

基于飞秒激光成丝的大幅面激光打标方法

陈平, 王云飞, 戴子杰, 龚诚, 张楠, 刘伟伟*

南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350

摘要 为了解决激光打标系统中聚焦透镜焦深短等原因导致的系统打标范围小等问题, 提出了一种基于飞秒激光成丝效应进行大幅面激光打标的方法, 系统地分析了打标范围和分辨率。实验结果表明: 飞秒激光成丝可以有效地增大焦深, 实现大幅面平面样品的打标以及曲面样品的打标, 并在打标系统的有效工作范围内, 使分辨率均匀性得到了提高。

关键词 非线性光学; 飞秒激光; 成丝; 激光打标

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508019

Large-Area Laser Marking Methods Based on Femtosecond Laser Filamentation

Chen Ping, Wang Yunfei, Dai Zijie, Gong Cheng, Zhang Nan, Liu Weiwei*

*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering,
Nankai University, Tianjin 300350, China*

Abstract In the conventional laser marking systems, the marking area is usually limited due to the short focal length. Herein, an alternative method is proposed to pursue large-area marking based on femtosecond laser filamentation, and the marking range and resolution are analyzed in detail. The experimental results show that the femtosecond laser filamentation can effectively increase the focal depth and complete marking on large-area flat or curved surface samples. Furthermore, the resolution uniformity is improved within the effective working range of the marking system.

Key words nonlinear optics; femtosecond laser; filamentation; laser marking

OCIS codes 190.7110; 320.2250

1 引 言

激光自问世以来在加工制造领域得到了广泛应用, 工业上已将激光用于切割、焊接和表面处理等领域。飞秒激光具有极高的峰值功率和极短的脉宽, 它和物质相互作用时可表现出不同的特性; 飞秒激光具有强烈的非线性效应, 且热效应小, 加工精度极高, 常被用于加工微纳结构。此外, 飞秒激光可以在金属材料上打小孔^[1-2]、加工微悬臂梁^[3], 在硅、玻璃等材料中直写波导^[4-5], 在光聚合物材料中雕刻三维立体结构^[6]。

激光打标是激光加工技术的一种, 属于非接触式的打标技术, 该技术采用计算机控制光束的扫描

位置和速度, 使高能量的激光束在样品表面扫描, 在样品表面甚至内部形成需要的文字或图案标记。激光打标技术具有无接触、精度高、速度快等独特的优点, 在机械零件、电子元件、集成电路上的符号标刻, 以及显示器中氧化钢锡(ITO)电极刻蚀^[7]等领域得到了广泛应用。目前, 大表面面积的工业产品和三维曲面工业产品的打标是激光打标的一个重要方面。大表面面积的平面打标需要不断地移动样品的位置, 通过拼接完成整个幅面的加工, 此种加工手段要求系统精确控制样品的位置^[8], 但对于质量较大的样品而言, 这种办法存在严重弊端。在三维曲面打标方面, 目前主流的方法是对样品进行三维建模, 得到三维结构后实时调整激光焦点或样品的位置

收稿日期: 2018-12-26; **修回日期:** 2019-02-19; **录用日期:** 2019-02-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(11574160)、111 计划(B16027)、强场激光物理国家重点实验室开放课题资助项目

* **E-mail:** liuweiwei@nankai.edu.cn

置^[8-9],调整过程中对焦点位置的控制以及样品的平整度要求较高。此外,聚焦透镜的小焦深以及弯曲的焦面限制了系统的工作范围。

为解决上述问题,文献[10-11]利用贝塞尔光束的主瓣在一定距离内无衍射的特性进行大幅面和曲面样品的加工,此方法虽然在一定程度上拓展了打标空间范围,但也存在不足,如贝塞尔光束的旁瓣占据了能量,导致系统整体的能量利用率较低^[12],并且旁瓣会留下印记,对打标质量不利^[13]。因此,如何实现大幅面和三维曲面的高质量打标成为亟待解决的问题。本文利用飞秒激光成丝效应中激光脉冲在较长距离内不会明显发散^[14]的特点,提出了一种基于飞秒激光成丝效应的打标方法。光丝可以有效增大焦深,从而可以实现大幅面和三维曲面的高质量打标。为了验证所提方法的可行性,分别在金属铝片以及不锈钢球表面进行高质量打标实验,表征平面样品的打标幅面和打标分辨率,并且研究了球面上打标图像的矫正,在此基础上表征球面上的打标分辨率。

