

飞秒激光全息加工光学系统搭建与分析

方致伟¹ 苏亚辉^{2,4} 汪超炜² 杨亮³ 汪金礼²

¹ 安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601; ² 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601
³ 中国科学技术大学工程科学学院精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026
⁴ 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 合理的光学系统设计及参数优化是飞秒激光全息并行加工系统功能实现的前提。在分析了飞秒激光全息并行加工系统光路设计要求的基础上, 对其中的两个关键点进行了较为深入的研究。采用能量利用率高的斜入射方式照射选用的空间光调制器, 得出了后续光路设计的关键参数; 通过光学理论推导出空间光调制器与两个透镜组成的 $4-f$ 系统中最佳光路参数, 利用 Zemax 软件对光路中系统孔径仿真, 验证了该方案的合理性; 搭建了一套合理高效的飞秒激光全息并行加工系统, 实现了 7 焦点阵列的微透镜和微齿轮并行加工。研究结果表明, 该光路设计方案可以实现高效的飞秒激光全息加工过程。

关键词 光学设计; 全息飞秒激光加工; 光学系统设计; 空间光调制器; Zemax

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0222002

Analysis and Set Up of Optical System for Holographic Femtosecond Laser Processing

Fang Zhiwei¹ Su Yahui^{2,4} Wang Chaowei² Yang Liang³ Wang Jinli²

¹ School of Physics, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

² School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

³ Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

⁴ Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of the Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China

Abstract Reasonable optimal system design and parameter optimization are prerequisite to achieve the functions of holographic femtosecond laser processing system. Based on the analyses of the requirements of the optical parameters of the holographic processing system, this paper makes an intensive study of the two key parameters. The oblique way which is more energy efficiency to irradiate the spatial light modulator is used to calculate the limiting conditions of the follow-up optical path design. Using the spatial light modulator and $4-f$ system which contain two lenses according to the demands of optical transmission, the optimal optical parameter design by deriving from the optical theory is given, and furthermore, the aperture simulation of the optical system with Zemax software identifies the rationality of the scheme. Finally, a reasonable holographic processing system is set up, and seven focus microlens arrays and micro gear parallel processing are achieved, respectively. Studies show that this optical design program can efficiently achieve the process of holographic femtosecond laser processing.

Key words optical design; holographic femtosecond laser processing; optical system design; spatial light modulator; Zemax

OCIS codes 220.4000; 220.2740; 320.7090; 320.2250

收稿日期: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51275502, 61377006)、安徽省高等学校自然科学基金重点项目(KJ2011A014)、安徽省自然科学基金(1308085ME76)、安徽大学大学生科研训练计划

作者简介: 方致伟(1990—), 男, 本科生, 主要从事基于傅里叶全息的微纳加工方面的研究。E-mail: 1175283341@qq.com

导师简介: 苏亚辉(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事飞秒激光加工技术、全息技术、光存储等方面的研究。

E-mail: ustcsyh@ahu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

飞秒激光加工技术^[1-7]具有分辨率高(百纳米)、热影响小、真三维等优点,在机械、光学、生物和其他复杂三维微纳功能器件加工中得到广泛应用。然而,串行加工的低效率妨碍了该技术的进一步发展。为了提高加工效率,研究者们^[8]提出将微透镜阵列引入到飞秒激光加工系统中的并行方法,但这一方法仅仅适合加工固定周期的微结构。相似地,研究者们^[9]利用衍射光学元件将激光分束聚焦的多光束方法实现并行加工,由于单一衍射光学元件的固定性使得加工的微结构不能灵活调控。因此,设计一个灵活可控和任意结构高效加工的飞秒激光并行加工系统势在必行。

随着空间光调制器(SLM)技术的发展,将SLM^[10-17]引入飞秒激光加工系统中,通过SLM加载计算全息图(CGH)调制飞秒激光形成多光束,然后通过光学系统传输再紧聚焦到材料内部,最终实现多焦点阵列或者图案式并行加工。焦点的数量和分布情况以及单一焦点的能量分布等可以灵活控

制,这也使得这一技术呈现明显优势。然而,与在很多方面已经被广泛研究的单一聚焦的飞秒激光加工光学系统相比,引入SLM的全息加工系统仍然没有被详细论述。因此,针对飞秒激光全息加工系统,本文旨在研究其中的光路参数优化设计,给出一套合理高效的全息加工光路系统。

