

引用格式: WEI Zhang-fan, SUN Chuan, GUO Kai, *et al.* Study on Bessel Lens for Picosecond Laser Cutting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1022001

魏张帆,孙川,郭凯,等.用于皮秒激光切割的贝塞尔镜头研究[J].光子学报,2020,49(10):1022001

## 用于皮秒激光切割的贝塞尔镜头研究

魏张帆<sup>1,2</sup>,孙川<sup>1</sup>,郭凯<sup>1</sup>,陈明<sup>1</sup>,黄立华<sup>1,2</sup>,曾爱军<sup>1,2</sup>,黄惠杰<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 信息光学与光电技术实验室,上海 201800)

(2 中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049)

**摘 要:**设计并研制了一套用于激光切割的贝塞尔镜头及光束检测系统.此外,采用设计的贝塞尔镜头与中心波长为 1 064 nm 的皮秒脉冲激光器产生皮秒贝塞尔光束,对厚度为 1 mm 的硅酸盐玻璃进行了切割实验.结果表明,一定直径的高斯光束入射到此贝塞尔镜头上,产生的贝塞尔光束中心主瓣直径和无衍射传输距离分别达到 3.4  $\mu\text{m}$  和 2.46 mm;切割实验中,玻璃分离前的表面微孔直径不超过设计的贝塞尔光束中心主瓣直径.本文设计的贝塞尔镜头及光束检测系统能够满足激光切割应用要求.

**关键词:**激光光学;贝塞尔光束;激光材料加工;玻璃切割;光束检测

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204910.1022001

## Study on Bessel Lens for Picosecond Laser Cutting

WEI Zhang-fan<sup>1,2</sup>, SUN Chuan<sup>1</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>, HUANG Li-hua<sup>1,2</sup>,

ZENG Ai-jun<sup>1,2</sup>, HUANG Hui-jie<sup>1,2</sup>

(1 *Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(2 *Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** A Bessel lens for laser cutting and beam measurement system are designed and developed. Additionally, picosecond Bessel beam is generated by a picosecond pulse laser and the designed Bessel lens, and it is used for the cutting experiment on a piece of silicate glass with the thickness of 1 mm. The results show that, by the incidence of a Gaussian beam with certain diameter on the Bessel lens, the central core diameter and non-diffracting propagation distance of the generated Bessel beam are 3.4  $\mu\text{m}$  and 2.46 mm, respectively. In the cutting experiment, the diameters of the surface micro-holes before glass breaking are smaller than the designed central core diameter of Bessel beam. The designed Bessel lens and beam measurement system in this paper can satisfy the application requirements of laser cutting.

**Key words:** Laser optics; Bessel beam; Laser materials processing; Glass dicing; Beam measurement

**OCIS Codes:** 220.3620; 140.3300; 140.3390; 110.2970

## 0 引言

随着激光技术的飞速发展,激光切割技术现已成为工业应用领域的热门加工技术之一<sup>[1-2]</sup>.无衍射光束

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61805264),政府间科技创新国际合作计划(No.2016YFE0110600),上海市扬帆计划(No.18YF1426500),上海市自然科学基金(No.19ZR1464300)

**第一作者:**魏张帆(1985—),男,博士研究生,主要研究方向为精密光电测控技术. Email: wzf@siom.ac.cn

**导 师:**曾爱军(1975—),男,研究员,博士,主要研究方向为偏振光技术及其应用、精密光电检测技术及仪器. Email: aijunzeng@siom.ac.cn

**收稿日期:**2020-06-24; **录用日期:**2020-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

又称零阶贝塞尔光束<sup>[3]</sup>,垂直于传输方向的横向光强分布由一个中心亮斑(主瓣)和许多同心圆环(旁瓣)围绕组成,每个环形旁瓣所携带的能量几乎是相等的,光强高度集中在中心主瓣,横向光强分布在无衍射传输距离内保持不变<sup>[4]</sup>.在实际光学系统中,由于受到光学元件孔径的限制等,只能获得近似的贝塞尔光束,仅在一定的传输范围内可以保持光束中心主瓣直径和横向光强分布不变<sup>[5-8]</sup>.即使如此,在贝塞尔光束中心主瓣直径和高斯光束束宽相同的情况下,贝塞尔光束的无衍射传输距离远大于高斯光束的瑞利长度,相比高斯光束具有更长的焦深<sup>[9]</sup>,在激光加工应用中,有效降低调焦精度的同时具有更大的加工动态范围,在加工大深径比的材料时具有明显的精度优势<sup>[10]</sup>.近年来,作为加工大深径比材料的理想工具,结合超短脉冲与贝塞尔光束的红外超快贝塞尔光束吸引了学者们的大量关注<sup>[11-13]</sup>.由于其非线性吸收效应,超短脉冲的贝塞尔光束能够在样品表面及内部产生高度局部化效应,形成一系列微孔,弱化在机械辅助玻璃分离之前脆性材料的损伤<sup>[14]</sup>.

目前,产生零阶贝塞尔光束有很多种方法,主要包括环缝法、全息法、球差透镜法、轴锥镜法等被动方法以及其他主动腔法<sup>[5]</sup>.其中,环缝法和谐振腔法结构简单,但对入射光束的转化效率偏低;全息法对全息图的制作有较高的要求;球差透镜法结构灵活,但透镜设计及加工较为复杂;轴锥镜法作为用于产生贝塞尔光束的最常见方法之一,对轴锥镜的加工精度要求较高,但产生的贝塞尔光束尺寸稳定性好,同时具有实验结构简单、转换效率高及抗损伤阈值高等优点<sup>[15]</sup>.在玻璃激光切割中,为了获得比较好的切割分离面质量,玻璃沿扫描方向分离前的表面微孔直径越小越好,一般要求贝塞尔光束中心主瓣直径和无衍射传输距离分别为微米和毫米量级,对检测精度提出了较高的要求.传统的检测方法主要包括胶片法、CCD相机法等.胶片法利用感光胶片记录光斑信息并将胶片放大处理后测量,对实验条件要求较高;CCD相机法操作简单但容易受限于传感器的分辨率,然而高分辨率的CCD相机成本高<sup>[16]</sup>.

本文设计并研制了一套用于激光切割的贝塞尔镜头及光束检测系统,此镜头主要由轴锥镜和双远心光学系统组成,通过一定直径的高斯光束入射后,产生的贝塞尔光束中心主瓣直径与无衍射传输距离满足玻璃激光切割的要求;在检测系统中,利用双远心光学系统对此贝塞尔光束进行有效放大,根据检测结果和放大倍数,快速、准确地得到光束中心主瓣直径和无衍射传输距离.此外,采用设计的贝塞尔镜头与中心波长为1 064 nm皮秒脉冲激光器产生皮秒贝塞尔光束,对厚度为1 mm的硅酸盐玻璃进行了切割实验验证.