2 实验原理

飞秒激光脉冲在介质中传输时,介质折射率会发生与光强相关的变化。对于一般的高斯分布型光斑而言,光斑中心区域的折射率高于光斑边缘的折射率,从而形成类似凸透镜的效果,使光束自行会聚,即克尔自聚焦效应^[15-16]。光斑中心区域的折射率为

$$n_c = n_0 + n_2 I(r, t), \quad (1)$$

式中: n_0 为线性折射率; n_2 为非线性折射率; $I(r, t)$ 为位置 r 处 t 时刻的光强。当中心光强足够高,且达到介质的电离阈值时,介质分子被电离产生等离子体^[17],光斑中心的等离子体密度高于边缘的等离子体密度,从而导致局部折射率降低^[18],形成凹透镜效果,使光束发散,即等离子体散焦效应。局部折射率变为

$$n_p = n_0 - \rho(r, t)/(2\rho_c), \quad (2)$$

式中: $\rho(r, t)$ 为自由电子的密度; ρ_c 为等离子体密度的临界值,与波长相关。克尔自聚焦效应和等离子体散焦效应同时存在,最终形成平衡状态,二者引起的非线性折射率的变化大致相等,即

$$\Delta n_{\text{kerr}} = \Delta n_{\text{plasma}}。 \quad (3)$$

激光成丝是一种独特的光学现象,它可以在介质中形成稳定的等离子体通道^[19-21],且传播很长的距离^[22](远大于光束本身的瑞利长度)也不产生明显的发散。因此,利用飞秒激光成丝效应可以增大

焦深。当功率大于成丝阈值时,光丝长度会在一定范围内随着聚焦透镜焦距的增大而变长^[23]。因此,利用长焦透镜下的飞秒激光成丝效应可以突破瑞利长度的限制,实现长焦深聚焦,从而使得利用飞秒激光成丝进行大面积及三维曲面快速打标时,无需对光束或样品的位置实施精确控制。打标系统的工作范围取决于光丝的长度。

图1(a)为电荷耦合器件(CCD)相机拍摄的光丝的照片,丝长约15 mm,拍摄条件如下:平均功率为1.5 W,重复频率为2.5 kHz,脉宽为42 fs,透镜焦距为750 mm。图1(b)为飞秒激光成丝拓展打标范围的原理图,图中的灰色区域为光丝在振镜扫描时经过的区域,样品放置在此光丝区域即可实现打标。此外,金属的烧蚀阈值远低于空气成丝阈值,故实际可打标区域比光丝区域更大。其中, X - Y 最大幅面如图1(b)中虚线所示,其尺寸约为345 mm×345 mm。因此,增大焦深可以实现三个维度上打标范围的拓展。

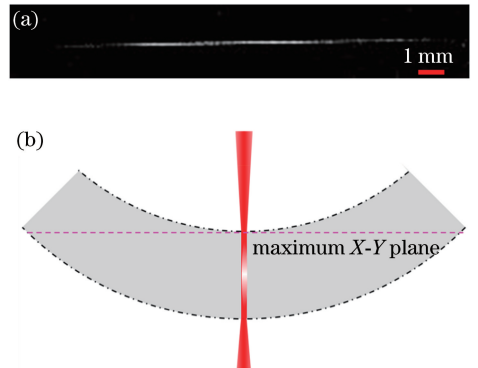


图1 光丝大幅面打标原理。(a) CCD拍摄的光丝照片;
(b)激光成丝拓展打标范围原理图

Fig. 1 Principle of large-area marking based on filamentation. (a) Photograph of filamentation taken by CCD; (b) schematic of expanding marking range based on laser filamentation

