CN 51-1346/O4 ISSN 1003-501X (印刷版) ISSN 2094-4019 (网络版)

光电工程
Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

高斯光束非球面整形系统整形特性研究

张子怡，陈檬，王春磊，相贺鹏，陶锐卿

引用本文:

张子怡，陈檬，王春磊，等. 高斯光束非球面整形系统整形特性研究[J]. 光电工程，2022， **49**(4): 210367.

Zhang Z Y, Chen M, Wang C L, et al. Research on shaping characteristics of Gaussian beam aspheric shaping system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(4): 210367.

https://doi.org/10.12086/oee.2022.210367

收稿日期: 2021-11-17; 修改日期: 2022-01-21

相关论文

大口径光学非球面镜先进制造技术概述
刘锋伟，吴永前，陈强，刘海涛，闫锋涛，张仕杨，万勇建，伍凡
光电工程 2020, **47**(10): 200203 doi: 10.12086/oee.2020.200203

涡旋光束通过非高斯随机粗糙面的场分布特性
吕宏，任程程，刘旭东，党磊
光电工程 2020, **47**(3): 190477 doi: 10.12086/oee.2020.190477

飞秒激光时空整形的电子动态调控微孔加工
张超，李敏，叶柏臣，吴剑英，王智，李晓炜
光电工程 2022, **49**(2): 210389 doi: 10.12086/oee.2022.210389

非球面光学元件的快速制造技术
王龙飞，胡雨旺，张泽光，刘悦，薛常喜
光电工程 2024, **51**(1): 230171 doi: 10.12086/oee.2024.230171

更多相关论文见光电期刊集群网站

OEE 光电工程 Opto-Electronic Engineering
http://cn.oejournal.org/oee

OE_Journal
Website

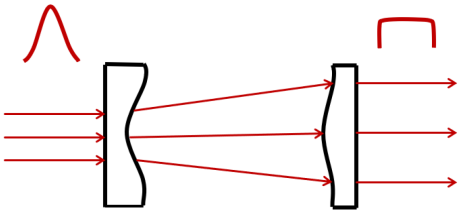
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程

Article

2022 年, 第 49 卷, 第 4 期

DOI: 10.12086/oee.2022.210367

高斯光束非球面整形系统整形特性研究



张子怡，陈　檬*，王春磊，相贺鹏，陶锐卿

北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院，北京 100124

摘要：使用非球面透镜对高斯光束整形的方法已经非常成熟，可以根据入射光参数设计出特定的非球面整形镜。但在使用入射光束束腰以 3 mm 设计的非球面整形镜时发现，非球面整形镜不只适用于设计时的入射参数，在入射光束直径和发散角不同时，整形镜后均会有一个平顶分布最佳的整形位置，该位置随着入射光束直径的增大而远离整形镜，随着发散角的增大而靠近整形镜。为了探究最佳整形位置上整形结果的差异，利用控制变量法进行实验，发现入射光束直径和发散角对该位置上平顶分布的平坦因子没有明显变化，但是光束均匀性和边缘陡度会有最佳值，存在最佳入射参数。为了得到最佳整形位置与入射光束直径和发散角的关系，利用响应曲面法成功建立数学模型，当已知某入射位置处的光束直径和发散角时，可以快速得到最佳整形位置。

关键词：光束整形；非球面透镜；响应曲面法

中图分类号：TN24　　**文献标志码：**A

张子怡，陈檬，王春磊，等. 高斯光束非球面整形系统整形特性研究 [J]. 光电工程，2022，**49**(4): 210367

Zhang Z Y, Chen M, Wang C L, et al. Research on shaping characteristics of Gaussian beam aspheric shaping system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(4): 210367

Research on shaping characteristics of Gaussian beam aspheric shaping system

Zhang Ziyi, Chen Meng*, Wang Chunlei, Xiang Hepeng, Tao Ruiqing

Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: The method of Gaussian beam shaping using an aspheric lens has been very mature, and specific aspheric shaping mirrors can be designed according to the incident light parameters. However, when the aspheric shaping mirror designed with a 3 mm incident beam waist is tested, it is found that the aspheric shaping mirror is not only applicable to the incident parameters in the design. When the incident beam size and divergence angle are different, there will be an optimal shaping position with flat top distribution behind the shaping mirror. The position is far away from the shaping mirror with the increase of the diameter of the incident beam, and close to the shaping mirror with the increase of the divergence angle. In order to explore the difference in shaping results on the optimal shaping position, the control variable method is used to carry out the experiment. It is found that the diameter and divergence angle of the incident light beam have no obvious change in the flat factor of the flat top distribution on the position, but the beam uniformity and edge steepness will have the best value, and there is an optimal incident parameter. In order to obtain the relationship between the optimal shaping position and the incident beam diameter

收稿日期：2021−11−17；收到修改稿日期：2022−01−21

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (U1631240)

*通信作者：陈檬，chenmeng@bjut.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

and divergence angle, a mathematical model is successfully established by using the response surface method. When the beam diameter and divergence angle at an incident position are known, the optimal shaping position can be quickly obtained.

