

曲面基底衍射光学元件的激光直写技术

姜 俊¹, 刘晋桥², 徐 颖^{1*}, 于颜豪¹

¹ 吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012;

² 西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

摘要 飞秒激光直写技术(FsLDW)因其优异的三维加工能力、高空间分辨率、低附加损伤等优点被广泛地应用于微纳加工领域,但传统飞秒激光直写技术在加工效率、加工面积和加工精度之间存在矛盾。为了实现高速、大面积、高精度的激光微纳加工,构建了一种由大范围水平位移台和高速旋转台组成的极坐标系飞秒激光直写系统。基于该系统,研究了轴对称样品中心对准方法及曲面曲率校准方法,并在曲面上制备了多阶三维结构。最终完成了在透镜曲面上制备直径为 10 mm 的衍射圆光栅结构,实现了飞秒激光高速、大尺寸、高精度地制备大面积三维结构。该研究为高性能折衍混合光学元件的制备提供了有力的技术支持。

关键词 激光光学; 衍射光学元件; 飞秒激光直写; 极坐标系扫描

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0602002

Laser Direct Writing Technique of Diffraction Optical Element on Curved-Surface Substrate

Jiang Jun¹, Liu Jinqiao², Xu Ying¹, Yu Yanhao¹

¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

² School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Femtosecond laser direct writing (FsLDW) has been widely applied in the field of micro-nano fabrication for its advantages such as excellent three-dimensional processing ability, high spatial resolution and low additional damage. However, there are contradictions between machining efficiency, machining area and machining accuracy in the conventional FsLDW. In order to realize high speed, large area and high precision in the process of laser micro-nano fabrication, we have built a new FsLDW system based on polar coordinates, which is composed of large scale horizontal linear stages and high speed rotary stage. The approaches for the alignment of axisymmetric sample's center and the calibration of surface curvature have been investigated based on the proposed system, and a multilevel three-dimensional structure has been fabricated on a curved surface. Finally, a diffractive circle grating structure with diameter of 10 mm has been fabricated on curved surface of the lens, and the femtosecond laser fabrication of large area three-dimensional structure with high speed, large scale and high precision has been realized. The research provides strong technical support for the fabrication of high performance hybrid refractive-diffractive optical element.

Key words laser optics; diffractive optical elements; femtosecond laser direct writing; polar coordinate scanning

OCIS codes 140.3390; 320.2250; 350.3950

收稿日期: 2017-01-10; 收到修改稿日期: 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(91423102, 91323301, 61605055, 21473076)

作者简介: 姜 俊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事极坐标飞秒激光加工方面的研究。

E-mail: jiangjun716@foxmail.com

导师简介: 于颜豪(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事激光微纳加工方面的研究。E-mail: yu_yanhao@163.com

* 通信联系人。E-mail: xuying1969@hotmail.com

1 引言

衍射光学元件因其体积小、质量轻等优点而被广泛应用于航空航天、国防军事、激光技术等领域^[1-4]。目前衍射光学元件的制作方法主要有单点金刚石车削^[5]、光刻^[6]与激光直写^[7-8]等方法。其中,单点金刚石车削元件相位轮廓易受金刚石刀具形状的限制;光刻技术存在无法在曲面基底上加工的局限性;而激光直写技术以其无掩膜、高空间分辨率等优势被越来越多地应用于微加工领域^[9-10]。相较于普通激光直写技术,飞秒激光直写技术具有更高的空间分辨率和真三维加工能力,因此具有更广泛的应用前景^[11-17]。

目前飞秒激光直写技术主要有三种:一是基于压电平台的飞秒激光直写技术^[18-19],该技术加工精度高,但加工效率低,且可加工器件的尺寸通常不超过百微米量级;二是基于扫描振镜的飞秒激光直写技术^[20-21],该技术在聚焦透镜的范围与数值孔径之间存在矛盾,加工尺寸和加工精度不可兼得;三是基于直线电机线性扫描的飞秒激光直写技术^[22-24],该技术加工范围大,但其运动过程中需要克服惯性频繁地加速、减速,这种运动方式使该系统加工效率低下。