## 1 贝塞尔镜头的原理

在玻璃激光切割中,不同玻璃材料的烧蚀阈值不同,当贝塞尔光束中心主瓣的激光能量密度高于材料的烧蚀阈值,材料烧蚀宽度即玻璃表面微孔直径,其尺寸取决于贝塞尔光束的中心主瓣直径,同理,玻璃的切割深度取决于光束无衍射传输距离.通常情况下,采用单个轴锥镜产生的贝塞尔光束始于轴锥镜的锥尖位置,若把光学系统最后一个透镜后表面与贝塞尔光束起始位置之间的距离定义为贝塞尔光束的工作距离,则其工作距离很短,且中心主瓣直径和无衍射传输距离较大,不利于激光能量的高度集中,本文结合实际需求和现有情况,设计一套贝塞尔镜头,采用此镜头产生的贝塞尔光束中心主瓣直径小于4  $\mu\text{m}$ ,无衍射传输距离大于2.4 mm,用于一定厚度的玻璃激光切割.

通过采用轴锥镜产生的贝塞尔光束特性结合几何光学设计、衍射分析,本文设计了由轴锥镜与双远心光学系统构成的贝塞尔镜头.其中,双远心光学系统对采用轴锥镜产生贝塞尔光束的中心主瓣直径和无衍射传输距离进行缩小的同时,有效地增大了贝塞尔光束的锥角,产生的高度聚焦光束增强了光束峰值能量并提高了能量转化效率.此外,在一定程度上增大了工作距离,为厚玻璃的加工等应用创造了条件.通过合理设计入射光束直径、轴锥镜底角和双远心光学系统的缩束比等参数,采用此镜头产生的贝塞尔光束中心主瓣直径和无衍射传输距离满足要求.

图1是采用此贝塞尔镜头产生光束的几何光路示意图.透镜L1和L2组成双远心光学系统,其入瞳和出瞳面都位于无穷远,透镜L1的像方焦点与透镜L2的物方焦点重合.其中,双远心光学系统的缩束比定义为 $\beta = f_2/f_1$ ,则缩束后的贝塞尔光束理论无衍射传输距离 $\approx z_{\text{max}2}$ 和中心主瓣半径 $\rho_0$ 分别为(当轴锥镜底角为小角度时的近似)<sup>[17-19]</sup>

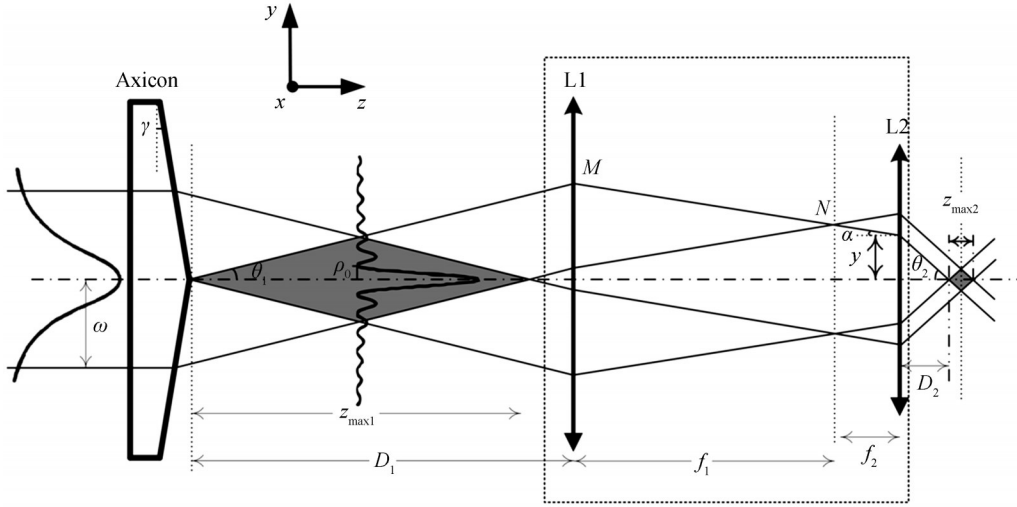


图1 采用轴锥镜和双远心光学系统产生的贝塞尔光束几何光路示意图  
Fig. 1 Generation schematic diagram of the Bessel beam using an axicon and a bi-telecentric optical system

$$z_{\max 2} = \beta^2 z_{\max 1} = \frac{\beta^2 \omega}{(n-1)\gamma} \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{2.4048\beta}{k(n-1)\gamma} \quad (2)$$

式中,  $f_1$  和  $f_2$  分别为透镜 L1 和 L2 的焦距,  $z_{\max 1}$  为采用轴锥镜产生的贝塞尔光束无衍射传输距离,  $\omega$  为入射光束半径,  $n$  为轴锥镜的折射率,  $\gamma$  为轴锥镜的底角,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数.

根据图 1 中的几何关系和光学系统成像公式, 可得

$$\theta_1 D_1 = \alpha \left( f_1 + f_2 + \frac{y}{\alpha} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{\left( f_1 + f_2 + \frac{y}{\alpha} \right)} \quad (4)$$

$$\theta_1 = \theta_2 \beta \quad (5)$$

$$D_2 = y/\theta_2 \quad (6)$$

式中,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为缩束前后的贝塞尔光束半锥角, 即贝塞尔光束波矢与光轴的夹角,  $D_1$  表示缩束前的贝塞尔光束起始位置以透镜 L1 物方主点为参考点的物距,  $y$  和  $\alpha$  分别为光线 MN 入射到透镜 L2 上相对于光轴的高度和与光轴的夹角. 由式(3)~(6)整理得出, 缩束后的贝塞尔光束起始位置与透镜 L2 像方主平面的距离  $D_2$  可以表示为

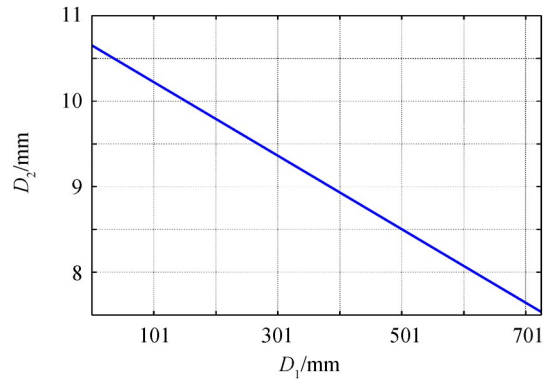
$$D_2 = f_2(\beta + 1) - \beta^2 D_1 \quad (7)$$

由式(7)可以看出,  $D_2$  与  $D_1$  成反比, 可以通过缩短  $D_1$  实现  $D_2$  的增大, 即缩短了光路长度的同时, 一定程度上增加了工作距离, 在加工厚玻璃时可对工作距离的大小进行控制.

根据设计需求, 贝塞尔镜头采用  $\gamma = 2^\circ$  的轴锥镜 (Thorlabs AX252-C) 将入射的高斯光束 ( $\omega = 9$  mm, 以光强的  $1/e^2$  计算) 转换为贝塞尔光束, 根据式(1)和式(2), 在波长  $\lambda = 1064$  nm 下, 由透镜 L1 (入瞳直径为 25.4 mm,  $f_1 = 152.5$  mm) 和透镜 L2 (入瞳直径为 9 mm,  $f_2 = 10$  mm) 组成的双远心光学系统将贝塞尔光束中心主瓣直径缩小至约  $3.4 \mu\text{m}$ , 无衍射传输距离约为 2.46 mm.