3 实验装置

基于飞秒激光成丝效应的打标实验系统如图2(a)所示,实验所用的光源为掺钛蓝宝石飞秒激光器(Legend Elite, Coherent, 美国)。飞秒激光的中心波长为800 nm,脉宽为42 fs,重复频率为2.5 kHz。光束经两片高反镜M1和M2准直后进入格兰棱镜,通过格兰棱镜的旋转实现激光功率的连续变化;之后,光束经焦距为750 mm的透镜聚焦后入射到振镜上。两片振镜分别控制光束在互相垂直的两个方向上的移动,将光束组合成二维平面的

扫描光束。振镜下方放置一块反射镜 M3, 将激光光束调整到水平方向, 以方便调整样品的位置。实验样品是 0.3 mm 厚的铝片和直径为 200 mm 的不锈

钢球, 并被固定于样品架上。

通常采用的平场聚焦激光打标装置如图 2(b) 所示, 透镜焦距 100 mm。

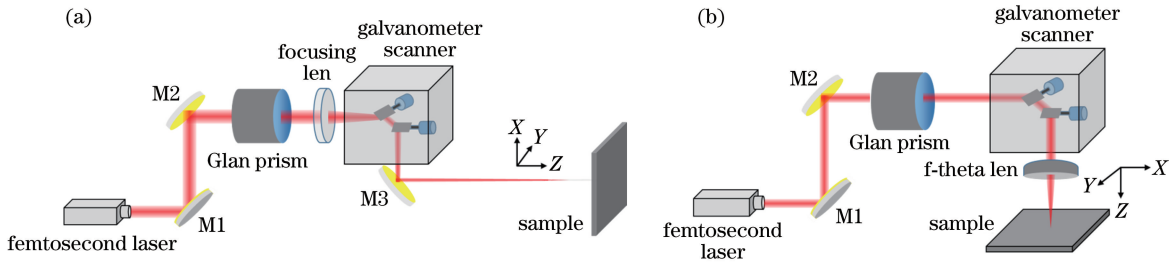


图 2 激光打标系统示意图。(a) 飞秒激光成丝打标系统示意图; (b) 平场聚焦激光打标系统示意图

Fig. 2 Schematics of laser marking system. (a) Schematic of femtosecond laser filamentation marking system; (b) schematic of flat-field focusing laser marking system

4 实验结果

4.1 激光成丝大幅面平面打标

平场聚焦透镜是一种可以矫正焦面弯曲的透镜组, 使用该透镜进行激光打标可以使像面趋近于平面^[24], 具有减小畸变和拓展打标幅面等优点。但是, 由于透镜视场角的限制以及有限的平场矫正能力, 平场聚焦打标系统仍难以实现大幅面和三维曲面打标。本实验先对平场聚焦激光打标系统的工作范围进行标定。入射激光功率为 140 mW, 为了方

便表述, 这里约定样品平面为 X-Y 平面, 光束传播方向为 Z 方向。首先, 对 Z 方向的打标范围进行标定: 样品沿 Z 方向步进移动, 步长为 0.5 mm, 同时样品沿 X 方向步进, 然后标刻一条直线, 根据线条的个数得到 Z 方向的打标范围为 0~3 mm。然后, 取 Z 方向工作范围内的中间位置, 对 X-Y 平面的打标幅面进行标定。设计打标图形为分辨率板 (USAF-1951) 阵列, 可以同时得到幅面大小和不同区域内打标分辨率的差异信息。打标得到的样品如图 3(a) 所示。