2 全息加工系统

图1为飞秒激光全息并行加工系统结构示意图。飞秒激光能量可以通过半波片和格兰泰勒棱镜组成的脉冲能量控制单元调制,扩束镜扩束后,经过光闸开关,然后照射到SLM,加载CGH到SLM上调制飞秒激光,其后再经过一全反射镜,在傅里叶透镜lens1的变换面P面位置形成多焦点阵列,在P面滤除零级光等干扰,其中lens1和lens2组成望远镜系统,故经过透镜lens2缩束后,多焦点阵列的光束进入显微镜系统中,经过物镜聚焦在样品内部实现全息并行加工。

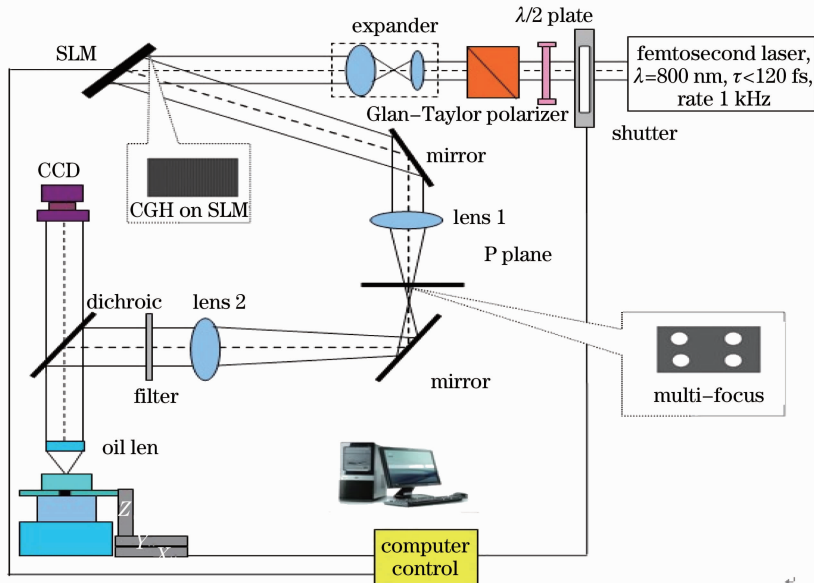


图1 飞秒激光全息并行加工系统

Fig. 1 Diagram of holographic femtosecond laser parallel processing system

该光学系统应该满足下面几点要求:

- 1) 为了提高飞秒激光的利用率,应该使得更多的飞秒激光用于最终的加工。
- 2) 从SLM到显微镜物镜出瞳应该防止由于衍射角造成的光傅里叶分量高频部分的渐晕现象。
- 3) 为了更加有效地利用SLM的整个区域,多焦点图案的调制范围应该缩小以匹配物镜孔径限制。

- 4) 从lens2出射的光束必须是平行光束,只有平行光束入射这种无限远校正的显微镜物镜系统才能实现正确的加工,这也是lens1和lens2采用望远镜系统的原因,其优势在于增加的光学元件,如荧光滤光片或者偏振片,可以放置在平行光线传播的光路上,实现焦斑和像差校正。

扩束镜和显微镜系统采用商用化的产品,对其光学系统设计不深入研究。本文主要关注系统中两

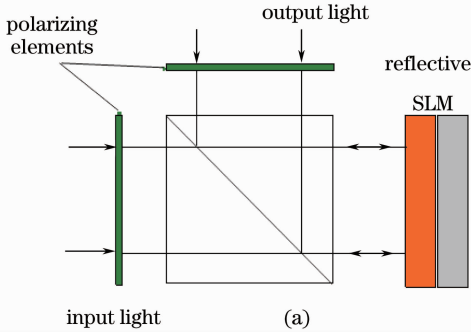
个方面的设计: 1) 光照射 SLM 方式的选择, 2) lens1 和 lens2 组成的望远镜系统部分光路设计。

3 光路设计过程

3.1 光照射 SLM 方式

实验中采用的是硅基液晶反射式 SLM, 光照射 SLM 的方式有如图 2 所示的两种方式:

1) 通过分光板垂直光轴入射 SLM 的照射方式, 如图 2(a) 所示, 但是这种方式直接损失了入射飞秒激光 75% 的能量, 因此, 舍弃了这种方式;