Keywords: beam shaping; aspherical lens; response surface methodology

1 引 言

激光独有的特性使其在众多领域都具有重大应用价值。而在激光加工、激光医疗等领域里，激光光强分布不均匀会导致局部温度过高从而破坏材料性能，因此将高斯光束整形为平顶光束可使激光更有效地应用到各个领域。目前激光光束整形一般使用孔径光阑[1]、非球面透镜[2]、衍射光学元件[3]、微透镜阵列[4]、液晶空间光调制器[5]等整形器件。在众多的整形方法中，非球面镜整形由于其结构简单、高损伤阈值、整形效率高被广泛使用。

1965 年，Frieden[6] 首次提出利用非球面透镜组将高斯光束转化为平顶光束的方法，该方法主要根据能量守恒定律，在出射光线与入射光线之间建立映射函数，达到能量重新分配的效果。1969 年，Kreuzer[7] 提出一种通用的求解整形系统面型参数的方法，并对这种设计方法申请了专利，此设计方法直到今天还在广泛使用，理论上来说，该系统可实现任意波前变换。2011 年，高瑀含[8] 在该方法的基础上结合 zemax 软件的宏语言 (ZPL) 功能实现了系统的自动优化，使非球面整形系统设计更加简单。

在使用非球面整形系统的过程中发现，对不同入射参数的高斯光束整形时，均会在整形镜后找到一个光束呈平顶分布的位置，本文称之为最佳整形位置，通过对不同入射光束直径和发散角的激光束整形，发现与之对应的最佳整形位置也会发生变化，并且平顶分布也会有所差异，因此本文重点探究入射光束光斑大小与发散角对非球面整形镜整形效果的影响，以及它们与最佳整形位置的关系，并通过建模快速得到最佳整形位置的方法。

2 实验准备

2.1 平顶分布均匀性评价方法

根据 ISO 13694:2018 标准[9] 中对平顶光束均匀性的描述，选择以下三种参数作为本文评价整形效果的方法。

平坦因子 (Flatness factor，FF) 用来描述平顶光束顶部平坦程度，当 $FF\to1$ 表明分布趋于理想平顶分布，计算公式：

$$FF = \frac{H_{\mathrm{ave}}}{H_{\max}} . \tag{1}$$

光束均匀性 U (Beam uniformity) 用来描述平顶光束顶部均匀性，当 $U\to0$ 表明平顶分布的顶部越均匀，毛刺越少，计算公式：

$$U = \frac{1}{H_{\mathrm{ave}}}\sqrt{\frac{1}{A}\iint [H - H_{\mathrm{ave}}]^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}y} . \tag{2}$$

边缘陡度 s (Edge steepness) 用来描述平顶光束边缘轮廓，当 $s\to0$ 表明分布的边缘趋近垂直，计算式如下：

$$s = \frac{A_\eta - A_\varepsilon}{A_\eta} . \tag{3}$$

公式中各物理量含义如图 1 所示，本文η为最大值的 0.8 倍，ε为最大值的 0.3 倍。

2.2 非球面整形系统的原理及结构

非球面整形设计的原理最初是在 1965 年由 Frieden[6] 提出，简单描述就是将高斯光束整形为平顶光束的过程中，总能量不变的前提下进行能量的重新分配，即将高斯光束中间部分匀化到边缘，达到整形为平顶的效果，该过程中通过公式推导得到能量重新分配的映射关系，即入射光位置与出射光位置的对应关系，之后根据 1969 年 Kreuzer[7] 提出的非球面面型参数的求解过程得到非球面整形结构。一直以来，非球面整形镜的设计均使用该原理，随着光学设计软件的发展和加工精度的提高，整形结构的设计越来越简便，整形结果也越来越好。

非球面整形系统一般由两片非球面透镜组成，第一片非球面引入波像差使高斯光束能量重新分布，第二片非球面补偿第一片产生的波像差并对出射光束进行准直。该系统分为两种，一种是伽利略型，一种是开普勒型。其中开普勒型非球面镜组中间会有聚焦，当输入光功率很大时，焦点处过强的峰值功率会将空气击穿，产生等离子体，损失能量，因此，该类型只适用于小功率激光器，而伽利略型非球面镜组不存在聚焦点，可适用于更大一些的功率。

2.3 整形镜设计参数及实验装置

实验所用非球面整形镜为伽利略型结构，是以波长 1064 nm，入射光束束腰 3 mm 的基模高斯光束进行设计的，其结构如图 2 所示，设计参数如表 1 所示。

为探究入射光斑大小与发散角对该整形镜整形效果的影响，使用图 3 实验装置进行探究，该实验装置中通过改变聚焦透镜 F 的焦距，达到改变发散角的目的；通过改变透镜 F 与整形系统间的距离达到改变光斑大小的目的。其中，光源使用北京赢圣科技公司 BAOSEC 1-IR 型号激光器，该激光器为 1064 nm 皮秒固体激光器，其出射光功率稳定性好，便于实验，图 4 为激光器测试一小时的功率变化图；CCD 使用