## 2 贝塞尔镜头的光学仿真

利用上节设计的贝塞尔镜头参数和式(7), 同时考虑到透镜 L1 和 L2 的入瞳直径大小限制, 对  $D_2$  和  $D_1$  的关系, 即缩束前后贝塞尔光束的起始位置分别与透镜 L1 和 L2 的距离关系, 进行绘制, 如图 2 所示.

图2  $D_1$ 与 $D_2$ 的关系曲线Fig. 2 Relationship curve between  $D_1$  and  $D_2$ 

为了保证一定的工作距离,设定 $D_2 = 10$  mm,此时 $D_1 = 152.5$  mm,利用上述系统参数在光学仿真软件(Advanced System Analysis Program, ASAP)中进行仿真,结果如图3所示,光束传输方向上 $z = 0$ 对应为透镜L2像方主平面的位置.图3(a)为 $z = 11$  mm处的贝塞尔光束横向光强分布图,可以看出其符合零阶Bessel函数分布,由一个中心主瓣和多个次级环形旁瓣组成,中心主瓣的光强最大,旁瓣光强随着光束直径的增加而递减.图3(b)、(c)分别为贝塞尔光束沿传输方向 $z$ 的纵向光强分布图及轴上光强分布曲线,可以看出贝塞尔光束轴上光强沿着传输方向缓慢变化,在约 $z = 10 + z_{\max 2}/2 = 11.232$  mm处达到光强最大值.由于高斯光束的分布特性和仿真中实际透镜结构的影响,所以仿真得到的光束无衍射传输距离略大于理论设计值(2.46 mm).

图4(a)~(f)分别为不同的光束传输距离处( $z = 10.2$  mm、10.5 mm、11 mm、11.25 mm、12 mm、12.5 mm)的贝塞尔光束横向光强分布曲线.贝塞尔光束中心主瓣直径以光强达到第一个极小值时的尺寸为定义,由

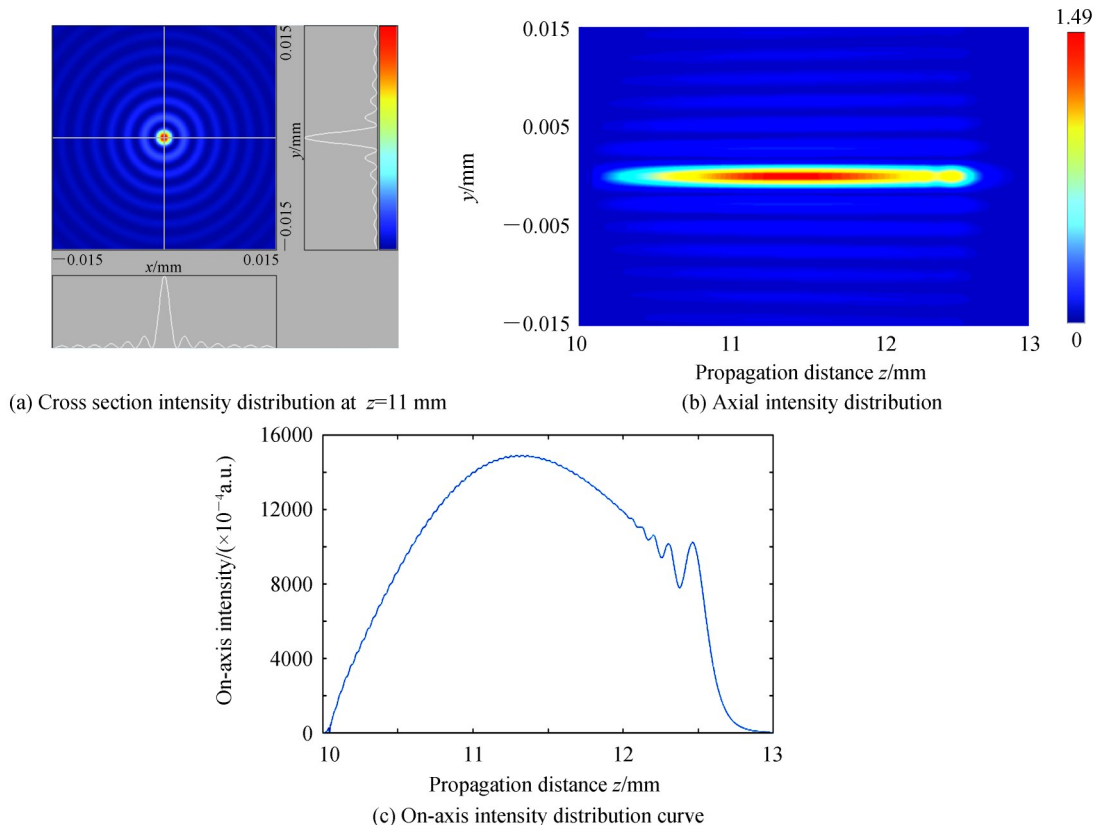


图3 贝塞尔镜头系统仿真结果

Fig. 3 Simulation results of Bessel lens

图4可以得出,在不同光束传输距离处的中心主瓣直径接近一致,约为 $3.4\ \mu\text{m}$ ,在无衍射传输距离内,光束横向光强分布基本不变,中心主瓣直径大小不变.由图3和图4的结果表明,贝塞尔镜头的仿真结果与设计值(中心主瓣直径为 $3.4\ \mu\text{m}$ ,无衍射传输距离为 $2.46\ \text{mm}$ )基本一致,贝塞尔光束参数满足设计需求,同时可以利用此设计理论根据不同的需求进行贝塞尔镜头设计.