2) 采用小角度斜入射 SLM 的照射方式, 这种方式不会直接损失入射飞秒激光能量, 故采用这种方式进行照射, 如图 2(b) 所示。这样在设计光路时存在一个分离入射光和出射光的 lens1 到 SLM 的最小距离:

$$d_{1 \min} = \frac{\rho_{\text{SLM}}}{2 \tan \theta}, \quad (1)$$

式中 ρ_{SLM} 和 θ 分别表示 SLM 的有效直径 (更严格地说若 SLM 活动区域为方形, 则为活动区域边长) 和斜入射角度。

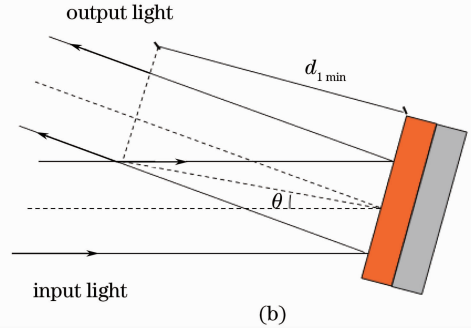


图 2 反射式 SLM 的几何光路。(a) 通过分光板; (b) 小角度斜入射

Fig. 2 Geometry in a reflective SLM. (a) With a beam-splitter; (b) by tilting the SLM

针对本文的 SLM, 设计要求入射角 $\theta < 5^\circ$, 以 $\theta = 2.5^\circ$ 为例进行说明, 因为 $\rho_{\text{SLM}} \approx 8.6 \text{ mm}$, 所以 $d_{1 \min} \approx 98 \text{ mm}$ 。因此, 若搭建 $4-f$ 系统, 透镜 Lens1 的焦距 f_1 不能小于 $d_{1 \min}$ 。

3.2 lens1 和 lens2 组成的望远镜系统

首先, 减小渐晕现象对系统的影响, 在选择 lens1 和 lens2 时, 应该选择直径较大、衍射角相对较小的透镜组, 与此同时, 还需满足一定的放大率, 使得多焦点图案在尺寸上满足显微镜系统孔径要求。其次, 分析望远镜系统光路, 放置 SLM 在最合适的位置, 构建光路传输系统。

望远镜系统成像的光线追迹图, 如图 3 所示。按照望远镜系统的要求, d_1 是 SLM 到 lens1 的距离, d_2 是 lens2 到物镜的出瞳之间的距离。lens1 和 lens2 之间的距离等于两者的焦距之和, 即 $d = f_1 + f_2$, 其中 f_1 为 lens1 的焦距, f_2 为 lens2 的焦距。

因此, 此望远镜系统成像的放大率为

$$M = |y'/y| = f_2/f_1, \quad (2)$$

又因为

$$d_2 = -d_1 M^2 + f_1 M(1 + M), \quad (3)$$

所以从 SLM 到物镜的孔径总长度为

$$L = d_1 + f_1 + d_2 + f_2 = d_1(1 - M^2) + f_1(1 + M)^2. \quad (4)$$

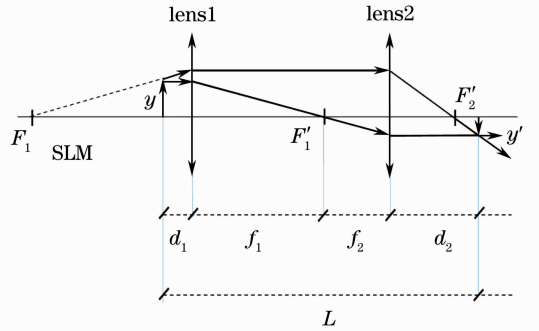


图 3 望远镜系统成像示意图

Fig. 3 Image diagram of the telescope system

$4-f$ 系统是最常见的望远镜系统, 此时 SLM 放置在 lens1 的前焦面上, 即 $d_1 = f_1$, Zemax 软件仿真结果如图 4(b) 所示, 从而成像面在 lens2 的后焦面上, 即 $d_2 = f_2$, 故有:

$$L = 2f_1(1 + M), \quad (5)$$

当然, 还可以将 SLM 放置在距离 lens1 位置 d_1 小于焦距 f_1 处或者放置在离 lens1 前方距离 d_1 大于焦距 f_1 位置, 如图 4(a) 和 (c) 所示。