为了解决衍射光学元件加工过程中加工范围、加工精度以及加工效率之间的矛盾,本课题组搭建了同时具备大面积、高精度和高效率加工特点的极坐标飞秒激光直写系统。该系统由两部正交的直线位移台和一部高速旋转台组成,系统的加工范围仅受扫描径向直线位移台行程的限制,可以完成厘米量级的大范围结构加工。系统的移动采用光栅尺进行闭环负反馈控制,其重复定位精度优于 50 nm,保证了加工精度。系统旋转轴可连续高速旋转,不必频繁启停,使系统拥有极高的加工效率。本文基于该系统进行了曲面上大尺寸三维结构加工的研究,讨论了激光直写光轴、转台旋转轴与样品旋转中心对称轴的对准、透镜曲率校准等问题,最终在透镜曲面上制作得到了直径为 10 mm 的衍射光栅结构。

2 实验设备与实验条件

2.1 极坐标飞秒激光直写系统

图 1 为极坐标飞秒激光直写系统的示意图,加工系统采用中心波长为 800 nm 的飞秒激光作为光源 (Spectra-Physics Tsunami, 重复频率为 80 MHz, 脉冲宽度为 120 fs), 激光发出后首先透射圆形渐变中性密度滤光片 (汇博光学, CVND20-B60C), 旋转滤光片可调节激光透射比从而控制激光加工功率。经过滤光片后的激光到达声光调制器 (Gooch & Housego, 23080-3-85-LTD), 声光调制器根据系统高速旋转台控制器发出的信号自动开关, 实现对光开关的精准控制。而后, 由两个平凸透镜组成的透镜组对激光光束进行扩束, 两个平凸透镜的焦距分别为 60 mm 与 150 mm, 两者间的距离为两个透镜焦距之和, 即 210 mm。扩束后的激光由物镜 (OLYMPUS MPlanFLN 100 \times , 数值孔径 $NA=0.9$, 工作距离 $D=1$ mm) 聚焦到样品表面。样品通过样品夹具固定在旋转台 (旋转轴用 A 表示) 上, 使样品的一个平面紧贴转台表面, 并随着转台一起高速旋转, 配合水平方向上 X 轴和 Y 轴的平移可实现对样品的高速扫描。其中水平位移台的重复定位精度优

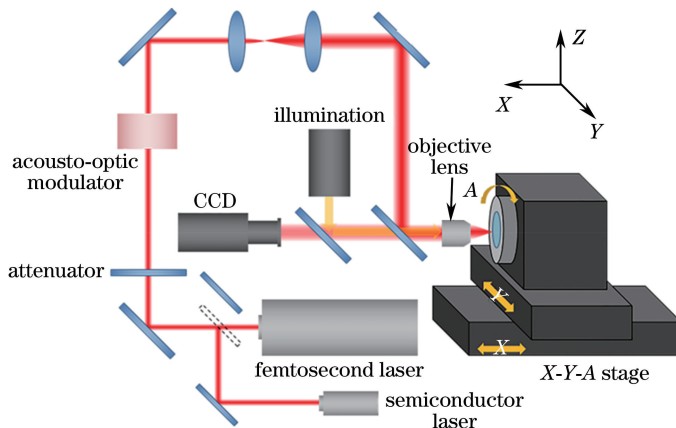


图 1 极坐标飞秒激光直写系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polar-coordinate femtosecond laser direct writing system

于 50 nm, 旋转台的角度定位精度优于 $2''$, 旋转过程中其轴向跳动小于 100 nm, 径向跳动小于 150 nm。调试及加工过程可通过照明光配合 50/50 分光镜用电荷耦合器件 (CCD) 在电脑屏幕上观察。系统采用波长为 808 nm 的半导体激光器作为样品调试辅助光源。