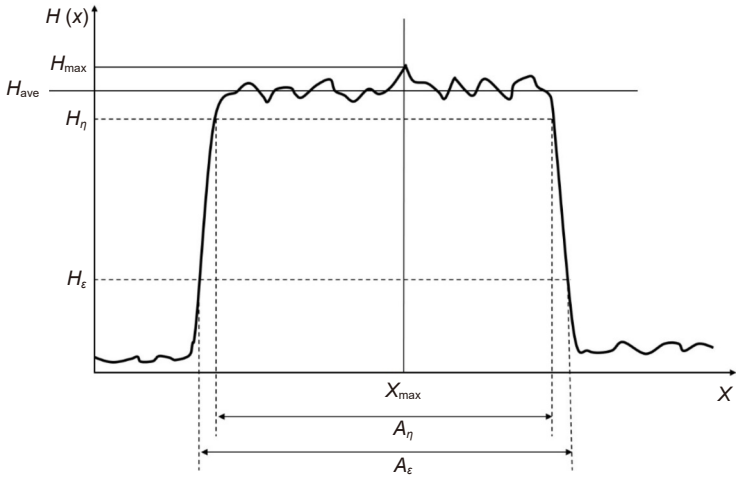


图 1 二维坐标中能量密度分布图解

Fig. 1 Illustration for a uniform energy density distribution $H(x)$ in one dimension

图 2 非球面整形系统结构

Fig. 2 Structure of aspheric shaping system

表 1 非球面整形镜设计参数

Table 1 Design parameters of aspheric shaping mirror

	Radius	Thickness/mm	Glass	Asphere coefficients
			Infinity	
1	−8.090	20	F_SILICA	
2	−17.379	80		k=−4.74 A_4=−2.81*10^{-4} A_6=8.42*10^{-7} A_8=−6*10^{-10}
3	133.384	8	F_SILICA	k=10 A_4=−1.94*10^{-5} A_8=−3*10^{-9}
4	Infinity			

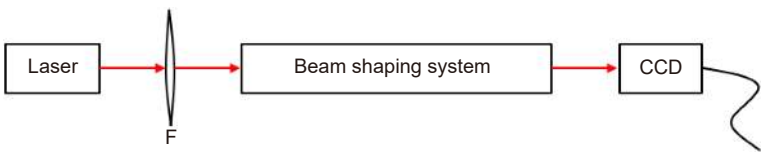


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental device diagram

图 4　激光器功率稳定性测试

Fig. 4　Laser power stability test

DataRay 公司的 WinCamD-LCM 型号进行光斑的探测，可通过 DataRay 软件导出其光斑强度数据，从而进行平顶光束均匀性评价的计算。

3　单因素影响实验

3.1　入射光斑大小对整形效果的影响

使用如图 3 装置，其中透镜 F 的焦距为 200 mm，根据发散角测量方法测得，经过透镜后的光束发散角为 6.5 mrad，改变整形镜的位置，将入射光束直径从 1.0 mm 开始逐渐变大，得到不同入射直径对应的整形最佳位置，以及该位置处的光强分布如图 5，再经过数据处理得到其平坦因子、光束均匀性和边缘陡度，见表 2 。

将表 2 数据进行拟合，分别得到最佳整形位置、平坦因子、光束均匀性、边缘陡度与入射光束直径之间的关系，如图 6。

实验发现随着入射光束直径增加，最佳整形位置越来越靠近整形镜，并且靠近速度逐渐减缓；光束均匀性与边缘陡度均是先变好再变差，存在最佳入射光束直径，通过计算拟合曲线最低点对应横坐标，得到光束均匀性最好的入射光束直径为 1.49 mm，边缘陡度最小的入射光束直径为 1.44 mm。但是研究发现入