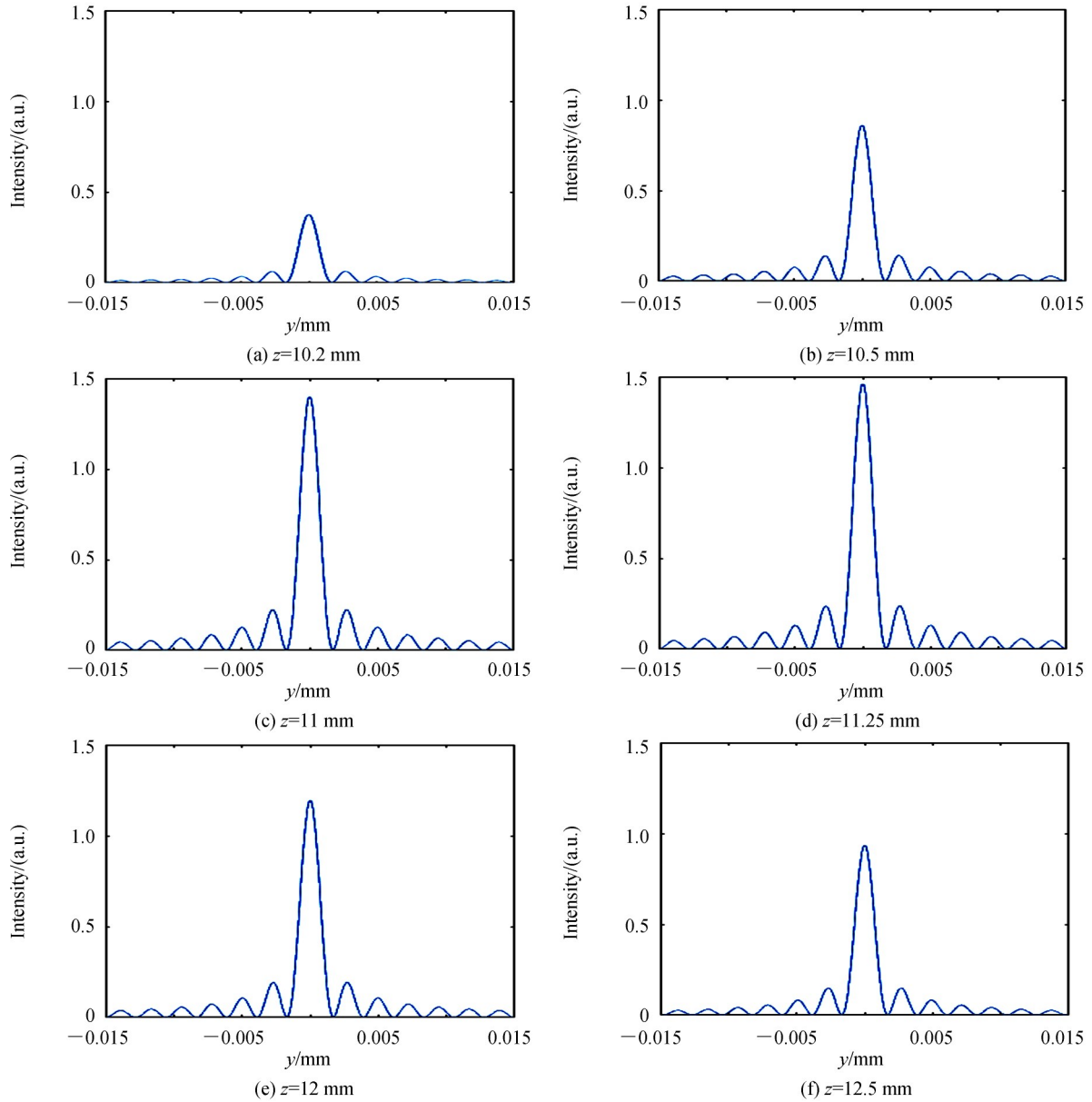


图4 不同的光束传输距离处的贝塞尔光束横向光强分布曲线

Fig. 4 Cross section intensity distribution curve of Bessel beam at different propagation distances

进一步,利用ASAP软件分析了贝塞尔镜头失调情况对产生贝塞尔光束的影响.当轴锥镜与各透镜之间的距离分配适当的公差,且轴锥镜和透镜同时绕 $y$ 轴适当倾斜时,产生的贝塞尔光束横向光强分布、无衍射传输距离、中心主瓣直径及位置等基本不变.但是,以透镜L2的位置为基准,令轴锥镜和透镜L1分别沿 $y$ 轴平移时,产生的贝塞尔光束会沿 $y$ 轴发生一定程度的倾斜.如图5所示,当轴锥镜和透镜L1之间的距离为 $\pm 2\ \text{mm}$ 、透镜L1和透镜L2之间的距离为 $\pm 1\ \text{mm}$ 且轴锥镜和透镜L1同时绕 $y$ 轴顺时针倾斜 $0.01^\circ$ ,沿 $y$ 轴平移 $0.01\ \text{mm}$ 时,产生的贝塞尔光束沿 $y$ 轴发生了一定程度的倾斜.同时,在不同的光束传输距离处( $z = 11\ \text{mm}$ 、 $11.5\ \text{mm}$ 、 $12\ \text{mm}$ )的贝塞尔光束横向光强分布曲线如图6(a)~(c)所示,在 $z = 11\sim 12\ \text{mm}$ 区域内的贝塞尔光束中心主瓣在 $y$ 轴上的偏移量约为 $1\ \mu\text{m}$ ,中心主瓣直径相同,仍为 $3.4\ \mu\text{m}$ ,横向光强分布曲线与理想曲线

相同,无衍射传输距离基本不变,上述公差分析的结果在玻璃切割中产生的微孔倾斜是可以忽略的.

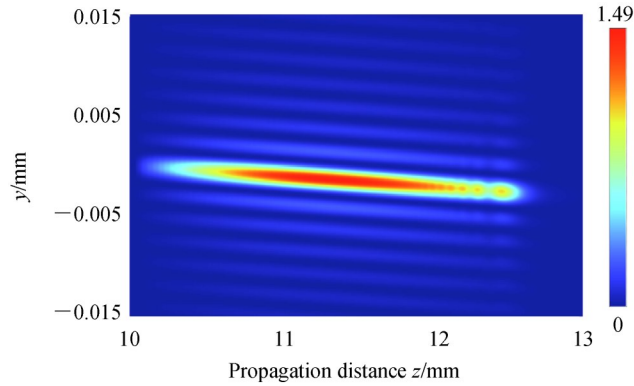


图5 贝塞尔镜头失调情况的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of Bessel lens misalignment