2.2 样品制作

实验所选取的加工基底是直径为 25.4 mm 的光学窗口和平凸透镜, 材料为 K9 玻璃, 平凸透镜的焦距为 200 mm。以光学窗口的处理为例, 首先把光学窗口放入丙酮溶液中超声清洗 15 min, 取出后再放入无水乙醇中超声清洗 15 min, 清洗结束后取出光学窗口, 用去离子水冲洗并吹干。将清洗吹干后的光学窗口在氧气气氛下等离子处理 6 min 以增强其表面活性。将光学窗口放置于匀胶机的片托上, 用匀胶机在其表面上 (平凸透镜则涂在其曲面上) 旋涂 SU-8 2025 光刻胶, 以 5000 r/min 的速度旋涂 30 s。最后将旋涂好光刻胶的样片放入 95 °C 烘箱中避光前烘 60 min。

3 实验结果与讨论

3.1 平面上大尺寸三维结构的加工

为了得到合适的加工条件 (包括激光功率和扫描线速度), 首先在平面上进行了圆光栅结构的扫描, 测试了不同激光功率和扫描线速度下的加工效果。当激光功率过小或扫描线速度过快时, SU-8 光刻胶不能有效地进行双光子聚合。当激光功率过大或扫描线速度过慢时, 在扫描过程中光刻胶过曝光形成坏点。最终, 通过多组实验调试, 在激光功率为 15 mW (加工物镜后测得)、扫描线速度为 1 mm/s 的加工条件下扫描约 4 min 得到了如图 2 (a) 所示的圆光栅。图 2 (a) 为圆光栅在激光扫描共聚焦显微镜 (LSCM, OLYMPUSOLS4100) 下的三维图。图中圆光栅的周期为 20 μm 。从图 2 (a) 可以看出, 光栅整体结构分布均匀、排列整齐、光栅均匀性良好。图 2 (b) 显示了每条光栅良好的均匀性, 经测量, 每条光栅的高度和宽度都约为 1 μm 。由此可以得出, 利用极坐标飞秒激光直写系统扫描 SU-8 光刻胶, 系统的空间分辨率至少达到了 1 μm 。值得注意的是, 在圆光栅的扫描过程中, 本课题组特意适当增加了扫描激光功率、降低了扫描线速度, 这样可以得到更粗的线条, 以便于显影后线条能够较好地附着在衬底表面。在扫描三维结构过程中采用逐层填充的方式, 降低激光功率、加快扫描线速度后, 扫描 SU-8 光刻胶时系统能够达到更高的空间分辨率。

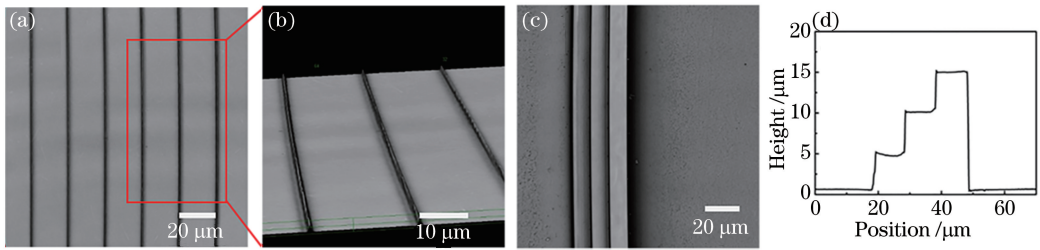


图 2 圆光栅结构的 (a) 俯视图和 (b) 三维图; (c) 平面大尺寸台阶结构的激光扫描共聚焦显微镜图; (d) 台阶结构剖面图
Fig. 2 (a) Top view and (b) three-dimensional image of circular grating structure; (c) LSCM image of large size step structure on flat surface; (d) cross-section of the step structure

通过前面的实验得到了该系统加工 SU-8 光刻胶时的参数, 利用这些参数在光学窗口平面上制作大尺寸三维结构。然后设计了一个 4 阶台阶结构进行加工, 每一台阶高为 5 μm 、宽为 10 μm 。结构在高度方向上被分为若干层, 通过逐层扫描填充的方式完成结构的扫描。为了保证高速加工的效率, 每一层的扫描轨迹都采用螺旋方式, 这样可以使在单层扫描过程中激光始终处于有效的加工状态, 并且可使转台始终保持高速旋转。

