只是随着目标单光束的位置不同,光栅的角度发生相应变化,表 3 中的 5 束光是由 5 幅单光束的 CGH 叠加而成。目标多光束对应的 CGH 的相位  $\varphi_h$  可表示为

$$\varphi_h = (\varphi_{\text{prism}-1} + \varphi_{\text{prism}-2} + \cdots + \varphi_{\text{prism}-n}) \bmod 2\pi = \left( \sum_{i=1}^n \varphi_{\text{prism}-i} \right) \bmod 2\pi \quad (3)$$

式中:  $\varphi_{\text{prism}-i}$  为第  $i$  幅图的相位量;  $n$  为目标光束数量;  $\bmod$  为求余运算;  $\bmod 2\pi$  运算为总相位对  $2\pi$  的余数。从图 2 中可看出,单光束对应的相位全息图为灰度图,灰度值一般为  $0 \sim 255$ ,灰度图加载到 SLM 中灰度值与相位量对应关系一般为:灰度值 0 对应的相位为 0,灰度值 255 对应的相位为  $2\pi$ ,中间值按照线性关系进行等分。因此,多光束对应的相位全息图,可根据全部单束光的灰度图进行相加,再对  $2\pi$  求余,就可得到最终的 CGH。

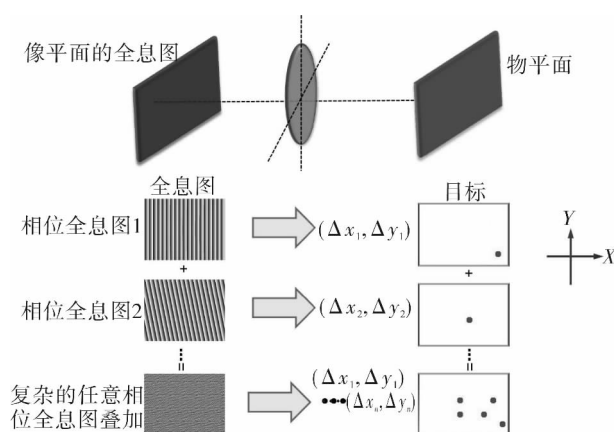


图 2 相位叠加产生的任意二维多光束图形

Fig. 2 2D arbitrary multi-beam pattern generated by complex superposition of phases

多光束的获取关键是产生 CGH。目前生成 CGH 的算法主要有 gratings and lens(GL)和 gerchberg and saxton(GS)<sup>[19]</sup>。GL 算法是一种非迭代的算法,具有简单、计算运行速度快的优点,但由于其产生多光束的衍射效率偏低且能量均匀性

过低,而且容易产生加工中的鬼点,因此不被广泛采用。GS 算法是一种迭代算法,其可以实时计算,反馈控制能量的强度分布状态,优化多光束能量的均匀性,因此被广泛运用在并行加工的系统,本文采用经典的 GS 算法得到计算机 CGH,其原理和流程图如图 3 所示。

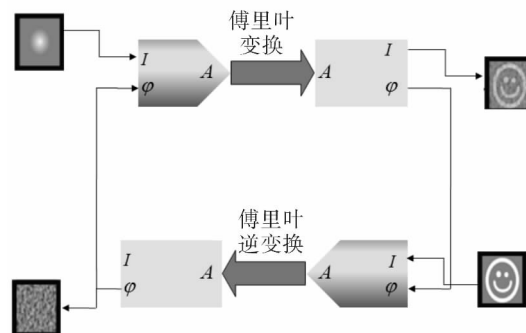


图 3 GS 算法原理图

Fig. 3 Principle diagram of GS algorithm

GS 算法是一种利用迭代寻找最优的算法,通过不断迭代运算,使得所得相位的输出十分接近乃至与期望图形完全相等。算法思想首先由高斯分布的输入光强和任意相位量组成复振幅进行傅里叶变换,将变换后的相位部分与期望图形的强度部分组合成新的复振幅,再进行傅里叶逆变换,然后将相位部分与入射的高斯光束再次组成新的复振幅,重复以上的步骤进行迭代,经过多次迭代实际输出的图像会逐渐接近期望图形。当误差小于设定的容许值,停止迭代并将 CGH 输出。利用此方法,可以得到期望的多光束数量和位置,并且能够对多光束能量均匀性进行实时优化。