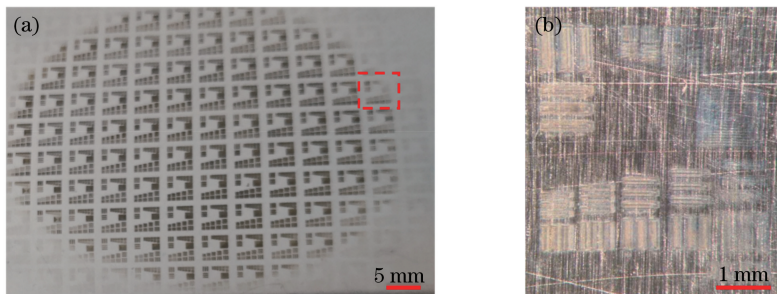


图 3 分辨率板阵列标刻实验结果。(a) 平场聚焦激光打标系统标刻的分辨率板阵列; (b) 图 3(a) 中方框内的放大图像
Fig. 3 Result of marking experiment with resolution plate array. (a) Sample processed by flat-field focusing laser marking system; (b) magnification of region boxed in Fig. 3(a)

由图 3 可以发现: 尽管平场聚焦透镜对焦面进行了矫正, 但实际有效的打标区域仅为一个长轴为 60 mm、短轴为 47 mm 的近似椭圆区域, 方框所示边缘位置的图形出现了明显的离焦残缺, 图 3(b) 为方框位置的放大图像。

接下来对飞秒激光成丝打标系统进行同样的范围标定, 激光参数保持一致。首先, 对 Z 方向打标范围进行测量: 样品沿 Z 方向步进移动的同时标刻直线, 得到 Z 方向的工作范围为 0~20 mm。相对于平场聚焦打标装置, 这一工作范围提高了 6.67

倍。Z 方向工作范围的增大降低了对样品定位的要求, 使得样品位置和激光焦点无需精确调整。但是, 这对于 Z 方向工作范围内不同位置处打标分辨率的均匀性提出了要求, 需要保证其打标范围的增加不会牺牲打标质量。因此, 对 Z 方向不同位置处的近轴区域的分辨率进行了标定, 测量结果基于上述 Z 方向工作范围标定实验通过分析线宽得到, 如图 4 所示。由图 4 可知: 位置 3 mm 处有疑似阶跃突变, 推测此处的样品表面材质不均或几何形貌发生了变化。线宽的平均值为 52.7 μm , 标准差为

8.5 μm ,因此,在 Z 方向的打标范围内,对样品位置的要求低且分辨率差异较小。

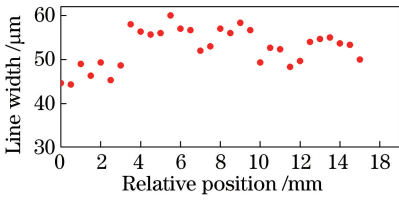


图 4 Z 方向不同位置的标刻线宽

Fig. 4 Widths of the lines marked at different positions in Z direction

在此基础上,对 X-Y 平面的打标范围进行标定。受限于 M3 反射镜的大小,只在 180 mm \times 180 mm 的范围内打标分辨率板 (USAF-1951) 阵列。根据测得的 Z 方向的工作范围可以计算得到 X-Y 平面的打标幅面应为 345 mm \times 345 mm。打标的样品如图 5(a)所示,显微镜下观察到的图 5(a)中方框内分辨率板图像如图 5(b)所示。图 5(b)中的图像未出现离焦缺失的情况,说明飞秒激光成丝打标系统的幅面相比于平场聚焦激光打标系统提高了 53.7 倍。