通过逐层填充结合螺旋扫描的方式, 扫描约 30 min, 在光学窗口平面上得到了如图 2 (c) 所示的台阶结构, 该结构最大直径为 10 mm, 图 2 (d) 为该结构剖面图。图中台阶结构的扫描激光功率为 13 mW, 扫描线速度为 20 mm/s。从图中可以清楚地看到加工得到的台阶结构完整、轮廓清晰, 台阶高度和宽度都符合设计值。对比扫描圆光栅的扫描参数, 在使用逐层填充的方式下, 加工三维结构的扫描速度提高到了 20 mm/s。

以上实验结果表明,使用极坐标飞秒激光直写系统在平面上进行大尺寸结构加工时,空间分辨率至少达到了 $1\ \mu\text{m}$ 、可加工结构的尺寸达到了 $10\ \text{mm}$;在合适的激光功率下,其扫描线速度可以达到 $20\ \text{mm/s}$,虽然此扫描速度仍然受到激光器输出功率及材料自身双光子吸收系数的限制,但还是超过了以往的飞秒激光直写系统(通常为每秒若干毫米,甚至不足 $1\ \text{mm/s}$)^[25]。该系统实现了高精度、大尺寸、高速度的飞秒激光直写,解决了压电扫描、振镜扫描及直线电机线性扫描在上述三者间的矛盾。

3.2 曲面上大尺寸三维结构的加工

利用极坐标飞秒激光直写系统,不仅可以在平面上加工大尺寸三维结构,使用中心对准夹具,还可以在曲面上加工大尺寸三维结构。为了扫描得到精确的设计结构,使用基于极坐标飞秒激光直写系统,在进行曲面扫描之前必须要进行激光直写光轴、转台旋转轴及样品旋转中心轴三个轴的中心对准,否则在曲面扫描过程中激光焦点会偏离样品表面,使得无法准确扫描得到所设计的结构。为此本课题组设计并且制作了如图 3(a)所示的中心对准夹具。夹具整体固定在转台上,3个可调节伸缩的螺纹副互成 120° 固定在夹具上,样品放置在夹具中心,通过调节3个螺纹副即可调整样品相对于转台的位置。转台旋转时通过 CCD 观察激光光斑的变化情况,根据光斑变化情况调整样片位置,经计算后可知调整后样品中心对准的精度可达 $0.5\ \mu\text{m}$ 。调整过程中需要打开激光通过 CCD 进行观察,为了防止光刻胶在调整过程中被曝光,使用了半导体激光器作为光源,半导体激光器所发出激光的波长为 $808\ \text{nm}$,和扫描时所使用的中心波长为 $800\ \text{nm}$ 的飞秒激光波长相近,通过这种方法既保证了调整精度又避免了光刻胶被曝光。

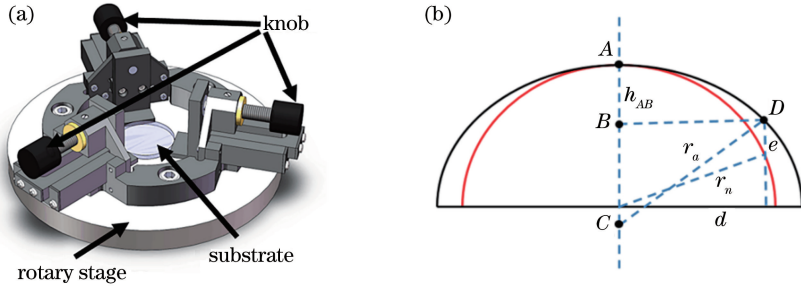


图 3 (a)中心对准样品夹具和(b)曲率半径校准示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of (a) center-aligned sample clamp and (b) curvature radius calibration

曲面激光直写与平面激光直写最主要的差异是在曲面扫描过程中,样品的平移会使激光焦点偏离样品表面,造成激光无法有效地对样品进行扫描。为了使激光焦点跟随样品表面,在平移过程中样品必须在高度方向上进行对应的移动。为了解决这个问题,本课题组把样品表面的形貌数据添加到加工数据当中,系统根据加工数据在高度方向上移动,可以自动完成激光焦点对样品表面的追踪。