纯相位式 SLM 加载 GS 算法产生的 CGH<sup>[20]</sup> 能实现多个衍射光栅叠加效果,产生多光束,图 4 给出了单束入射光经过反射式 SLM 后得到多光束的示意图。图中 SLM 加载不同算法生成 CGH,且 CGH 可看成是多个衍射光栅叠加而成,当单束光照射 SLM 时,因不同光栅的衍射角不同,使得单光束经过这些光栅后分成不同角度的多光束。不同的算法生成的 CGH 不同,将导致多光束位置及能量均匀性也有所差异,通过优化对比发现 GS 算法较好,因此在实验中采用此算法。

## 2 实验设备材料及原理

为了验证利用 SLM 实现多光束的可行性,

利用图 5 所示的原理图搭建了实验系统,实验中飞秒激光器采用的是美国相干公司生产的,型号为 Libra-HE,基本波长为 800 nm,具体参数如表 1 所示,SLM 为 Hamamatsu 生产的纯相位空间光调制器,型号为 X10468-02,具体参数如表 2 所示。光路采用 4f 系统,实验中由于加工位置的限制,在经过透镜 2 后的光路上放置一反射镜,改变光的出射方向,其焦距由两部分距离之和组成。显微物镜放大倍数采用 5 倍,数值孔径  $NA=0.09$ ,所加工的样品采用 PMMA 材料,PMMA 厚度约为 3 mm,加工前对材料侧面进行研磨和抛光处理,加工后用丙酮去除 PMMA 材料表面污垢,加工方式采用打孔的方式进行。利用高倍尼康显微镜聚焦到透明材料内部进行观察,得到了不同形状的图形。

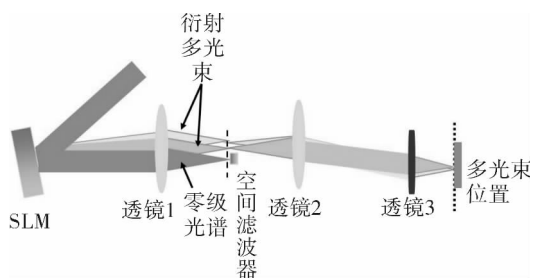


图 4 SLM 产生多光束示意图

Fig. 4 Principle diagram of generating multi-beam by SLM

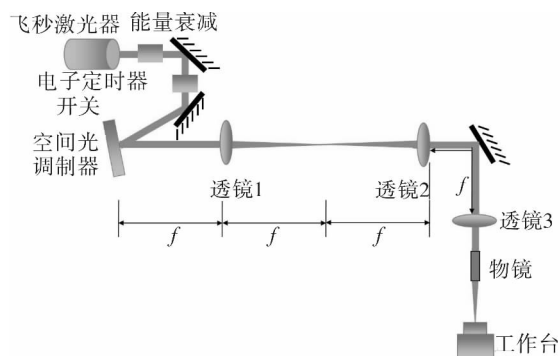


图 5 实验原理图

Fig. 5 Experiment schematic diagram

表 1 飞秒激光器主要参数

Table 1 Main parameters of femtosecond laser

| 参数                  | 数值   |
|---------------------|------|
| 平均输出功率/W            | 0~4  |
| 最大单脉冲能量/mJ          | 0.4  |
| 重复频率/kHz            | 10   |
| 脉冲宽度/fs             | 100  |
| 光束质量因子 $M^2$        | <1.3 |
| 光斑直径/ $\mu\text{m}$ | 8    |