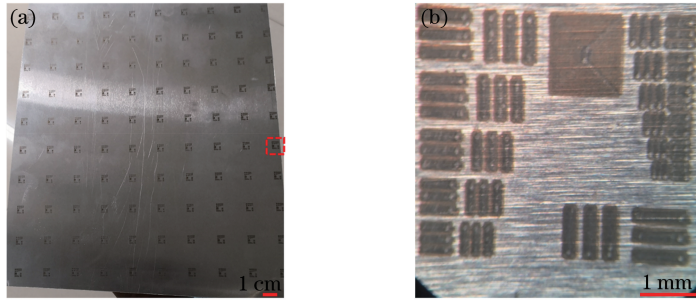


图 5 分辨率板阵列标刻实验结果。(a)飞秒激光成丝打标系统标刻的分辨率板阵列;(b)图 5(a)中方框内的放大图像
Fig. 5 Result of marking experiment with resolution plate array. (a) Sample processed by femtosecond laser filamentation marking system; (b) magnification of region boxed in Fig.5(a)

同时,根据各个区域分辨率板图像可以确定幅面内的分辨率差异,结果如图 6 所示:平场聚焦激光打标系统的各区域分辨率均值为 75 μm ,标准差为 24 μm ;激光成丝打标系统的各区域分辨率均值为

92.9 μm ,标准差为 16.9 μm 。可见,后者的分辨率均值降低了 23.8%,但由于幅面的整体增大,在更大幅面内分辨率的均匀性提高了 42%,这对于打标的整体质量是非常重要的。

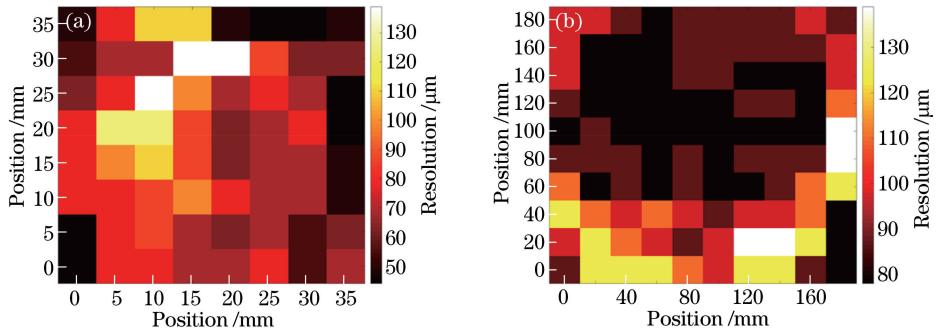


图 6 打标分辨率。(a)平场聚焦激光打标系统的标刻分辨率;(b)飞秒激光成丝打标系统的标刻分辨率

Fig. 6 Marking resolution. (a) Marking resolution of flat field focusing laser marking system;
(b) marking resolution of femtosecond laser filamentation marking system

4.2 激光成丝三维曲面打标

Z 方向工作范围的增大不仅可以明显提高平面打标的幅面,而且可以使得激光打标在三维曲面上进行。将样品更换为不锈钢球,对飞秒激光成丝打标系统进行球面标刻实验。由图 7(a)所示的几何关系可知最大的可打标范围是光束与球面相切得到的弧面。在直径为 200 mm 的球表面打标尺寸为

130 mm \times 130 mm 的南开大学百年校庆标志,结果如图 7(b)所示,可见:图像完全覆盖弧面,且边缘清晰无离焦。

在球面上打标的图像会出现畸变,故可以对预打标的图像进行投影计算,预先将球面的畸变考虑在内,最终可还原正常的打标图像。图 8(a)为球面上预打标的分辨率板 (USAF-1951) 阵列原图;

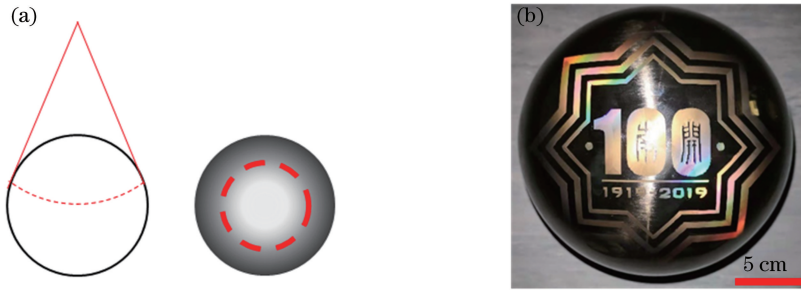


图 7 在球面上激光打标。(a)在球面上可打标的最大范围的示意图;(b)不锈钢球表面打标图像
Fig. 7 Laser making on sphere. (a) Schematic of maximum range for marking on sphere;
(b) marking image on surface of stainless steel ball