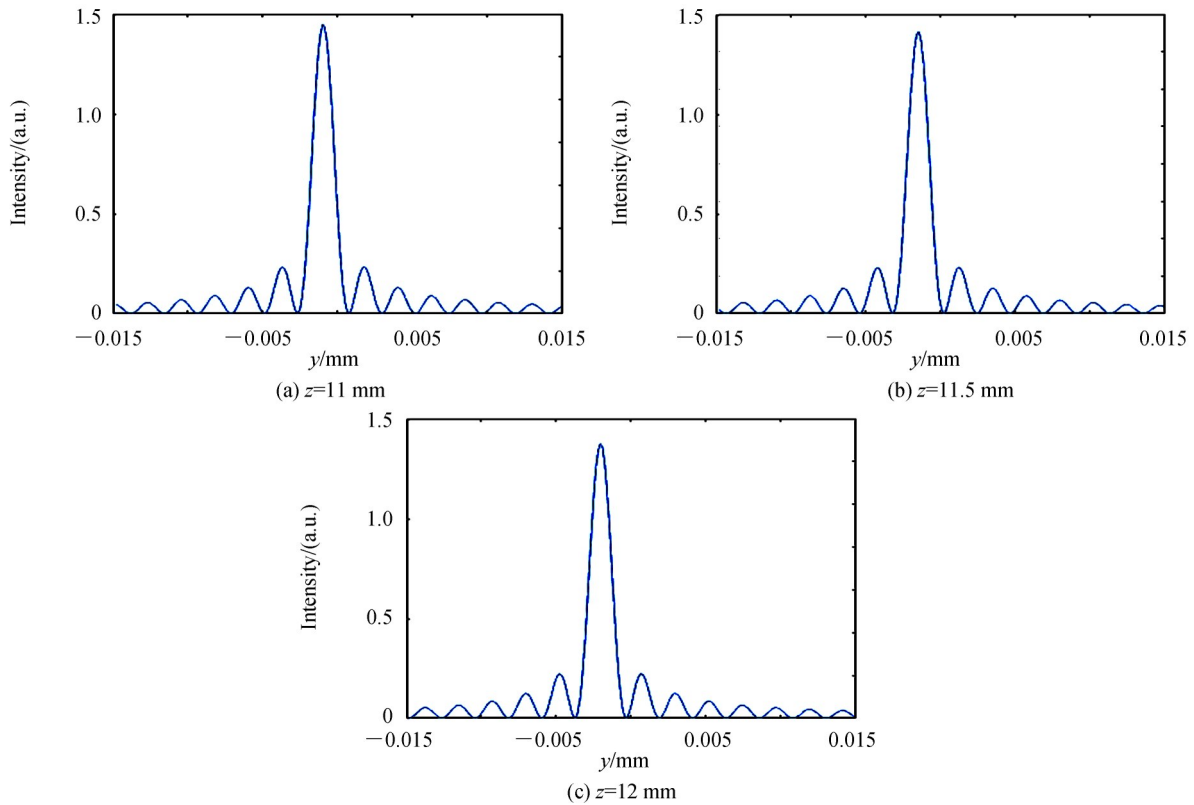


图6 贝塞尔镜头失调情况下不同的光束传输距离处的贝塞尔光束横向光强分布

Fig. 6 Cross section intensity distribution of Bessel beam at different propagation distances while Bessel lens is misaligned

同时,为了保证镜头设计的可实现性,确定系统元件的激光损伤阈值范围,对贝塞尔镜头中轴锥镜、透镜 L1 和透镜 L2 进行了能量密度仿真(输入单脉冲能量为  $100 \mu\text{J}$ ). 仿真结果如图 7 所示,可以得到,轴锥镜、透镜 L1 和透镜 L2 的入射面的最大能量密度分别小于  $3.36 \times 10^{-4} \text{J}/\text{cm}^2$ 、 $10^{-2} \text{J}/\text{cm}^2$ 、 $10^{-2} \text{J}/\text{cm}^2$ .

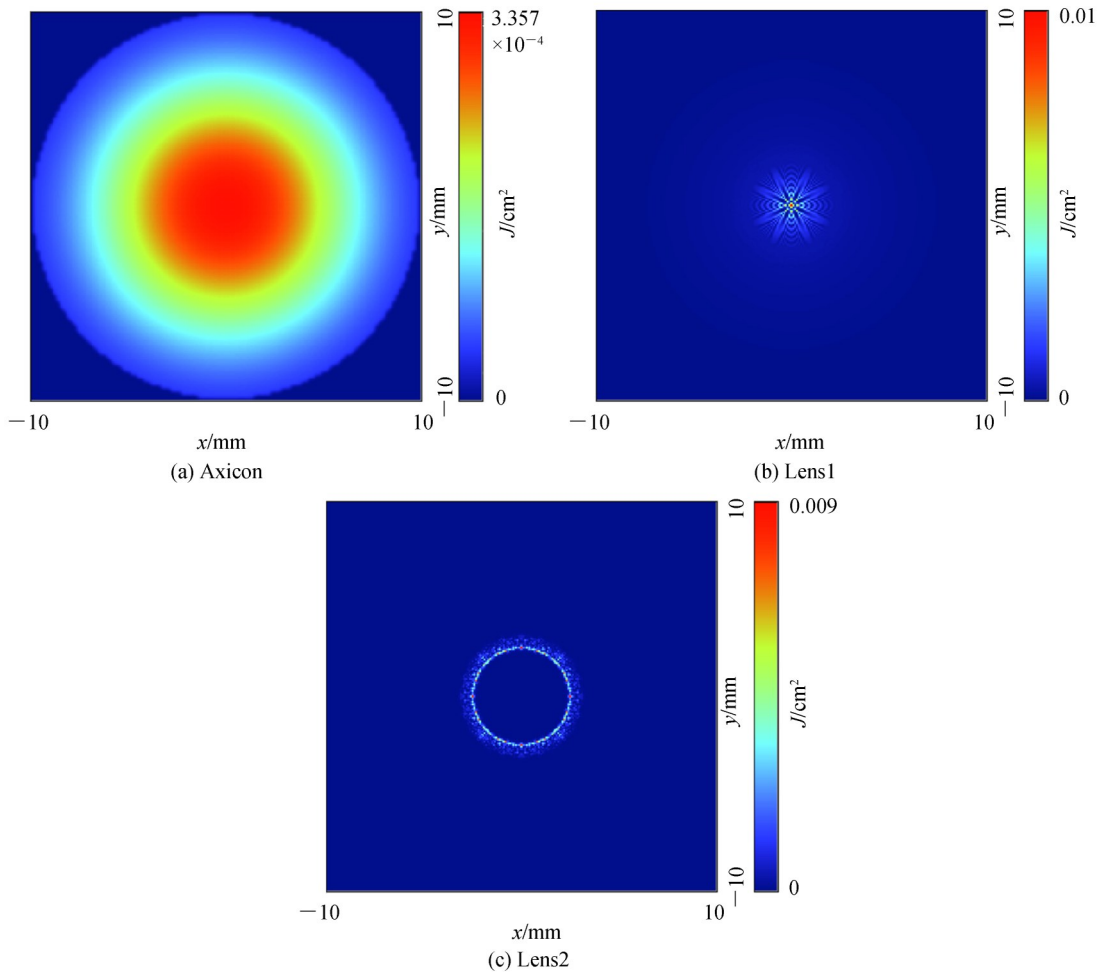


图7 系统元件入射面能量密度仿真结果

Fig. 7 Energy density simulation of the incident surface of system components

### 3 贝塞尔镜头的性能检测

根据上节所述贝塞尔光束的设计仿真结果,其中心主瓣直径和无衍射传输距离分别为微米和毫米量级,常用的光束质量分析仪最小像元间距一般为几微米,难以达到有效像素数的要求,同时光束传输方向上的导轨精度也难以满足无衍射传输距离位移精度的要求.为了能够准确地检测得到贝塞尔光束参数,验证贝塞尔镜头是否满足性能要求,设计并搭建一套光束检测系统.

在光束检测系统中,设计由两个透镜L3、L4组成的双远心光学系统,其原理与透镜L1和L2构成的双远心光学系统一致,对采用贝塞尔镜头产生的光束进行放大,使具有更大中心主瓣直径、更长无衍射传输距离的贝塞尔光束由光束质量分析仪直接检测,并可以根据检测得到的光束中心主瓣直径与无衍射传输距离,逆推出放大前的贝塞尔光束参数.光束质量分析仪采用Ophir公司的SP928相机,其工作面积为 $7.1\text{ mm} \times 5.3\text{ mm}$ ,最小像元间距为 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ ,为了保证检测精度,检测得到放大后的贝塞尔光束中心主瓣直径应超过10个有效像素数,经计算分析,双远心光学系统的横向放大率大于 $3.7 \times 10 / 3.4 = 10.88$ ,设定透镜L3和L4的焦距分别为 $10\text{ mm}$ 、 $128\text{ mm}$ ,因此光束检测系统的横向和轴向放大率分别为12.8和 $12.8^2$ .

贝塞尔光束检测系统光路结构如图8所示,主要由激光器、变倍望远镜、调整单元、贝塞尔镜头及成像单元构成.