表 2 Hamamatsu 空间光调制器主要参数

Table 2 Main parameters of Hamamatsu SLM

| 参数                                        | 数值               |
|-------------------------------------------|------------------|
| 像素/pixel                                  | 475 200(792×600) |
| 最大空间分辨率/ $\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ | 25               |
| 输入阶数/level                                | 256              |
| 像素间距/ $\mu\text{m}$                       | 20               |
| 有效面积/ $\text{mm}^2$                       | $16 \times 12$   |
| 读出光波长/nm                                  | $800 \pm 50$     |
| 光转换效率/%                                   | 95               |
| 帧速率/Hz                                    | 60               |

飞秒激光能量输出约为 4 W,能量衰减后以一定角度入射到 SLM 上,然后通过 4f 光学系统,减少零级光斑对加工的影响。通过精密电子定时器开关,控制激光作用时间,最后通过物镜聚焦到工作台上,对样品进行加工。而入射激光聚焦后能量密度必须超过其损伤阈值时,才能对材料造成损伤。实验中激光光斑直径大小一定,当激光单脉冲能量约为  $0.2 \mu\text{J}$  时,恰好出现不被损伤。加工过程中单光束单脉冲能量设置为  $0.35 \mu\text{J}$ ,定时器快门定时约 0.5 s,对于多光束,调整激光器输入能量,大致呈线性增加,并在 PMMA 试样中分别打出了“一”和“工”形的图案,并通过软件点对应位置与加工点位置的关系,可以精确控制多光束的位置。

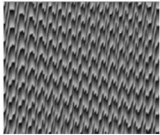
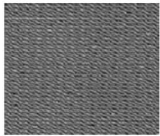
### 3 实验结果及分析

SLM 是一种适用于低功率的器件,其液晶分子容易损伤,本文实验采用型号为 X10468-02 的 SLM 可承受的最大能量约为 0.5 W,其对应的最大单脉冲能量为  $50 \mu\text{J}$ 。在飞秒激光微加工领域,一般单光束只需要几微焦( $\mu\text{J}$ )的脉冲能量,使得激光加工速度很慢,而且能量利用率很低。通过 SLM 可以实现几十条光束同时聚焦进行加工,可以极大地提高加工效率。进行加工实验时,先在 Labview 软件中利用 GS 算法根据目标图案(由多点组成)产生对应的 CGH,再将 CGH 加载到 SLM 中,当飞秒激光照射到 SLM 中,就可得到图案中多点对应的多光束,再利用显微物镜将这些多光束聚焦作用在工件上,就可实现一次加工复杂图案的目的。表 3 给出了在 PMMA 试样中,分别采取 20 mW 和 35 mW 的能量打出了 6 个点“一”和 10 个点“工”字型图案。对于不同的图案,只需

加载对应的全息图即可一次性实现。因实验中激光器的重复频率为 10 kHz,每幅图案采用 1 000 个脉冲,实际加工一幅图案的时间约 0.1 s。

表 3 实验结果图

Table 3 Experimental result

| 目标                                                                                | 全息图                                                                               | 实验结果                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
|  |  |  |

后续发现 Labview 软件界面上多光束的摆放位置对多光束均匀性影响非常大,单光束摆放位置不一样,其能量大小也不一样。实验结果中多光束能量不均匀,还需要优化算法,加入 CCD 相机采集图像进行反馈,形成闭环控制,得到能量更加均匀的多光束,此方法对于 SLM 多光束并行加工有一定的参考价值。

## 4 结论

运用飞秒激光,结合算法与 SLM 产生多光束的原理,提出了一种多光束并行加工的控制方法。采用 GS 算法对多光束能量均匀性进行优化,在 PMMA 内部打出了多点组合的“一”和“工”字型,通过此实例论证了多光束控制的准确性。该实验方案无需复杂的光路即可实现对多光束的控制,在 SLM 能量阈值范围内,可以实现任意形状的多光束控制,极大提高了飞秒微加工领域的能量利用率。

