

## 单脉冲能量 3 mJ、重复频率 1 kHz 皮秒超高斯光束的实现

卢 尚, 吕思奇, 陈 檬\*, 彭红攀, 杨 策, 张 携

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 采用圆孔光阑和空间滤波-像传递系统相结合, 实现了高效率的皮秒高斯光束到超高斯光束的整形。通过研究其中空间滤波-像传递系统中滤波针孔大小对整形效果的影响, 获得了整形效率大于 32%、200~500 mm 传播距离内保持超高斯光束填充因子大于 0.76 传输的实验结果。随后对获得的超高斯光束进行放大, 放大过程中通过利用侧面泵浦 Nd:YAG 晶体的热透镜代替放大光路中 4F 系统像传递系统中的透镜, 简化了超高斯皮秒激光放大系统的结构, 同时经过一级双通放大后, 获得了近场填充因子 0.72, 单脉冲能量 3.0 mJ, 脉冲宽度 11 ps, 重复频率 1 kHz, 峰值功率密度 8 GW/cm<sup>2</sup> 的超高斯光束皮秒激光放大输出。

**关键词:** 固体激光器; 超高斯激光; 光束整形; 空间滤波像传递系统; 功率放大

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1005012

## Realization of single-pulse energy 3 mJ, repetition frequency 1 kHz picosecond super-Gaussian beam

Lu Shang, Lv Siqi, Chen Meng\*, Peng Hongpan, Yang Ce, Zhang Xie

(Laser Engineering Research Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A picosecond beam with Gaussian profile was efficiently shaped into a super-Gaussian profile beam by a circular aperture combined with a spatial filter-image relaying system. By studying the influence of the size of the filter aperture on the shaping effect in the spatial filter-image relaying system, the experimental results for maintaining the filling factor of the super-Gaussian beam greater than 0.76 in the propagation distance of 200 mm to 500 mm was obtained, and the corresponding efficiency of this beam shaping method was over 32%. Then, the beam with a super-Gaussian distribution was amplified. By using the thermal lens of semiconductor laser side pumped Nd:YAG crystal to replace the lens in the 4F image relaying system, the structure of the super-Gaussian picosecond laser amplification system can be simplified. After double-passing the single Nd:YAG crystal, a picosecond super-Gaussian profile beam with a near-field fill factor of 0.72, 1 kHz repetition rate, 11 ps duration and 3.0 mJ single-pulse energy was obtained, and the corresponding peak power

收稿日期: 2019-05-11; 修订日期: 2019-06-21

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金(U1631240)

作者简介: 卢尚(1992-), 男, 硕士生, 主要从事皮秒固体激光器方面的研究。Email: yuyuwuming@163.com

导师简介: 陈檬(1963-), 女, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事全固态纳秒、皮秒、倍频激光器件等方面的研究。

Email: chenmeng@bjut.edu.cn

intensity was up to 8 GW/cm<sup>2</sup>.

**Key words:** solid-state laser; super-Gaussian laser; beam shaping; spatial filter-image relaying system; power amplification

## 0 引言

近年来,高峰值功率、高单脉冲能量超快激光的飞速发展使非线性光学也得到了广泛的关注,如:光学倍频、光学和频、光学差频、光参量放大和光参量振荡等<sup>[1-3]</sup>。超强皮秒激光脉冲作为光参量啁啾脉冲放大的有效泵浦源,更是得到了国内外的关注与研究<sup>[4-5]</sup>。超快激光由于其极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,在激光微加工<sup>[6]</sup>、材料表面改性<sup>[7-8]</sup>、激光测距<sup>[9]</sup>等方面也有特别重要应用。将高斯分布的光束整形成平顶分布,即超高斯光束,是获得超强皮秒激光光源的重要条件,不仅有利于放大过程中的能量提取、避免放大过程中由于光斑中心过高峰值功率密度对增益介质的损伤,也是提高高功率下非线性频率转化效率的途径。超高斯光束的填充因子越高越有利于放大时的能量提取效率和非线性频率转换效率,然而高的填充因子势必会降低光束整形时的整形效率,因此在整形过程中需对高填充因子和高整形效率进行权衡。