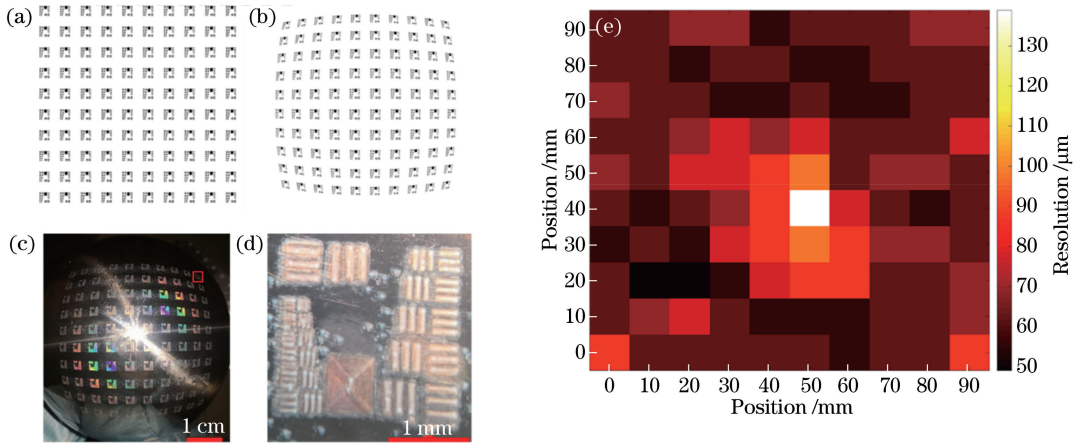


图 8 矫正球面打标畸变和球面打标分辨率。(a)预标刻的分辨率板阵列图;(b)投影计算得到的分辨率板阵列图;
(c)由投影图标刻的样品;(d)图 8(c)中方框内的放大图像;(e)球面标刻分辨率

Fig. 8 Correction of marking distortion on sphere and marking resolution on sphere. (a) Pre-marked resolution plate array;
(b) resolution plate array obtained by projection calculation; (c) sample marked by projected image;
(d) magnification of region boxed in Fig. 8(c); (e) marking resolution on sphere

图 8(b)为投影计算得到的图像;图 8(c)为使用投影计算的图像打标的样品图;图 8(d)为图 8(c)中方框内分辨率板的放大图像,可见,边缘区的分辨率板形状得到了矫正,轮廓恢复为矩形;图 8(e)为根据此分辨率板阵列统计得到的不同区域的打标分辨率信息。打标的分辨率均值为 $66.6 \mu\text{m}$, 标准差为 $12.58 \mu\text{m}$ 。由于球面样品材料与平面样品材料不同,球面样品打标的分辨率高于平面样品,且分辨率的均匀性也更高。

5 结 论

利用飞秒激光成丝效应中光束可以在长距离内保持不发散的特点,增大激光焦深,实现了激光打标范围的拓展,其具体优势体现在降低了对样品定位精度的要求,拓展了平面打标的幅面。对图像进行投影计算,在无需光束或者样品位置做出调整的情况下,可以完成球面样品上的无畸变打标。此外,通