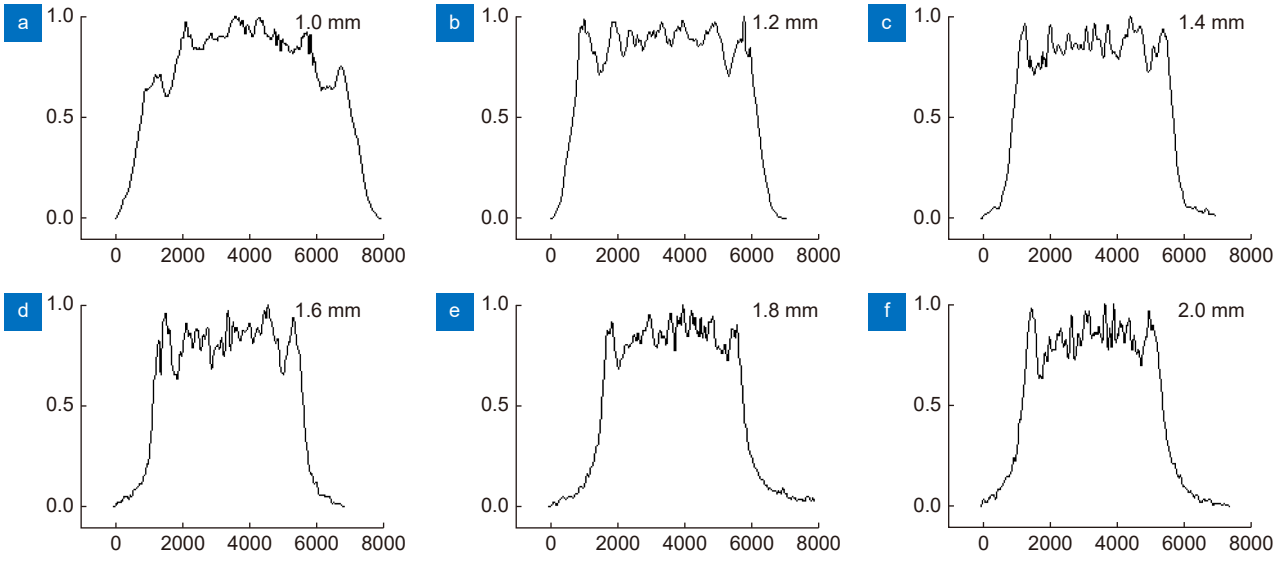


图 5　不同入射光束直径对应的光强分布图。

(a) D=1.0 mm; (b) D=1.2 mm; (c) D=1.4 mm; (d) D=1.6 mm; (e) D=1.8 mm; (f) D=2.0 mm

Fig. 5　Light intensity distribution maps corresponding to different incident beam diameters.

(a) D=1.0 mm; (b) D=1.2 mm; (c) D=1.4 mm; (d) D=1.6 mm; (e) D=1.8 mm; (f) D=2.0 mm

表 2 入射光束直径对非球面整形的影响

Table 2 Influence of incident beam diameter on aspheric shaping

Beam diameter *D*/mm	Optimal shaping position *L*/mm	Flatness factor *FF*/%	Beam uniformity *U*/%	Edge steepness *s*/%
1.0	850	89.8803	20.0794	13.9002
1.1	730	86.7492	17.9022	11.9430
1.2	690	87.9511	16.6073	11.7702
1.3	570	85.2646	15.6862	11.2720
1.4	450	85.2263	15.2206	10.5791
1.5	390	86.3391	15.6993	11.6226
1.6	340	84.3405	15.4293	10.5575
1.7	290	86.5626	15.9967	11.7576
1.8	220	87.5674	17.6968	13.2841
1.9	210	85.6298	18.9863	13.8889
2.0	170	84.0177	18.0513	14.7741
2.2	160	85.6318	22.0324	19.0972
2.4	130	85.9729	24.1604	21.5402