目前,光束整形方法有圆孔光阑法、非球面镜法、液晶空间调制器法,以及空间可变波片(SVWP)法等<sup>[10-13]</sup>。其中圆孔光阑整形方法简单、易实现、适用性强,但由于有限孔径上的子波干涉,导致光束经过有限孔径后在近场区域光强分布不均匀,例如会在传播路径的光轴上产生沿着传播路径变化的光强调制,也会在横向光强空间分布上产生高频衍射调制,降低光束的填充因子。为解决上述问题,人们在圆孔光阑后增加一个空间滤波器,典型的空间滤波器由两个凸透镜和一个放置于两凸透镜重合的焦点上的针孔组成,空间滤波器可以有效抑制轴上光强调制和衍射调制。但是,较小的圆孔光阑和空间滤波器中的针孔,导致该整形方法的光能量损耗很大,即整形效率低,参考文献[14]报道的整形效率仅为 6%,较低的效率增加了后续放大系统的难度以及成本。

文中通过研究空间滤波器中滤波针孔大小对轴上光强调制和衍射调制的影响,确定了最佳孔径大小,一方面保证了圆孔整形法的超高斯光束近场分布的高填充因子,另一方面,增大了滤波器中针孔的孔径,使圆孔光阑法的整形效率得到提高。随后对整形后的平顶光束进行了放大,同样,为避免放大路径上的光强调制,保持其高的填充因子,也需要在放大光路中加入像传递系统,文中采用将放大级泵浦模块(增益晶体)的热焦距替代像传递系统中的透镜,降低了平顶光束放大系统的复杂性,并获得了单模块一级双通放大 14 倍的放大倍率和峰值功率密度 8 GW/cm<sup>2</sup> 的高填充因子的皮秒超高斯光束放大输出。

## 1 光束整形

实验中激光系统结构如图 1 所示,包括种子源、光束整形、功率放大。种子源为自制的 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>-SESAM 锁模皮秒激光器以及 1 kHz-LD 泵浦 Nd:YAG 再生放大器,种子源输出参数为:最大平均功率 1 W,重复频率 1 kHz,脉宽 11 ps 的高斯光束。

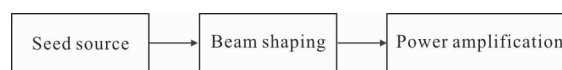


图 1 激光系统结构图

Fig.1 Structure of the laser system

### 1.1 光束整形光路

整形光路如图 2 所示,L1 为曲率半径-75 mm 的平凹透镜,L2、L3 均为平凸透镜,凸面曲率半径分别为 150、200 mm,所有透镜对波长 1 064 nm 透过率大于 99.8%。T1 为通光口径 1.5 mm 的固定圆孔光阑,T2 为可变光阑。图中薄膜偏振片、法拉第旋光器、二分之一波片以及薄膜偏振片组成光隔离器。

高斯种子光束经过光隔离器后通过透镜 L1 扩

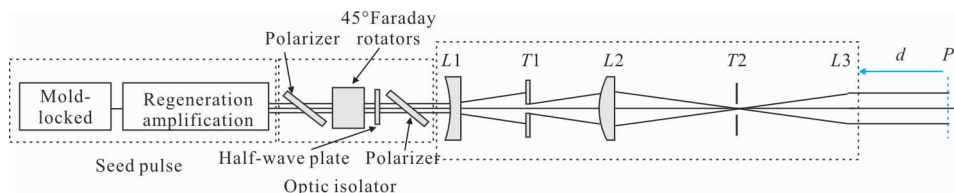


图 2 整形光路

Fig.2 Beam shaping optical layout

束,再经过固定小孔  $T1$  实现高斯光束到平顶光束的整形变换,再经  $L2$ 、 $L3$  和  $T2$  组成的空间滤波-像传递系统,最后到 CCD 上。 $T1$  和  $P$  为物象对应面,透镜  $L3$  和 CCD 之间的距离为  $d$ 。

### 1.2 整形结果与分析

根据惠更斯-菲涅耳衍射理论,入射光场  $\tilde{E}(\zeta, \eta)$  通过圆孔光阑  $\Sigma$  后的衍射场为<sup>[15]</sup>:

$$\tilde{E}(x, y, z) = \frac{z}{j\lambda} \iint_{\Sigma} \tilde{E}(\zeta, \eta) \frac{\exp(jkr)}{r} d\zeta d\eta \quad (1)$$