通过望远镜系统的系统孔径来进一步分析^[18]:

假设望远镜系统中 lens1 和 lens2 的入瞳直径分别为 ρ_1 和 ρ_2 , 且 $\rho_1 \geq \rho_2$, 由于设计的望远镜系统是缩束的, 因此, 这种假设是有效的。在 $d_1 > f_1$ 和

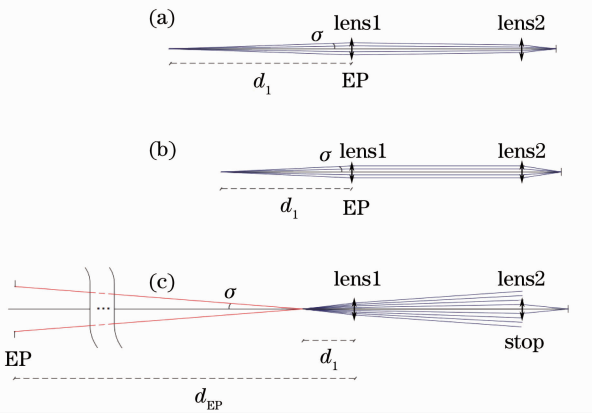


图 4 不同 SLM 放置位置的光线追迹示意图。(a) $d_1 > f_1$; (b) $d_1 = f_1$; (c) $d_1 < f_1$, (EP 表示的是整个系统的入瞳)

Fig. 4 Ray tracing showing the different positions of the SLM. (a) $d_1 > f_1$; (b) $d_1 = f_1$; (c) $d_1 < f_1$. (EP represents entrance pupil of the whole system)

$d_1 = f_1$ 的情况下, lens1 既是系统孔径也是系统入瞳, 所以, 系统入瞳到 lens1 的间距为 $d_{EP} = 0$, 如图 4(a) 和 (b) 所示。瞳孔直径 $\rho_{EP} = \rho_1$ 。然而, 当 $d_1 < f_1$ 时, lens2 成为了系统孔径, 系统入瞳出现在 lens1 的左边, 距离 lens1 的大小为

$$d_{EP} = f_1 \frac{1+M}{M}, \quad (6)$$

此时, 入瞳直径为

$$\rho_{EP} = \rho_2/M, \quad (7)$$

所以, 系统孔径 $\sin \sigma$ 为

$$\sin \sigma = \frac{\rho_{EP}/2}{\sqrt{(\rho_{EP}/2)^2 + (d_{EP} - d_1)^2}} = \begin{cases} \frac{\rho_1/2}{\sqrt{(\rho_1/2)^2 + d_1^2}}, & (d_1 \geq f_1) \\ \frac{\rho_2/M}{\sqrt{(\rho_2/2M)^2 + \left(f_1 \frac{1+M}{M} - d_1\right)^2}}, & (d_1 < f_1) \end{cases} \quad (8)$$

由(8)式可知 $\sin \sigma$ 在 $d_1 = f_1$ 时取得最大值, 有:

$$\sin \sigma = \frac{\rho_1/2}{\sqrt{(\rho_1/2)^2 + f_1^2}} \quad (9)$$

即当 SLM 放置在 lens1 的前焦面上组成 4-f 系统时, 有最大通光效率, 这是预期的光路设计。因此, 在最终的光学系统搭建中采用了 4-f 系统的设计方案。

4 全息加工

经过上述分析, 采用 SLM 斜入射方式以及其与

lens1 和 lens2 组成的 4-f 系统光路方案, 如图 1 所示。实验中飞秒激光光源为相干公司的 Chameleon 设备, 其脉宽为 75 fs、重复频率为 80 MHz、中心波长为 800 nm。激光能量经过调制后, 入射到加载了 CGH 的 SLM 上, 再经过 lens1 和 lens2 组成的 4-f 系统滤除零级光和其他级次杂散光, 然后再导入显微镜系统, 多焦点光束在物镜(数值孔径 $NA=1.25$)焦面聚焦在 SU-8 光刻胶内部, 再配合三维移动平台移动, 从而分别实现了 7 个微透镜[如图 5(a)所示]和 7 个微齿轮[如图 5(b)所示]的同时并行加工, 微透镜和微齿轮的直径均为 $20 \mu\text{m}$ 。其中, CGH 是通过 GS 算法运算在 SLM 一级衍射像位置(即图 1 中 P 面上)生成高一致性的 7 焦点阵列; lens1 和 lens2 的焦距和直径分别为 500 mm、60 mm 和 200 mm、50.8 mm。