在实际实验中,发现商用平凸透镜的真实曲率半径和标称曲率半径存在一定的误差。如图 3(b)所示, r_n 为透镜标称曲率半径, r_a 为实际曲率半径, d 为水平方向上激光焦点到样品中心轴的距离, e 为在 d 距离下透镜表面高度实际值与标称值的差值, h_{AB} 为 A 点到 B 点的距离。这样可以通过透镜在 d 距离下的实际高度减去计算得到的标称高度得到 e 的值。根据三角函数可得

$$h_{AB} = r_n - (e + \sqrt{r_n^2 - d^2}), \quad (1)$$

在直角三角形 BCD 中,有

$$r_a^2 = (r_a - h_{AB})^2 + d^2. \quad (2)$$

联立(1)式和(2)式解方程组可得实际曲率半径 r_a 。以上计算中假设了真实曲率半径大于标称曲率半径,当真实曲率半径小于标称曲率半径时,也可以通过类似的计算得出真实曲率半径。实际测量并计算后发现,对于标称曲率半径为 $103.66\ \text{mm}$ 、焦距为 $200\ \text{mm}$ 的透镜,当其真实曲率半径与实际曲率半径的差值为 $9\ \mu\text{m}$; d 值达到 $5\ \text{mm}$ 时,标称高度和实际高度的差值 e 可达到 $1.3\ \mu\text{m}$,这个结果反映了在进行亚微米精度扫描过程中曲率校准的必要性。

通过上述方法,在焦距为 $200\ \text{mm}$ 的平凸透镜曲面上,扫描约 $35\ \text{min}$,得到了如图 4(a)所示的台阶结构,图 4(a)为样品在激光扫描共聚焦显微镜下的俯视图,图 4(b)为其剖面图,每一阶台阶宽为 $4\ \mu\text{m}$ 、高为

2.5 μm , 整体结构最大直径为 10 mm, 从图 4(a)~(b) 可以看到, 在曲面上加工得到的台阶结构完整、轮廓清晰, 展示了该系统在曲面上加工三维结构的能力。

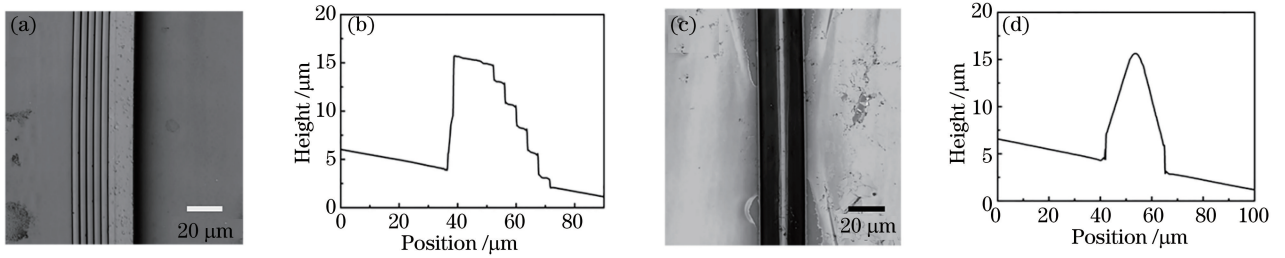


图 4 曲面上台阶结构的(a)激光扫描共聚焦显微镜图和(b)剖面图;(c)曲面上平滑结构激光扫描共聚焦显微镜图和(b)剖面图

Fig. 4 (a) LSCM image and (b) cross-section image of step structure on curved surface; (c) LSCM image and (d) cross section image of smoothness structure on curved surface

使用极坐标飞秒激光直写系统, 通过上述方法, 不仅能在曲面上扫描得到如图 4(a) 所示的台阶状三维结构, 通过调整扫描数据, 缩小每一阶台阶的宽度和高度, 当台阶宽度和高度足够小时, 系统能在曲面上加工得到表面为连续曲面的如图 4(c) 所示的三维结构。图 4(c) 为样品在激光扫描共聚焦显微镜下的俯视图, 图 4(d) 为其剖面图, 整体结构呈山脊形, 是一直径为 10 mm 的环带, 该结构的扫描时间约为 10 min。从图中可以看出结构轮廓清晰、表面平滑, 展示了该系统加工表面为连续曲面三维结构的能力。