式中: $\tilde{E}(\zeta, \eta)$  为圆孔光阑上任意一点的复振幅; $\tilde{E}(x, y, z)$  为观察面上任意一点的复振幅, $\lambda$  为波长,波数  $k=2\pi/\lambda$ ;  $d\zeta d\eta$  为对圆孔光阑范围  $\Sigma$  积分的微元。

$$r = \sqrt{(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \quad (2)$$

填充因子  $FF$  用来描述超高斯光束的均匀性,其表达式为<sup>[12]</sup>:

$$FF = \int I(x, y) ds / (I_{\max} S) \quad (3)$$

式中: $S$  为光束截面。对超高斯光束来说,填充因子

越高,光斑分布越均匀。

利用 ZEMAX 软件对上述圆孔整形法进行模拟,结果如图 3 所示,横坐标为探测面  $P$  距圆孔光阑  $T1$  的距离,纵坐标为相对光强,  $FF$  表示对应光强分布的填充因子。可以看出,整形后的超高斯光束在传输 10 mm 的非常近的区域,保持着较高填充因子的平顶效果;随着传输距离的增加,小尺度高频光强调制越来越严重,使填充因子减小,最终失去平顶分布效果。为使其在一定距离外的放大系统中仍保持较好的平顶分布,通过增加像传递系统(参见图 2),以小孔  $T1$  为物面成像到后级放大系统,同时利用像传递系统中间焦点处放置的针孔组成空间滤波像传递系统,以减小平顶光束传输过程中的高频调制,从而将高填充因子超高斯光束传递到后级放大系统。

研究发现,传递效果与所加针孔孔径大小有很大关系,图 4 为用 ZEMAX 软件模拟的不同针孔孔径(图 2 中的  $T2$ )下的传递效果(红色线、绿色虚线、黑色线、蓝色虚线表示  $T2$  孔径分别为无穷大(不加

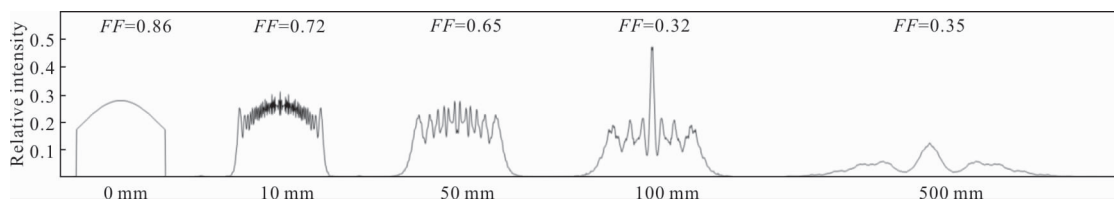


图 3 固定圆孔整形后不同距离模拟结果

Fig.3 Simulation results of different distances after shaping of fixed aperture

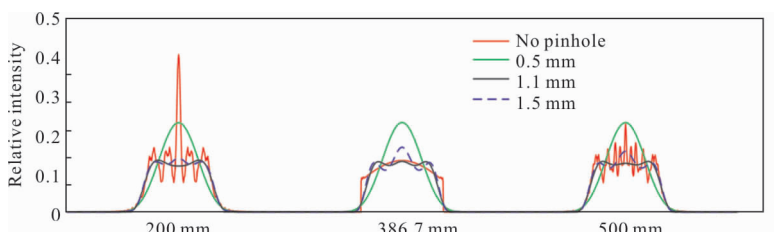


图 4 空间滤波-像传递系统中不同滤波小孔整形效果模拟结果

Fig.4 Simulation results of different filtering aperture shaping effects in spatial filtering-image relay system

滤波小孔)、0.5 mm、1.1 mm、1.5 mm)。横坐标表示  $d$  取不同的值,当  $d=386.7$  mm 时 CCD 位于像面上,表 1 给出了不同针孔大小时不同探测面位置处光斑的填充因子。

表 1 不同针孔大小时不同位置处光束的填充因子

Tab.1 Fill factor for different pinhole sizes at different locations

	No pinhole	0.5 mm	1.1 mm	1.5 mm
200 mm	0.33	0.61	0.8	0.79
386.7 mm	0.86	0.61	0.82	0.69
500 mm	0.52	0.61	0.82	0.72