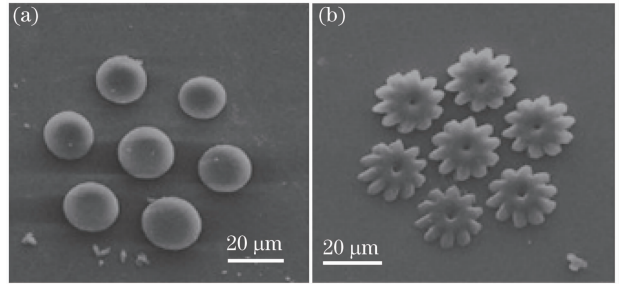


图 5 七焦点加工结果。(a)微透镜;(b)微齿轮
Fig. 5 7-focus array fabrication. (a) Micro lenses; (b) micro gears

5 结 论

将 SLM 与传统飞秒激光加工系统相结合, 设计并搭建了飞秒激光全息并行加工系统。为了提高能量利用率, 选用 SLM 小角度斜入射方案, 计算出后续光路设计的关键参数; 通过光学理论推导分析和 Zemax 仿真对光路中的关键参数设计进行了较为详细的论述, 确定了选用 SLM 与 lens1 和 lens2 组成的 4-f 系统光学系统。该系统实现了 7 个微透镜和微齿轮的并行加工。

参 考 文 献

- Zhang Y L, Chen Q D, Xia H, *et al.*. Designable 3D nanofabrication by femtosecond laser direct writing [J]. *Nano Today*, 2010, 5(5): 435-448.
- Sun Siming, Sun Yunlu, Liu Dongxu, *et al.*. Protein functional devices manufactured by femtosecond laser direct writing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080003. 孙思明, 孙允陆, 刘东旭, 等. 飞秒激光直写制备蛋白质功能化器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080003.
- Guo R, Li Z, Jiang Z, *et al.*. Log-pile photonic crystal fabricated by two-photon photopolymerization [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(8): 396.

- 4 Guo R, Xiao S, Zhai X, *et al.*. Micro lens fabrication by means of femtosecond two photon photopolymerization [J]. *Opt Express*, 2006, 14(2): 810–816.
- 5 Ostendorf A, Chinkov B N. Two-photon polymerization: a new approach to micromachining-femtosecond lasers enable microfabrication with resolution beyond the diffraction limit [J]. *Photonics Spectra*, 2006, 40(10): 72–81.
- 6 Ding J, Zhai Z, He J, *et al.*. Micro device mould fabrication based on two-photon polymerization and electroforming [C]. *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 2010 5th IEEE International Conference, 2010: 1074–1078.
- 7 Wei Di, Cheng Ping, Chen Xiangdong, *et al.*. Study on femtosecond laser processing of nonmetal vascular stent [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 091403.
位迪, 程萍, 陈向东, 等. 基于飞秒激光加工非金属血管支架的工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 091403.
- 8 Kato J, Takeyasu N, Adachi Y, *et al.*. Multiple-spot parallel processing for laser micronanofabrication [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(4): 044102.
- 9 Dong X Z, Zhao Z S, Duan X M. Micronanofabrication of assembled three-dimensional microstructures by designable multiple beams multiphoton processing [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(12): 124103.
- 10 Hayasaki Y, Sugimoto T, Takita A, *et al.*. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(3): 031101.
- 11 Hasegawa S, Hayasaki Y. Adaptive optimization of a hologram in holographic femtosecond laser processing system [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(1): 22–24.
- 12 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.
- 13 Sakakura M, Sawano T, Shimotsuma Y, *et al.*. Improved phase hologram design for generating symmetric light spots and its application for laser writing of waveguides [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(7): 1065–1067.
- 14 Lin H, Jia B, Gu M. Dynamic generation of Debye diffraction-limited multifocal arrays for direct laser printing nanofabrication [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(3): 406–408.
- 15 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.
- 16 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
沈川, 张成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
- 17 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514001.
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514001.
- 18 Martín-Badosa E, Montes-Usategui M, Carnicer A, *et al.*. Design strategies for optimizing holographic optical tweezers setups [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, 9(8): S267.

栏目编辑：张腾