为了方便系统测试,降低能量衰减压力,光束检测系统采用中心波长为 $1\ 064\text{ nm}$ 的连续激光器(平均功率为 $1\ 000\text{ mW}$ )作为激光光源,通过变倍望远系统 $10 \times$ 扩束达到光束直径为 $18\text{ mm}$ 的准直激光光束.调整单元由衰减片和小孔光阑组成,分别用于调节激光能量以保证光束质量分析仪正常工作和满足入射光束直径的要求.

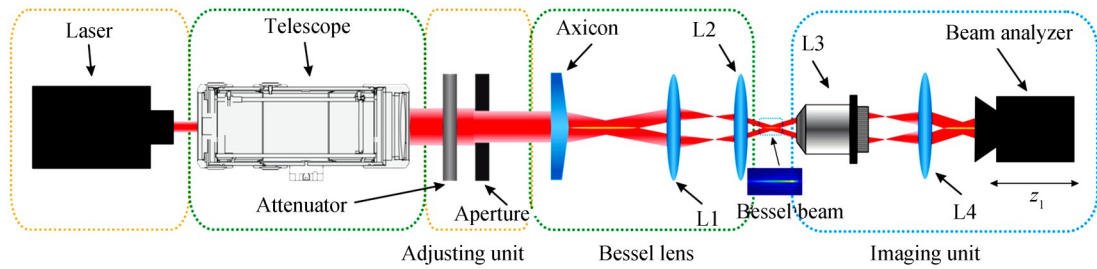
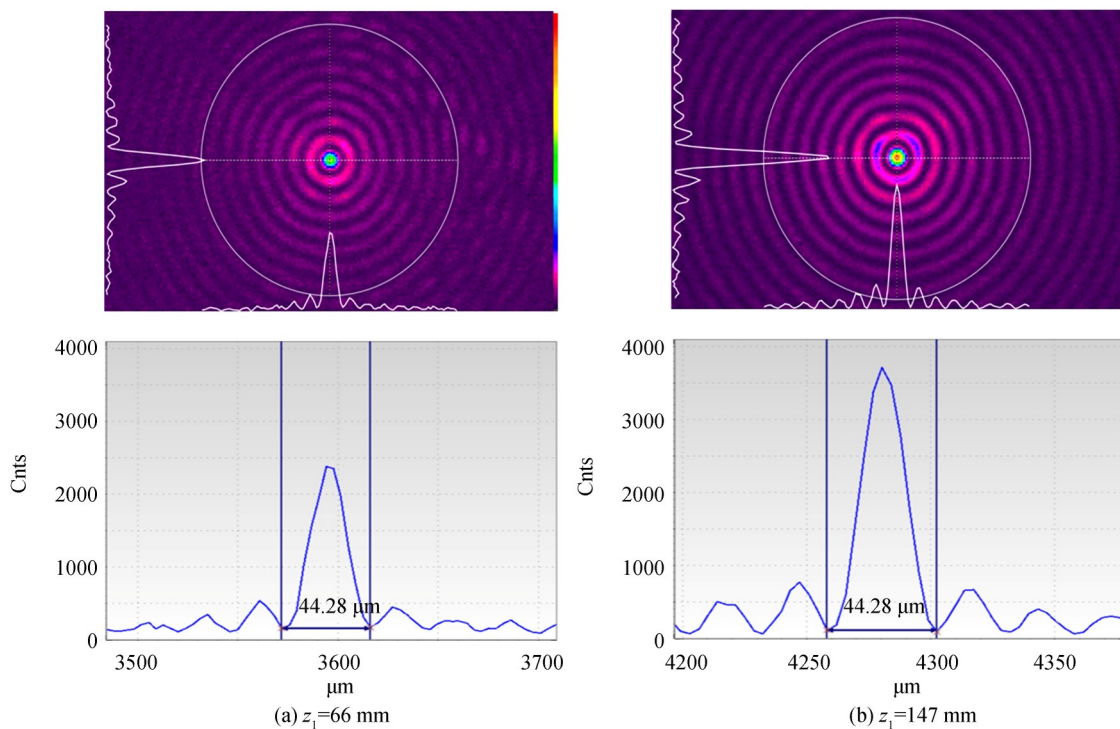


图8 贝塞尔光束检测系统结构图

Fig. 8 System configuration for measuring the Bessel beam generated by the Bessel lens

成像单元由两个透镜L3、L4、光束质量分析仪及手动光学导轨组成.其中,透镜L3采用长工作距离的高NA无限共轭物镜( $20\times/\text{NA}0.45/\text{NIR}$ ),透镜L4采用直径为1英寸的双凸透镜,焦距为128 mm.手动光学导轨的分辨率约为0.5 mm,根据轴向放大率,在光束传输方向上的导轨精度换算成放大前的贝塞尔光束无衍射传输距离,位移精度可达 $3\ \mu\text{m}$ .通过沿着光束传输方向在导轨上移动光束质量分析仪,可检测得到不同传输距离处的贝塞尔光束横向光强分布并推算出无衍射传输距离.

在系统检测过程中,为了能够直观地检测得到放大后贝塞尔光束的起始和结束位置,参考式(7),调整高NA无限共轭物镜L3的前焦面与放大前的贝塞尔光束起始位置(在此贝塞尔镜头中,即为透镜L2的后焦面位置)重合,此时放大后贝塞尔光束的起始位置约为透镜L4的后焦面位置,定义此处为 $z_1 = 0$ .在不同的光束传输距离处检测得到的光束横向光强分布如图9(a)~(d)所示,可以看出其符合贝塞尔光束分布特性,光束中心主瓣直径基本保持不变,约为 $44.28\ \mu\text{m}$ .检测得到的放大后贝塞尔光束轴上光强分布曲线如图10所示,与仿真的轴上光强分布曲线(图3(c))基本吻合,根据观察到的贝塞尔光束的起始和结束位置,确定其无衍射传输距离,约为435 mm.同时,根据式(1)和式(2),可以得到放大前的贝塞尔光束中心主瓣直径和无衍射传输距离分别为 $3.46\ \mu\text{m}$ 和2.66 mm,与设计及仿真结果基本相符.