从图 4 和表 1 可以看出,不加针孔时,在像传递的像面上会有填充因子较高的光斑分布,但当探测面距离前后移动时由于小孔衍射调制的影响,光斑分布开始出现传播轴上的光强调制和高频的衍射调制, $d$  从 386.7 mm 增加到 500 mm 时填充因子从 0.86 降低到 0.52;当针孔孔径为 0.5 mm 时,随着探测面的移动,填充因子几乎没有变化,保持在 0.61,但此时的光斑分布不再具有超高斯分布的特征;当小孔孔径为 1.5 mm 时,随着探测面的移动,高频成分被很好抑制,但是传播轴上的衍射调制依然比较明显,填充因子在 200~500 mm 传播过程中变化较大;当小孔孔径为 1.1 mm 时,随着探测面的移动,高频成分被抑制,相对于其它孔径来说传播轴上的衍射调制也被很好抑制,填充因子一直保持大于 0.8。

根据上面分析结果,课题组进行了  $T_2=1.1$ mm 的整形实验,结果如图 5 所示。图 5(a)~(c)表示 CCD 与透镜  $L_3$  的距离  $d$  分别为 200、386.5、500 mm 时的光强分布,其中图 5(b)为圆孔  $T_1$  通过空间滤波像传递系统后的成像面处的光强分布;根据公式(3)计算可得对应的填充因子分别为 0.76、0.78、0.78。

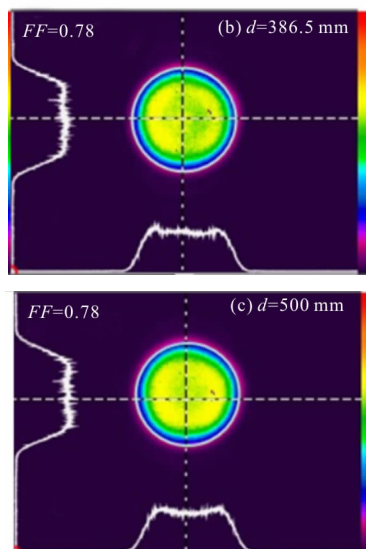
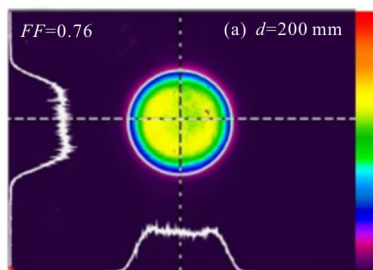


图 5  $T_2=1.1$  mm 时,圆孔整形不同距离处的实验结果  
Fig.5 Experimental results at different distances using a circular aperture when  $T_2=1.1$  mm

从图 5 可以看出,实际整形后光强分布和理论模拟符合很好,在距离 200~500 mm 之间仍是较好的超高斯分布,轴上衍射调制很小,且填充因子几乎不变,有利于后续放大器进行放大。入射圆孔光阑  $T_1$  前的平均功率为 0.65 W,经过圆孔光阑和空间滤波器后平均功率为 0.21 W,计算得整形效率为 32.3%。

## 2 超高斯光束放大

### 2.1 放大光路设计

图 6(a)为传统的加 4F 像传递放大光路,其中 Module1 为半导体激光侧泵模块,增益晶体为 3 mm×65 mm 的 Nd:YAG 棒,掺杂浓度为 1at.%,泵浦方式为半导体激光侧面三项泵浦。端面镀 1 064 nm 增透膜且带 2°楔角;模块泵浦功率 1 200 W(125 A 泵浦电流下,LD 峰-峰值总功率)、重复频率 1 kHz、泵浦脉宽 200 s,占空比为 20%,增益介质对泵浦能量的吸收率约为 50%。 $L_4$  为平凹透镜,用来补偿模块增益晶体热透镜效应,透镜  $L_5$ 、 $L_6$  和光阑  $T_3$  组成 4F 及像传递系统, $P'$  为  $P$  通过 4F 系统所成的像面位置;图 6(b)为用 Module1 中增益晶体热透镜替代透镜  $L_4$  和  $L_5$  的 4F 像传递放大光路。泵浦能量在增益晶体内分布如图 7 所示。图 8 为软件模拟和实验中 CCD 得到的两种放大方式下光斑分布结果,图 8(a)为按照图 6(a)光路放大结果,图 8(b)为按照图 6(b)光路