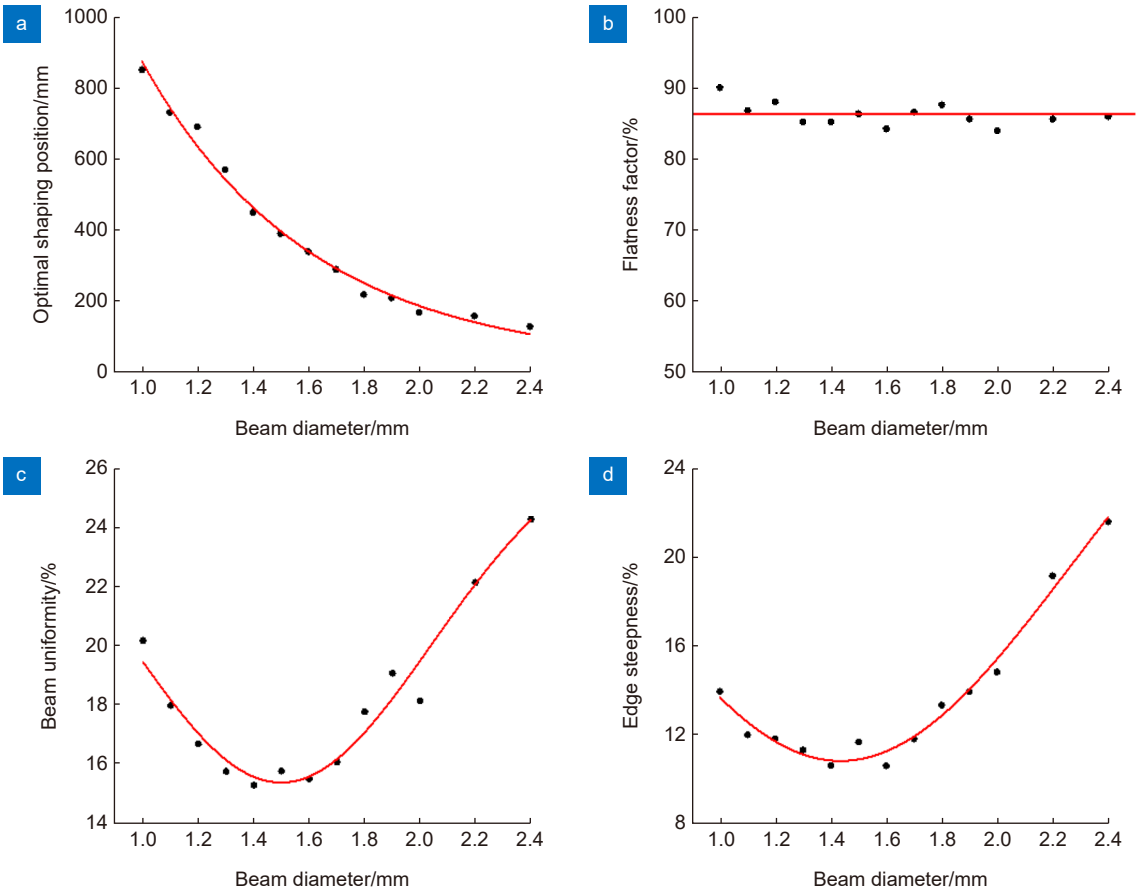


图 6 入射光束直径与最佳整形位置、平坦因子、光束均匀性和边缘陡度的拟合曲线。

(a) *D*-*L* 拟合曲线; (b) *D*-*FF* 拟合曲线; (c) *D*-*U* 拟合曲线; (d) *D*-*s* 拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of incident beam diameter with optimal shaping position, flatness factor, beam uniformity and edge steepness.

(a) *D*-*L* fitting curve; (b) *D*-*FF* fitting curve; (c) *D*-*U* fitting curve; (d) *D*-*s* fitting curve

射光束直径对平坦因子没有明显的影响，平均分布在 86% 左右。

3.2 入射发散角对整形效果的影响

使用如图 3 装置，分别使用不同焦距的透镜改变入射光束的发散角，之后将整形镜放于入射光斑直径为 1.4 mm 的位置处，得到不同入射发散角对应的整形最佳位置，以及该位置处的光强分布如图 7，再经过数据处理得到其平坦因子、光束均匀性和边缘陡度，见表 3 。

将表 3 数据进行拟合，分别得到最佳整形位置、平坦因子、光束均匀性、边缘陡度与入射光束直径之间的关系，如图 8。

实验发现随着入射发散角增加，最佳整形位置越来越靠近整形镜，并且靠近速度逐渐加快；光束均匀性与边缘陡度均是先变好再变差，存在最佳入射发散角，通过计算拟合曲线最低点对应横坐标，得到光束均匀性最好的入射发散角为 8.6 mrad，边缘陡度最小的入射发散角为 8.1 mrad。但是研究发现入射发散角同样对平坦因子没有明显的影响，平均分布在 85% 左右。

4 响应曲面法探究最佳整形位置与入射光束直径和发散角的关系

4.1 实验设计

为了得到最佳整形位置与入射光束直径和发散角之间的关系，本文选择响应曲面法进行探究。通过

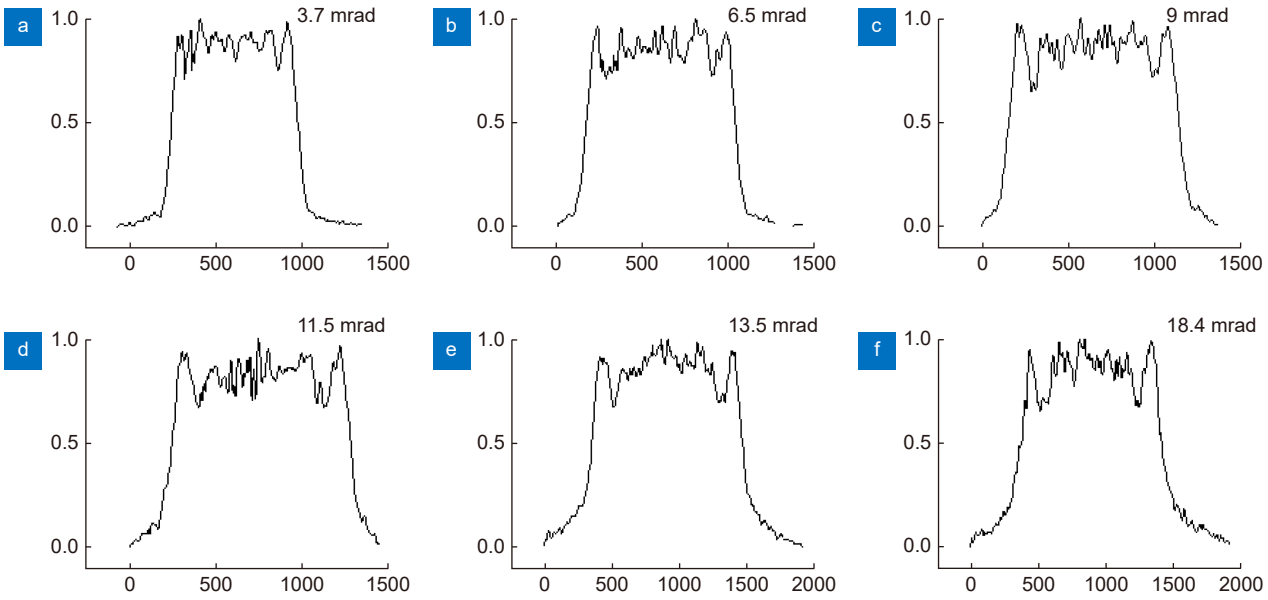


图 7 不同入射发散角对应的光强分布图。

(a) θ=3.7 mrad; (b) θ=6.5 mrad; (c) θ=9 mrad; (d) θ=11.5 mrad; (e) θ=13.5 mrad; (f) θ=18.4 mrad

Fig. 7 Light intensity distributions corresponding to different incident divergence angles.