因此, 通过对直写光轴、转台旋转轴与样品旋转中心对称轴进行三轴对准, 以及对透镜曲率进行校准, 本课题组在平凸透镜的曲面上实现了大尺寸、表面为连续曲面的三维结构制备, 克服了传统光刻套刻技术难以在曲面上进行微结构以及连续曲面结构制备的困难。

3.3 曲面上大面积衍射光学元件的制备

利用这套加工系统, 通过上述的三轴对准, 以及透镜曲率校准, 在焦距为 200 mm 的平凸透镜曲面上制备了直径为 10 mm、周期为 5 μm 的圆光栅衍射结构, 如图 5(a) 所示, 该结构的扫描时间约为 45 min。结构对照明光产生衍射, 显示出了明显的彩虹色。利用激光扫描共聚焦显微镜观察加工结构的细节如图 5(b) 所示, 可以发现激光扫描得到的光栅线条结构均匀完整。利用波长为 532 nm 的激光照射上述衍射结构, 在接收光屏上得到了如图 5(c) 所示的衍射图案。

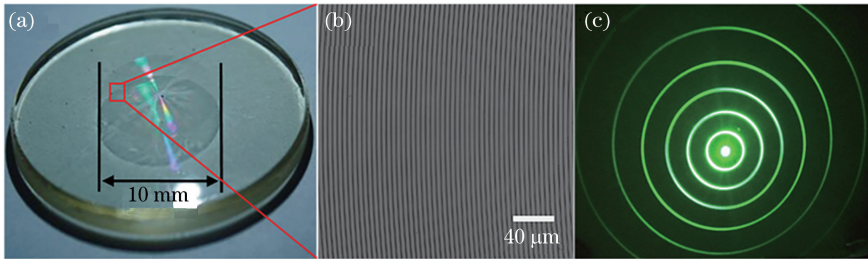


图 5 (a) 透镜曲面上圆光栅实物照片;(b)圆光栅的激光扫描共聚焦显微镜照片;(c)在接收光屏上得到的衍射图案

Fig. 5 (a) Image of the circular grating on curved surface of the lens; (b) LSCM image of the circular grating; (c) diffraction pattern on the receiving screen

4 结 论

本课题组构建了基于极坐标系的大尺寸、高精度、高速飞秒激光直写系统, 解决了压电扫描、振镜扫描及直线电机线性扫描在加工面积、加工精度以及加工效率三者间的矛盾。采用直写光轴、转台旋转轴与样品旋转中心对称轴三轴对准, 以及透镜曲率校准的方法, 在曲面上完成了多阶三维结构制备, 克服了传统光刻技术在曲面上制备多阶元件的困难。并且采用该技术在折射元件上实现衍射结构的制备, 为高性能折衍混合光学元件的制备提供了一种新的技术方案。