放大结果,计算得到的两种方式下放大光斑分布填充因子分别为 0.77 和 0.76,说明图6(b)的方案是可行的。

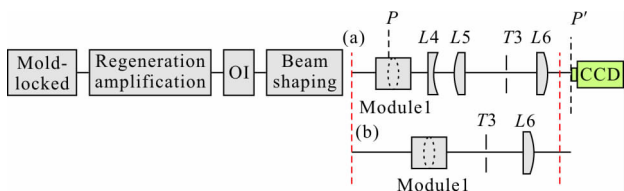


图 6 超高斯光束放大光路(透镜 L4 曲率为 -65 mm, L5 和 L6 曲率都为 60 mm, 增益晶体 Module1 在泵浦电流 125 A 时的热焦距为 120 mm)

Fig.6 Super-Gaussian laser amplification optical layout (Lens L4 has a curvature of -65 mm, L5 and L6 have a curvature of 60 mm, and the gain crystal Module1 has a thermal focal length of 120 mm at a pump current of 125 A)

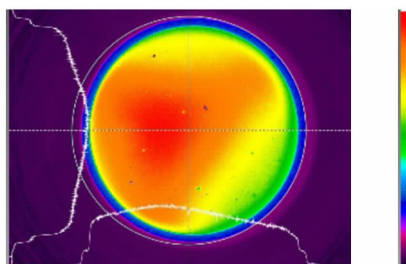


图 7 泵浦能量在增益介质内分布

Fig.7 Distribution of pump energy in the gain medium

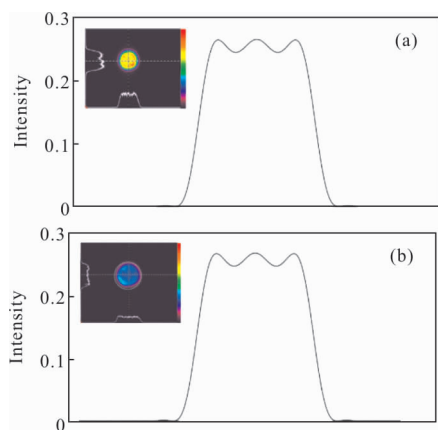


图 8 不同放大光路下模拟(一维分布)和实验(二维分布)光斑分布结果

Fig.8 Results of simulation (one-dimensional distribution) and experimental (two-dimensional distribution) spot distribution under different magnifying optical paths

### 2.2 超高斯光束双通放大结果与分析

在上述研究结果的基础上设计了如图 9 所示的双通放大方案,TFP 为 45° 薄膜偏振片、HR 为

1 064 nm 全反镜。实验中泵浦电流为 125 A,在入射功率为 0.21 W 时得到双通放大输出功率 3 W,计算可得放大能量提取效率为 1.16%, 实验所用模块是针对瓦级种子设计的, 由于实验中种子光能量较弱,不能将模块存储的能量提取出来,因此提取效率较低。双通放大光强分布如图 10(b)所示,光斑大小 2 mm,计算得填充因子为 0.72,由于实验中增益晶体调节原因,使得最后放大光斑分布不圆。用自相关仪测量其脉冲宽度~11 ps,如图 11 所示。

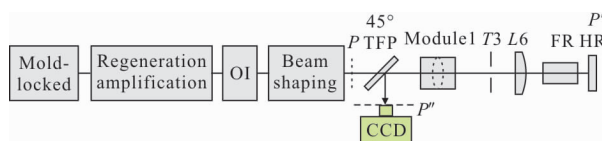


图 9 双通放大光路图

Fig.9 Double-pass amplification optical layout

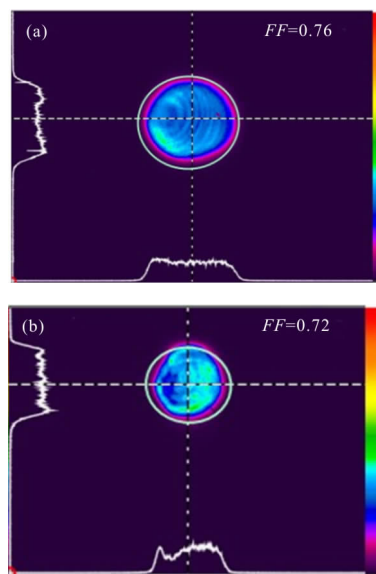


图 10 单通(a)和双通(b)放大像面上光强分布

Fig.10 Single (a) and double (b) pass amplification intensity distribution on the imaging surface