(a) θ=3.7 mrad; (b) θ=6.5 mrad; (c) θ=9 mrad; (d) θ=11.5 mrad; (e) θ=13.5 mrad; (f) θ=18.4 mrad

表 3 入射发散角对非球面整形的影响

Table 3 Influence of incident divergence angle on aspheric surface shaping

Beam divergence angle θ/mrad	Optimal shaping position L/mm	Flatness factor FF/%	Beam uniformity U/%	Edge steepness s/%
3.7	460	87.2936	17.0394	12.6779
5.7	430	85.4862	17.6772	12.8009
6.5	450	85.2263	15.2206	10.5791
9.0	440	86.3266	16.0942	11.6845
11.5	380	82.9033	15.1435	10.6089
13.5	370	84.4335	16.9548	12.6164
18.4	230	86.4570	21.6925	18.8504

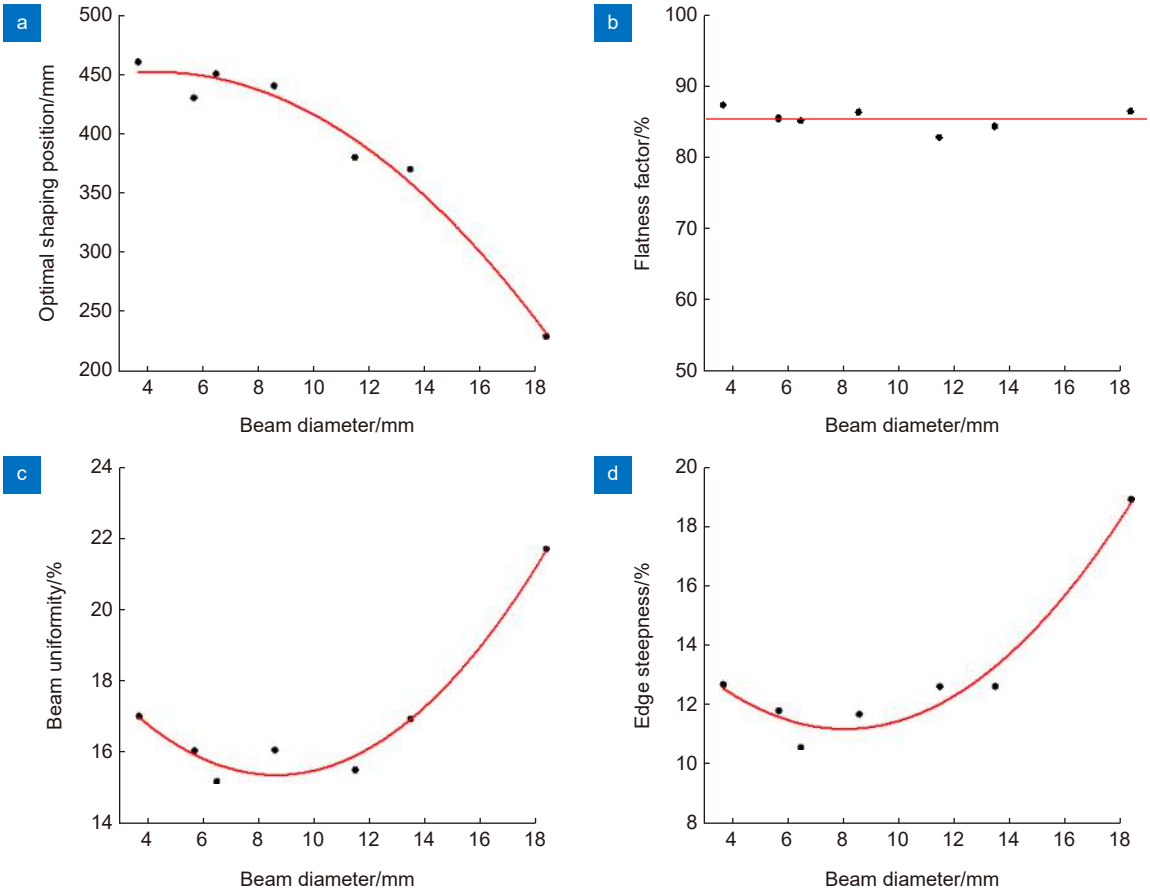


图 8 入射光束发散角与最佳整形位置、平坦因子、光束均匀性和边缘陡度的拟合曲线。

(a) *θ-L* 拟合曲线; (b) *θ-FF* 拟合曲线; (c) *θ-U* 拟合曲线; (d) *θ-s* 拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of incident divergence angle with optimal shaping position, flatness factor, beam uniformity and edge steepness.