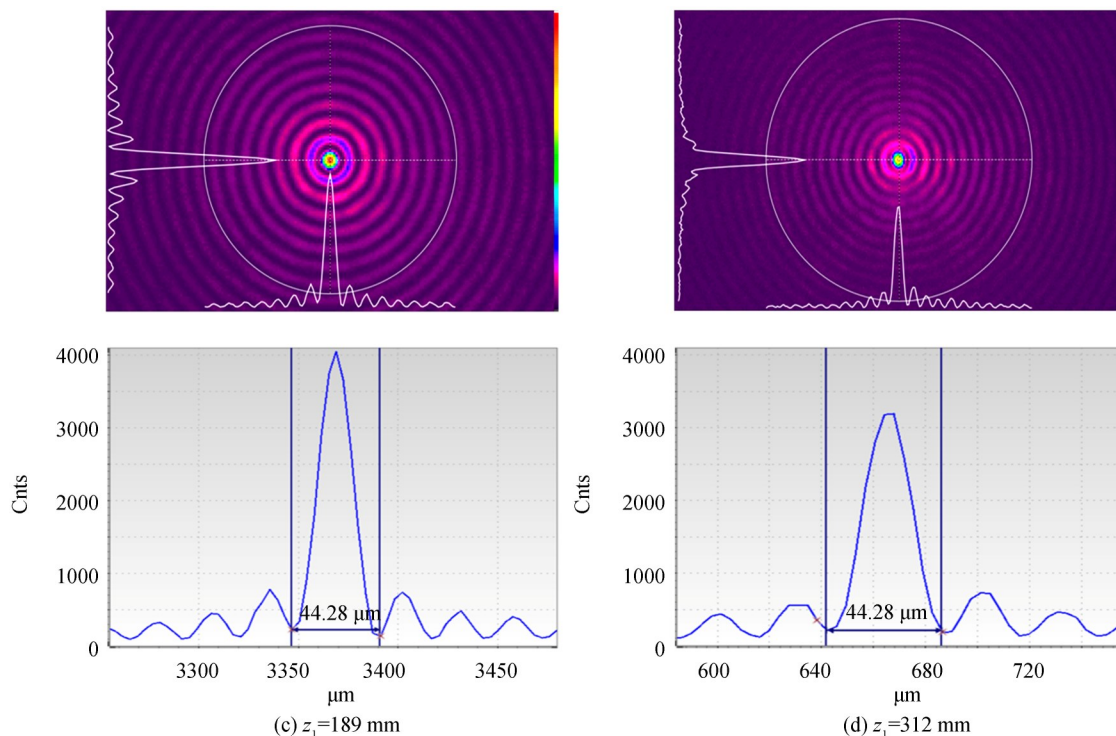


图9 检测得到的不同光束传输距离处贝塞尔光束横向光强分布  
 Fig. 9 Cross section intensity distribution of Bessel beam measured at different propagation distances

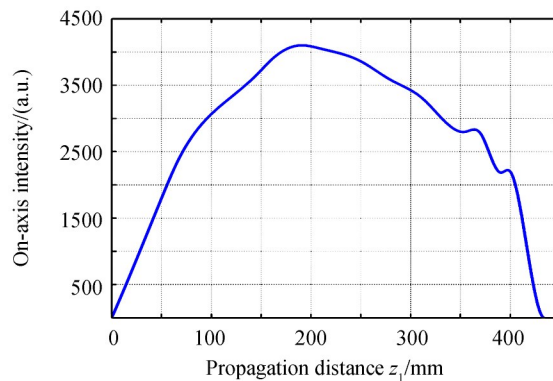


图10 检测得到的贝塞尔光束轴上光强分布  
 Fig. 10 On-axis intensity distribution of the measured Bessel beam

#### 4 贝塞尔镜头的实验验证

为了验证设计贝塞尔镜头的实际加工效果,利用中心波长为 1 064 nm 的皮秒脉冲激光器(脉冲宽度为 15 ps,重复频率为 50~200 kHz)与贝塞尔镜头产生皮秒贝塞尔光束,对厚度为 1 mm 的硅酸盐玻璃进行切割实验,实验装置如图 11 所示,皮秒脉冲激光器发出的激光束经扩束,产生光束直径为 18 mm 的准直光束,其经转向后自上而下入射通过贝塞尔镜头,在水平放置的待切割玻璃厚度方向上产生贝塞尔光束。

在玻璃切割实验之前,利用酒精对待切割玻璃表面进行简单清洁处理后,将其固定在位移工作台上,并调节贝塞尔镜头的高度,使产生的皮秒贝塞尔光束无衍射传输距离覆盖玻璃的厚度.为了降低贝塞尔光束旁瓣能量对玻璃的影响,在切割实验前还需对激光器单脉冲能量、重复频率及位移工作台的扫描速度等工艺参数进行调整,使贝塞尔光束主瓣高于旁瓣的激光能量密度达到玻璃的烧蚀阈值.通过工艺参数分析,设定激光器重复频率为 100 kHz,单脉冲能量为 100 μJ,位移工作台扫描速度即玻璃切割速度为 600 mm/s.在玻璃切割实验过程中,皮秒贝塞尔光束固定不动,位移工作台带动玻璃沿设定的切割路径进行扫描移动.扫描完成后,采用光学显微镜观察在玻璃表面形成的一系列微孔,玻璃前、后表面的图像分别如图 12(a)和(b)

所示,由于单脉冲能量具有一定的波动性以及光束传输方向上贝塞尔光束主瓣光强的变化,因此,玻璃表面的一系列微孔直径均小于 $3\ \mu\text{m}$ ,不超过贝塞尔光束主瓣直径.最后,通过裂片工艺实现玻璃的切割分离,图12(c)为其切割分离面的光学显微镜图像,结果显示,切割分离面无较大裂纹及崩边,有效提高了玻璃切割质量.

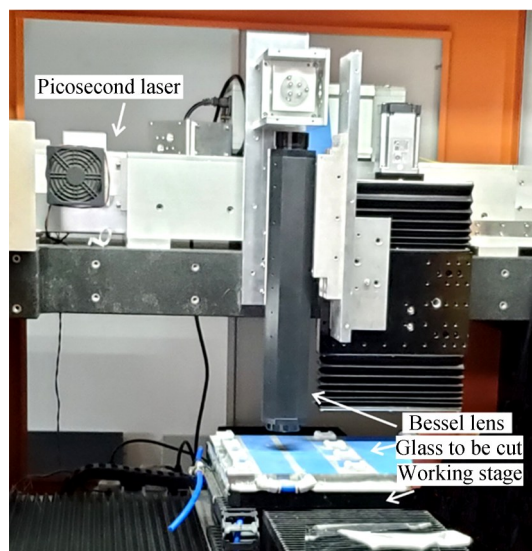


图 11 利用皮秒贝塞尔光束切割硅酸盐玻璃的实验装置  
Fig. 11 Experiment setup for cutting silicate glass by picosecond Bessel beam