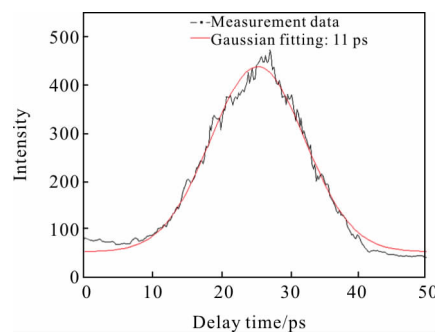


图 11 放大光脉冲自相关信号宽度

Fig.11 Self-correlation signal width of amplification pulse

### 3 结 论

通过圆孔光阑和空间滤波像传递系统实现了填充因子为 0.76、整形效率大于 32% 的高斯到平顶光束整形；研究发现圆孔光阑整形法的整形效果和整形效率受所加空间滤波器中滤波针孔的影响，太小的滤波小孔不仅会使整形效率降低，也会使原本平顶分布的光束退化为高斯光束，过大的滤波小孔则不能很好地减小轴上衍射调制，达不到高填充因子的平顶整形效果。

通过对比不同放大光路下超高斯光束的光强分布特性，提出用放大增益晶体的热透镜替代 4F 系统中的部分透镜，简化了放大系统结构(有利于工程应用及多级放大系统可靠性的提高)，并获得维持高填充因子传播的超高斯光束；最后用此光路，将波长 1 064 nm、单脉冲能量 0.21 mJ、重复频率 1 kHz、脉冲宽度 11 ps 的种子光，经一级双通放大得到单脉冲能量 3 mJ、放大倍率 14 倍、近场填充因子 0.72、峰值功率密度为 8 GW/cm<sup>2</sup> 的皮秒超高斯光束。

#### 参 考 文 献：

- [1] Mao Xiaojie. New progress in high-power picosecond ultraviolet laser[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 182–190. (in Chinese)
- [2] Yu Guangqi, Wang Peng, Song Wei, et al. Fiber laser pumped multi-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404003. (in Chinese)
- [3] Liu Zhaohong, Wang Yulei, Wang Yirui, et al. Generation of high-energy 284 ps laser pulse without tail modulation by stimulated Brillouin scattering [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14 (9): 71–74. (in Chinese)
- [4] Gao Jiali, Pan Hongxia, Wang Ke. Generation method of femtosecond mid-infrared laser pulse [J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(5): 553–556. (in Chinese)
- [5] Budriūnas R, Stanislauskas T, Adamonis J, et al. 53 W average power CEP-stabilized OPCPA system delivering 5.5 TW few cycle pulses at 1 kHz repetition rate[J]. *Opt Exp*, 2017, 25: 5797.
- [5] Zhao Wanqin, Mei Xuesong, Wang Wenjun. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes (part 2)—experimental study[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0242001. (in Chinese)
- [6] Trtica M S, Gakovic B M, Radak B B, et al. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19 (2): 221–227.
- [7] New choice for industrial micromachining: ultrashort pulse laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 177. (in Chinese)
- [8] Zhao Lijie, Zhou Yanzong, Xia Haiyun, et al. Overview of distance measurement with femtosecond optical frequency comb [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1006008. (in Chinese)
- [9] Gu M, Gan X S. Fresnel diffraction by circular and serrated apertures illuminated with an ultrashort pulsed-laser beam [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(4): 771–778.
- [10] Gao Yuhan, An Zhiyong, Li Nana, et al. Optical design of Gaussian beam shaping [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1464–1471. (in Chinese)
- [11] Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, et al. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1107–1111. (in Chinese)
- [12] Adamonis J, Aleknavicius A, Balickas S, et al. A new beam shaping technique implemented in 150 W 1 kHz repetition rate picosecond pulse amplifier [C]//Cleo: Science and Innovations, 2016: 1–2.
- [13] Noom D E, Witte S, Morgenweg J, et al. High-energy, high-repetition-rate picosecond pulses from a quasi-CW diode-pumped Nd:YAG system [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3021.
- [14] Zhu Zimin. Physical Optics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009:133–138. (in Chinese)