参 考 文 献

- [1] Smith J G, Ramosizquierdo L, Stockham A. Diffractive optics for moon topography mapping[C]. SPIE, 2006, 6223: 622304.
- [2] Sun Yanjun, Leng Yanbing, Dong Lianhe. Study on antireflective relief periodic structure of sapphire infrared window [J]. Infrared Technology, 2011, 33(2): 92-95.
孙艳军, 冷雁冰, 董连和. 蓝宝石红外窗口抗反射浮雕结构研究[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 92-95.
- [3] Liu Bo, Li Song. Application of binary optical element in satellite laser altimeters [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003, 14(1): 102-104.
刘 博, 李 松. 二元光学元件在星载激光测高仪中的应用[J]. 光电子 • 激光, 2003, 14(1): 102-104.
- [4] Zhao Xiang, Zhang Peng, Luo Jinping. Application of low-light night-vision objective lens with double-layer diffractive optical element [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 112203.
赵 翔, 张 鹏, 罗金平. 双层衍射光学元件在微光夜视物镜中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 112203.
- [5] Liang Xu, Wang Junhua, Xu Min, *et al.* Single-point diamond turning and testing of hybrid diffractive-refractive optical lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(3): 032203.
梁 旭, 王军华, 徐 敏, 等. 折-衍光学镜片的单点金刚石车削与检测[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 032203.
- [6] Feldman M R, Suleski T J, Delaney W F. Fabricating optical elements using a photoresist formed from contact printing of a gray level mask: US6071652[P]. 2000-06-06.
- [7] Zha Y K, Wei J S, Gan F X. A novel design for maskless direct laser writing nanolithography: Combination of diffractive optical element and nonlinear absorption inorganic resists [J]. Opt Commun, 2013, 304(1): 49-53.
- [8] Shan M, Tan J. Modeling focusing characteristics of low F-number diffractive optical elements with continuous relief fabricated by laser direct writing [J]. Opt Express, 2007, 15(25): 17032.
- [9] Tapalian H C, Langseth J, Chen Y, *et al.* Ultrafast laser direct-write actuatable microstructures [J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(24): 243304.
- [10] Zeng H, Martella D, Wasylczyk P, *et al.* Liquid-crystalline elastomers: high-resolution 3D direct laser writing for liquid-crystalline elastomer microstructures [J]. Adv Mater, 2014, 26(15): 2285.
- [11] He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. Chinese J 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.
- [12] Hu A, Peng P, Alarifi H, *et al.* Femtosecond laser welded nanostructures and plasmonic devices [J]. J Laser Appl, 2012, 24(4): 241-247.
- [13] Zheng C, Hu A M, Chen T, *et al.* Femtosecond laser internal manufacturing of three-dimensional microstructure devices [J]. Appl Phys A-Mater, 2015, 121(1): 163-177.
- [14] Liu C M. Compact 3D microfluidic channel structures embedded in glass fabricated by femtosecond laser direct writing [J]. J Laser Micro/Nanoengineering, 2013, 8(2): 170-174.
- [15] 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.
- [16] Liu Shuang, Liu Xin, Tang Wenlong, *et al.* Study of Ti: sapphire double line waveguide written by femtosecond laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203001.
刘 爽, 刘 欣, 唐文龙, 等. 飞秒激光在钛蓝宝石晶体中刻写双线型波导的研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203001.
- [17] Xing Songling, Liu Lei, Zou Guisheng, *et al.* Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403001.
邢松龄, 刘 磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响 [J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.
- [18] Mizoshiri M, Arakane S, Sakurai J, *et al.* Direct writing of Cu-based micro-temperature detectors using femtosecond laser reduction of CuO nanoparticles [J]. Appl Phys Express, 2016, 9(3): 036701.
- [19] Zhang H T, Tang M Z, McCoy J, *et al.* Deposition of tungsten nanogratings induced by a single femtosecond laser beam [J]. Opt Express, 2007, 15(10): 5937-5947.
- [20] Wang H, Liu S, Zhang Y L, *et al.* Controllable assembly of silver nanoparticles induced by femtosecond laser direct

- writing[J]. *Sci Technol Adv Mater*, 2015, 16(2): 024805.
- [21] Ma Y C, Wang L, Guan K M, *et al.* Silicon-based suspended structure fabricated by femtosecond laser direct writing and wet etching[J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2016, 28(15): 1605-1608.
- [22] Sohn I B, Ko M J, Kim Y S, *et al.* Direct femtosecond laser lithography for photoresist patterning[J]. *Opt Eng*, 2009, 48(2): 024301.
- [23] Ho S, Haque M, Herman P R, *et al.* Femtosecond laser-assisted etching of three-dimensional inverted-woodpile structures in fused silica[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(10): 1682-1684.
- [24] Kallepalli L N, Desai N R, Rao S V. Femtosecond-laser direct writing in polymers and potential applications in microfluidics and memory devices[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(7): 397-407.
- [25] Kumi G, Yanez C O, Belfield K D, *et al.* High-speed multiphoton absorption polymerization: fabrication of microfluidic channels with arbitrary cross-sections and high aspect ratios[J]. *Lab Chip*, 2010, 10(8): 1057-1060.