(a) *θ-L* fitting curve; (b) *θ-FF* fitting curve; (c) *θ-U* fitting curve; (d) *θ-s* fitting curve

Design-Expert 软件中 Central Composite 实验设计方法进行响应曲面模型的建立，其中入射光束直径与发散角作为两个自变量因素，每个因素设置 5 个水平，光束直径的取值范围为 1 mm~2 mm，发散角的取值范围为 3.7 mrad~13.5 mrad，各因素的实验设计水平如表 4 所示，用 CCD 仪器寻找最佳整形位置并作为因变量，得到实验结果如表 5 所示。

4.2 实验结果分析

根据表 5 的实验数据，应用 Design-Expert 软件得出最佳整形位置的方差分析结果如表 6 所示，模型显著性检验的 P 值<0.0001，远小于界定值 0.05，表明该模型具有统计学意义，且模型较为显著。样本 R^2 是衡量模型拟合度的一个量，其值越接近 1 说明拟合度越好，在本实验中 R^2 值为 0.98，Adj-R^2 为 0.97，预测 R^2 为 0.94，说明实验结果和预测值比较接近。在模型有效的情况下，要求信噪比大于 4，而本实验中信噪比为 33.1。以上表明该模型可表示最佳整形位置与入射光束直径和发散角的关系，并且通过拟合得到预测函数式：

$$L = \exp(8.6417029860107 - 0.038900460479217 \times \theta - 1.5901447596796 \times D), \quad (4)$$

式中：

θ——入射光束发散角；

D——入射光束光斑大小；

L——整形镜后最佳整形位置。

随机选择多组数据对所得预测函数进行验证实验，如表 7 所示。结果表明，最佳整形位置的最大预测误差为 10.19%，该模型能够较好地描述响应，这表明通过响应曲面法建立的模型进行分析和预测是可行的。

表 4 实验影响因素与实验设计水平

Table 4 Experimental influencing factors and experimental design level

Factors	−1	−0.592	0	0.592	1
Beam divergence angle/mrad	3.7	5.7	8.6	11.5	13.5
Beam diameter/mm	1.0	1.2	1.5	1.8	2.0

表 5 实验数据表

Table 5 Experimental data table

Number	Beam divergence angle θ/mrad	Beam diameter D/mm	Optimal shaping position L/mm
1	3.7	1.0	1050
2	3.7	2.0	230
3	5.7	1.5	400
4	8.6	1.2	560
5	8.6	1.5	360
6	8.6	1.8	200
7	11.5	1.5	320
8	13.5	1.0	750
9	13.5	2.0	150

表 6 最佳整形位置方差分析表

Table 6 Analysis of variance of the optimal shaping position

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	
Model	3.14	2	1.57	148.06	<0.0001	significant
Beam divergence angle	0.1708	1	0.1708	16.10	0.0070	
Beam diameter	2.97	1	2.97	280.03	<0.0001	
Residual	0.0637	6	0.0106			
Cor total	3.21	8				
R^2=0.9801	Pre-R^2=0.9395					
Adj-R^2=0.9735	Adeq-precision=33.1476					

表 7 预测函数验证实验

Table 7 Verification experiment of predictive function

Number	Beam divergence angle/mrad	Beam diameter/mm	Optimal shaping position/mm		Error/%
			Experiment value	Predicted value	
1	3.7	1.3	610	620.5357	1.73
2	3.7	1.6	410	385.1141	6.07
3	3.7	1.75	300	303.3896	1.13
4	5.7	1.1	770	789.0354	2.47
5	5.7	1.7	310	303.9078	1.97
6	5.7	2.0	210	188.6099	10.19
7	6.5	1.2	720	652.4120	9.39
8	6.5	1.5	430	404.8971	5.84
9	6.5	1.75	290	272.0801	6.18
10	9.0	1.2	610	591.9518	2.96
11	9.0	1.5	350	367.3745	4.96
12	9.0	1.85	220	210.5727	4.29
13	13.5	1.5	280	308.3790	10.14

5 结 论

通过对入射光束束腰以 3 mm 设计的非球面整形镜进行实验，得到以下结论：1) 不同的入射光束直径或发散角均可以通过改变传输距离得到一个最佳整形位置；2) 入射光束直径和发散角的改变对最佳整形位置上整形结果的平坦因子没有明显影响，但光束均匀性和边缘陡度会有最佳值，因此存在最佳入射参数；3) 最后利用响应曲面法得到最佳整形位置与入射光束直径和发散角的数学模型，在对不同高斯光束整形时，可以根据其入射光斑大小与发散角得到整形最优位置，使非球面整形镜的使用更加方便。

利益冲突：所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Lu S, Lv S Q, Chen M, et al. Realization of single-pulse energy 3 mJ, repetition frequency 1 kHz picosecond super-Gaussian beam[J]. *Infrared Laser Eng*, 2019, **48**(10): 1005012.
卢尚, 吕思奇, 陈檬, 等. 单脉冲能量3 mJ、重复频率1 kHz皮秒超高斯光束的实现[J]. 红外与激光工程, 2019, **48**(10): 1005012.