过实验验证了平面样品上打标分辨率均匀性的提高及球面样品上分辨率的一致性。分辨率保持均匀的区域得到增大,保证了更大三维空间内的加工质量。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y J, Song H Y, Liu H Y, *et al.* Fabrication of millimeter-scaled holes by femtosecond laser filamentation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402012.
张艳杰, 宋海英, 刘海云, 等. 飞秒激光成丝制备毫米级深孔[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402012.
- [2] Klein-Wiele J H, Bekesi J, Simon P. Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2004, 79 (4/5/6): 775-778.
- [3] Wang X L, Lu P X, Dai N L, *et al.* Femtosecond laser direct fabrication of metallic microcantilevers for a micro-corrosion-fatigue test [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(7):

- 1307-1313.
- [4] Pavlov I, Tokel O, Pavlova S, *et al.* Femtosecond laser written waveguides deep inside silicon [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 3028-3031.
- [5] Chen G Y, Piantedosi F, Otten D, *et al.* Femtosecond-laser-written microstructured waveguides in BK7 glass [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10377.
- [6] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, *et al.* Finer features for functional microdevices [J]. *Nature*, 2001, 412 (6848): 697-698.
- [7] Zhou Y F, Zhao H F, Huang Z Q. Laser lithography system and its technological research [J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(2): 126-129.
周永飞, 赵海峰, 黄子强. 激光打标系统及工艺研究 [J]. *电子设计工程*, 2011, 19(2): 126-129.
- [8] Xu B Z, Liu T G, Wang M, *et al.* Research on laser marking technology for free-form surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2165-2169.
许宝忠, 刘铁根, 王萌, 等. 空间自由曲面激光标刻技术研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2165-2169.
- [9] Su R W. Design and implementation of 3D laser flexible marking system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
苏荣伟. 三维柔性激光打标系统的设计与实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [10] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [11] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 607-621.
- [12] Sadao M R. Side lobe suppression of a Bessel beam for high aspect ratio laser processing [J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 79-85.
- [13] Kohno M, Matsuoka Y. Microfabrication and drilling using diffraction-free pulsed laser beam generated with axicon lens [J]. *JSME International Journal Series B*, 2004, 47(3): 497-500.
- [14] Xu S Q. Study of intensity clamping during femtosecond laser filamentation [D]. Tianjin: Nankai University, 2012.
徐圣奇. 飞秒激光成丝现象中光强钳制效应研究 [D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [15] Moloney J V, Newell A C. Nonlinear optics [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1990, 44 (1/2): 1-37.
- [16] Levenson M. The principles of nonlinear optics [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(4): 400.
- [17] Talebpour A, Abdel-Fattah M, Chin S L. Focusing limits of intense ultrafast laser pulses in a high pressure gas: road to new spectroscopic source [J]. *Optics Communications*, 2000, 183(5/6): 479-484.
- [18] Feit M D, Fleck J A, Jr. Effect of refraction on spot-size dependence of laser-induced breakdown [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(4): 169-172.
- [19] Liu W, Hosseini A, Luo Q, *et al.* Experimental observation and simulations of the self-action of white light laser pulse propagating in air [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 6.
- [20] Aközbeke N, Scalora M, Bowden C M, *et al.* White-light continuum generation and filamentation during the propagation of ultra-short laser pulses in air [J]. *Optics Communications*, 2001, 191(3/4/5/6): 353-362.
- [21] Chin S L, Liu W W, Théberge F, *et al.* Some fundamental concepts of femtosecond laser filamentation [M] // *Progress in Ultrafast Intense Laser Science III*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 243-264.
- [22] Daigle J F, Kosareva O, Panov N, *et al.* A simple method to significantly increase filaments' length and ionization density [J]. *Applied Physics B*, 2009, 94 (2): 249-257.
- [23] Luo Q, Liu W, Chin S L. Lasing action in air induced by ultra-fast laser filamentation [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2003, 76 (3): 337-340.
- [24] Fu M M, Chen P F, Wang Y, *et al.* Optical design of super wide angle f-theta lens with large operation area [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1083-1087.
付敏敏, 陈培锋, 王英, 等. 超广角大工作面 f-theta 镜头的光学设计 [J]. *应用光学*, 2011, 32(6): 1083-1087.