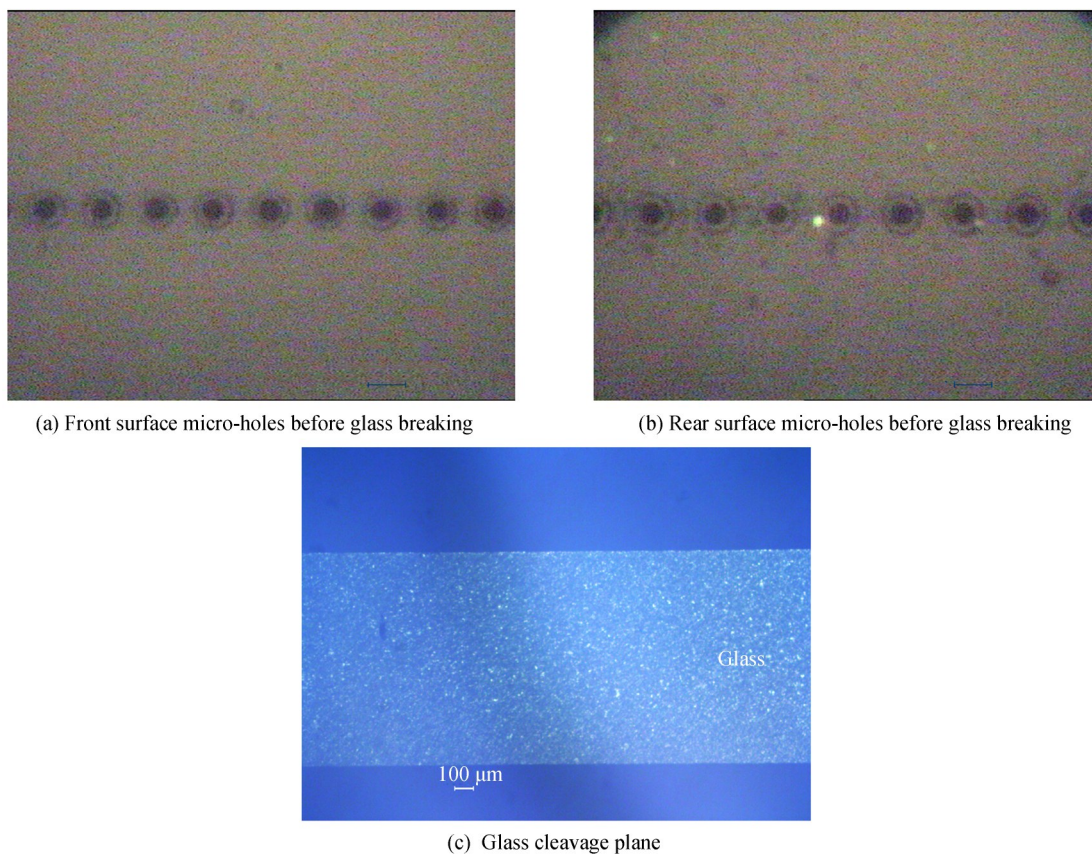


图 12 光学显微镜图像  
Fig. 12 Optical microscope images

## 5 结论

结合玻璃激光切割应用需求,设计并研制了一套贝塞尔镜头及光束检测系统,此镜头利用双远心光学系统对高斯光束经轴锥镜产生的贝塞尔光束进行调制,保证一定工作距离的同时,有效提高贝塞尔光束的锥角大小,使光束中心主瓣直径与无衍射传输距离满足玻璃激光切割的实际应用要求.在光束检测系统中,针对采用贝塞尔镜头产生的光束存在中心主瓣直径过小和无衍射传输距离较短的情况,利用双远心光学系统对贝塞尔光束进行有效放大,使中心主瓣直径和无衍射传输距离满足检测条件.检测得到的光束中心主瓣直径大小、无衍射传输距离等参数与设计结果吻合,验证了光束检测系统的准确性.利用皮秒脉冲激光器与设计的贝塞尔镜头对厚度为1 mm的硅酸盐玻璃进行切割实验验证,玻璃分离前的表面微孔直径不超过设计的贝塞尔光束中心主瓣直径.本文设计的贝塞尔镜头及光束检测系统对无衍射光束产生、传输与变换及应用等领域具有广泛的参考价值,尤其在微纳激光加工领域,对加工效率的工艺研究有较高的应用价值.

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] XING Song-ling, LIU Lei, ZOU Gui-sheng, et al. Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. *Chinese Journal of 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.
- [3] DURBIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(15): 1499-1501.
- [4] HAFIZI B, SPRANGLE P. Diffraction effects in directed radiation beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, **8**(5):705-717.
- [5] LIU Hui-long, HU Zong-hua, XIA Jing, et al. Generation and applications of non-diffraction beam [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(21): 214204.  
刘会龙,胡总华,夏菁,等.无衍射光束的产生及其应用[J].物理学报,2018,**67**(21):214204.
- [6] HERMAN R M, WIGGINS T A. Production and uses of diffractionless beams [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, **8**(6): 932-942.
- [7] POLESANA P, COUAIRO A, FACCIO D, et al. Observation of conical waves in focusing, dispersive, and dissipative Kerr media[J]. *Physical review letters*, 2007, **99**(22): 223902.
- [8] LEI Ming, YAO Bao-li. The explanation of Bessel-like beam from axicon with three-beam interference model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):146-148.  
雷铭,姚保利.用三光束干涉模型解释锥镜产生类贝塞尔光束[J].光子学报,2006,**35**(1):146-148.
- [9] JIANG Zhi-ping, LU Qi-sheng, LIU Ze-jin, et al. Applications of Bessel beam: a review [J]. *Optical Technology*, 1997 (1): 1-9.  
蒋志平,陆启生,刘泽金,等.贝塞尔光束的应用[J].光学技术,1997(1):1-9.
- [10] COURVOISIER F, ZHANG J, BHUYAN M K, et al. Applications of femtosecond Bessel beams to laser ablation [J]. *Applied Physics A*, 2013, **112**(1): 29-34.
- [11] YE L, PERRIE W, ALLEGRE O J, et al. NUV femtosecond laser inscription of volume Bragg gratings in poly (methyl) methacrylate with linear and circular polarizations [J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(12): 126004.
- [12] BHUYAN M K, COURVOISIER F, LACOURT P A, et al. High aspect ratio nanochannel machining using single shot femtosecond Bessel beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(8): 081102.
- [13] RAPP L, MEYER R, GIUSTI R, et al. High aspect ratio micro-explosions in the bulk of sapphire generated by femtosecond Bessel beams [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 34286.
- [14] XIN Chen, YANG Liang, HU Zhi-jiang, et al. Microtube fabrication based on femtosecond Bessel beam and its flexible driving with external magnetic field [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(12): 1180-1186.  
辛晨,杨亮,胡治江,等.飞秒贝塞尔光用于可磁驱动微管道的高效加工[J].光电工程,2017,**44**(12):1180-1186.
- [15] WU Feng-tie, JIANG Xin-guang, LIU Bing, et al. Geometric optics analysis on self-reconstruction of the nondiffracting beam generated from an axicon [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3125-3128.  
吴逢铁,江新光,刘彬,等.轴锥镜产生无衍射光束自再现特性的几何光学分析[J].物理学报,2009,**58**(5):3125-3128.
- [16] LIANG Xiao-jing. Study on propagation and transformation of Bessel beams [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 25-27.  
梁晓晶.贝塞尔光束的传输变换特性研究[D].天津:天津大学,2015:25-27.
- [17] ZHANG Bin, LÜ Bai-da. Analyzing the propagation properties of diffraction-free beams [J]. *Laser Technology*, 1996, **20** (1): 14-19.  
张彬,吕百达.无衍射光束的传输[J].激光技术,1996,**20**(1):14-19.
- [18] ARLT J, DHOLAKIA K, ALLEN L, et al. Efficiency of second-harmonic generation with Bessel beams [J]. *Physical Review A*, 1999, **60**(3):2438-2441.
- [19] ZHAI Zhong-sheng, ZHAO Bin. Study on property of central spot of non-diffracting beams [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(5): 480-483.  
翟中生,赵斌.无衍射光束中心光斑的特性研究[J].激光技术,2008,**32**(5):480-483.

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 61805264), Intergovernmental International Cooperation Program in Science and Technology Innovation (No. 2016YFE0110600), Shanghai Sailing Program (No. 18YF1426500), Natural Science Foundation of Shanghai (No. 19ZR1464300)