### 参考文献:

- [1] Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 1-12.  
夏博,姜澜,王素梅,等.飞秒激光微孔加工[J].中国激光,2013,40(2):1-12.
- [2] Chen Lie, Wang Jun, Liu Dun, et al. Experimental and mechanism analysis of holes drilling on rubber damping material using nanosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): 1-5.  
陈列,汪军,刘顿,等.橡胶阻尼材料纳秒激光打孔实验及机理分析[J].光学学报,2015,35(s2):1-5.
- [3] He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(5): 595-622.  
何飞,程亚.飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J].中国激光,2007,34(5):595-622.
- [4] Ni Xiaochang. Studies on theories and experiment in femtosecond laser micromachining[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003, 2-14.  
倪晓昌.飞秒激光微精细加工理论与实验研究[D].天津:天津大学,2003,2-14.
- [5] You Mu. Interaction of femtosecond laser pulses with transparent materials[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, 2005, 1-40.  
游牧.超短激光脉冲与透明介质相互作用[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2005,1-40.
- [6] Yu Benhai. Ablation and micromachining of dielectric with a femtosecond laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008, 13-30.  
余本海.飞秒激光对透明电介质材料的烧蚀与微加工研究[D].武汉:华中科技大学,2008,13-30.
- [7] Wang Jinli. Research on key technologies of holographic femtosecond laser parallel processing [D]. Hefei: Anhui University, 2013, 1-34.  
汪金礼.飞秒激光全息并行加工中若干关键问题研究[D].合肥:安徽大学,2013,1-34.
- [8] Liu Xiang. Research on power control technologies of multiple beams by using phase-only liquid crystal spatial light modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011, 3-102.  
刘翔.纯相位液晶空间光调制器的多光束光功率控制技术[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011,3-102.
- [9] Cao Weili, Xiao Shizhou, Guo Rui, et al. Parallel processing for femtosecond microfabrication [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2006, 4(2): 1-3.  
曹伟丽,肖诗洲,郭锐,等.飞秒激光双光子微细并行加工方法[J].纳米技术与精密工程,2006,4(2):115-117.
- [10] Efron U. Spatial light modulators and applications for optical information processing [J]. Projection Display Technology Systems and Applications, 1989: 416-423.
- [11] Grieve J A, Ulcinas A, Subramanian S, et al. Hands-on with optical tweezers: a multitouch interface for

- holographic optical trapping [J]. Optics Express, 2009,17(5):602-3595.
- [12] Sanner N, Huot N, Audouard E, et al. Direct ultra-fast laser micro-structuring of materials using programmable beam shaping[J]. Optics Lasers in Engineering, 2007,45(6):737-741.
- [13] Jesacher A, Booth M J. Parallel direct laser writing in three dimensions with spatially dependent aberration correction [J]. Optics Express, 2010, 18 (20): 21090-21099.
- [14] Dun Liu, Zheng Kuang, Walter Perrie, et al. High speed uniform parallel 3D refractive index micro-structuring of poly(methylmethacrylate) for volume phase gratings[J]. Applied Physics B Lasers and Optics, 2010,101(4):817-823.
- [15] Liu Dun, Perrie W, Zheng Kuang, et al. Multiple beam internal structuring of poly(methyl methacrylate)[J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2012,7(2):208-211.
- [16] Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters[J]. Acta Optica Sinica, 2010,30(11): 1-7.
- 樊叔维,周庆华,李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J]. 光学学报, 2010,30(11):1-7.
- [17] Zhou Jieyu, Lu Yaxiong, Wan Li, et al. An improvement on GS algorithm for design of computer optical elements[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007,18(10):1-4.
- 邹杰宇,卢亚雄,王俐等. GS 算法设计计算机光学元件的一种改进[J]. 光电子·激光, 2007,18(10):1-4.
- [18] Gao Yunshu. Research on diffraction effect of LC-SLM and its applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- 高云舒. 液晶空间光调制器的衍射特性及应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- [19] Zheng kuang, Liu Dun, Perrie W, et al. Diffractive multi-beam ultra-fast laser micro-processing using a spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(12):1-20.
- [20] Wang Hao, Bi Yong, Li Fang, et al. Enlargement technology of reconstructed image of computer generated hologram based on spatial light modulators [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013,40(3):1-4.
- 王皓,毕勇,丽芳,等. 基于空间光调制器的计算全息再现像放大技术[J]. 中国激光, 2013,40(3):1-4.