[2] Feng K, Li J S. Design of aspherics lenses shaping system on Gaussian beam[J]. *Opto-Electron Eng*, 2013, **40**(5): 127−132.
冯科, 李劲松. 高斯光束非球面镜整形系统的设计[J]. 光电工程, 2013, **40**(5): 127−132.

[3] Dev V, Reddy A N K, Pal V. Design of diffractive optical elements for shaping the laser intensity distribution[M]//Singh K, Gupta A K, Khare S, et al. *ICOL-2019*. Singapore: Springer, 2021: 89–91.

[4] Tillkorn C, Heimes A, Flamm D, et al. Anamorphic beam shaping for efficient laser homogenization: methods and high power applications[J]. *Proc SPIE*, 2021, **10518**: 105181I.

[5] Li S S, Wu F, Lv Z W. Beam shaping of laser nearfield based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Electro-Opt Technol Appl*, 2017, **32**(3): 19−23,58.
李森森, 吴凡, 吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. 光电技术应用, 2017, **32**(3): 19−23,58.

[6] Frieden B R. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance[J]. *Appl Opt*, 1965, **4**(11): 1400−1403.

[7] Kreuzer J L. Coherent light optical system yielding an output beam of desired intensity distribution at a desired equiphase surface: US3476463DA[P]. 1969-11-04.

[8] Gao Y H, An Z Y, Wang J S, et al. Automatic optimization design of Gaussian beam shaping system by using ZEMAX software[J]. *Optik*, 2011, **122**(24): 2176−2180.

[9] Optics and photonics-Lasers and laser-related equipment-Test methods for laser beam power (energy) density distribution: EN ISO 13694 –2018[S]. 2018. https://scc.isolutions.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:13694:ed-3:v1:en.

作者简介

张子怡 (1998-)，女，硕士，主要从事高斯光束整形方法及特性研究。

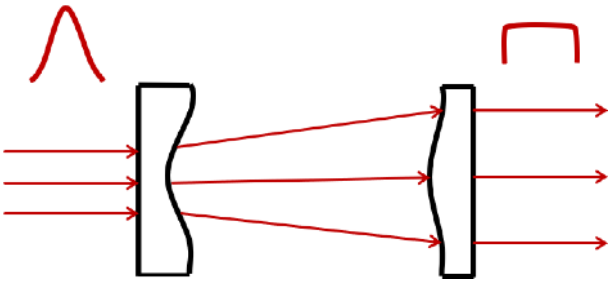
E-mail: zhangziyi1210@163.com

【通信作者】陈檬 (1963-)，女，博士，研究员，主要研究方向为全固态皮秒激光锁模、放大、频率变换技术，径向偏振皮秒激光产生及应用技术，高功率全固态窄脉宽激光器系统及其应用技术。

E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn

Research on shaping characteristics of Gaussian beam aspheric shaping system

Zhang Ziyi, Chen Meng*, Wang Chunlei, Xiang Hepeng, Tao Ruiqing



Structure of aspheric shaping system for experiment

Overview: The method of using an aspheric lens to shape Gaussian beam has been very mature. A specific aspheric shaping mirror can be designed according to the incident light parameters to shape the Gaussian beam into a flat-top beam so that the laser can be better applied to laser medicine, laser processing and other fields. Aspheric mirror shaping has the advantages of simple structure, high damage threshold and high shaping efficiency. At present, the research on the aspherical shaping system lies in the design of its structure, and there is no detailed study on its shaping characteristics. Therefore, this paper focuses on the shaping effect of the aspherical shaping system under different incident parameters.

These aspheric systems have two kinds of structures, one is the Galileo type, and the other is the Kepler type. The Galileo lens has no focus between two lenses, so it is suitable for high power laser shaping. In this paper, a Galileo aspheric shaping mirror with an incident beam waist of 3 mm is used for the experiment. It is found that the aspheric shaping mirror is not only suitable for the design of incident parameters. When the incident beam size and divergence angle are different, flat-top distribution will appear after the shaping mirror. The position is away from the shaping mirror with the increase of the diameter of the incident beam, and close to the shaping mirror with the increase of the divergence angle. In order to explore the difference in shaping results on the optimal shaping position, the control variable method is used to carry out the experiment. It is found that the diameter and divergence angle of the incident light beam have no obvious change in the flat factor of the flat top distribution on the position, but the beam uniformity and edge steepness will have the best value, and there is an optimal incident parameter. In order to obtain the relationship between the optimal shaping position and the diameter and divergence angle of the incident beam, the mathematical model is successfully established by using the response surface method. When the diameter and divergence angle of the beam at an incident position are known, the optimal shaping position can be quickly obtained. The discovery is of great significance to the aspherical shaping mirror that has been designed and fabricated. It shows that an aspherical shaping mirror can shape the laser with different incident parameters and make the use of the shaping mirror more convenient.

Zhang Z Y, Chen M, Wang C L, et al. Research on shaping characteristics of Gaussian beam aspheric shaping system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(4): 210367; DOI: 10.12086/oee.2022.210367

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U1631240)

Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

* E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn