

一种折射式激光高斯光束平顶整形器

尚建力^{1,2} 朱 晓^{1,2} 陈 鹏^{1,2} 朱广志^{1,2} 王 伟^{1,2} 任松青^{1,2} 严 琼^{1,2}

(¹华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; ²激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了将高斯光束整形为平顶的准直激光光束,在现有双非球面透镜整形器的基础上,设计了一种只使用一片非球面透镜的光束整形器。在理论模型中,提出了更加准确的非球面形函数计算方法。经过数值模拟和光学设计软件仿真,分析了系统与激光光束参数变化对整形效果的影响,表明这种新型整形器可以使激光光束的平顶性得到明显的提高。此整形器避免了传统折射式光束整形器的体积大、不易调节等弊端,提高了器件的可靠性和实用性。

关键词 激光技术;平顶光束;高斯光束;光束整形器;非球面透镜

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2543

Refractive Optical Reshaper that Converts a Laser Gaussian Beam to a Flat-Top Beam

Shang Jianli^{1,2} Zhu Xiao^{1,2} Chen Peng^{1,2} Zhu Guangzhi^{1,2}
Wang Wei^{1,2} Ren Songqing^{1,2} Yan Qiong^{1,2}

¹ Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² National Engineering Research Center for Laser Processing, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract In order to convert a laser Gaussian beam to a collimated flat-top beam, a new reshaper with only one aspheric lens is designed based on double aspheric lenses reshaper. In the theoretical model, a more accurate calculation method of curves function of aspheric lens is given. The reshaping effect, brought by the change from the parameter of system and laser beam, is given through numerical analysis and optical design software simulation. It is illustrated that the flatten degree of the laser beam can be improved apparently using this new kind of reshaper. The novel method avoids some shortcomings of traditional refractive optical reshaper such as large volume, complexity of regulating, etc, and enhances the reliability and practicability of device.

Key words laser technique; flat-top beam; Gaussian beam; reshaper; aspheric lens

1 引 言

激光广泛应用在工业和科学研究的众多领域。相对于高斯光束,光强分布为平顶函数的激光光束往往在材料加工^[1,2]、激光全息、光刻、非线性光学技术等领域更加实用。因此,高效地将高斯激光光束转换为平顶光束的整形技术研究很有必要。

目前,将高斯光束转换为平顶光束的方法主要有利用二元光学元件^[3~6]、球面透镜阵列^[7]、变折射率透镜^[8]、积分镜^[9]和折射式透镜整形等方法。其

中折射式透镜整形方法很适合应用于高功率激光材料加工等方面。

对于能量分布为轴对称的激光光束, B. R. Frieden^[10]和 J. L. Kreuzer^[11]分别于 1965 年和 1969 年提出利用单个球面透镜的整形方法。20 世纪 60 年代,就有人提出利用非球面镜对高斯光束整形的设想。1993 年, W. Jiang 等^[12]才发表了相应的实验结果。近年来,利用磁流变抛光法(MRF)技术^[13]人们可以容易地获得精度很高且费用可接受

收稿日期: 2009-11-11; 收到修改稿日期: 2010-04-06

作者简介: 尚建力(1986—),男,博士研究生,主要从事固体激光器及激光技术方面的研究。E-mail: shangjianli@gmail.com

导师简介: 朱 晓(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光器与激光技术方面的研究。

E-mail: zx@mail.hust.edu.cn

的非球面透镜。J. A. Hoffnagle 等^[14]对利用非球面透镜组将高斯光束整形为准直平顶光束做了研究,但他给出的透镜面形函数不够精确,其方案至少需要两面非球面透镜,也没有对光学系统设计中各参数选取对输出光束的影响做深入分析。

本文介绍了利用非球面透镜对高斯光束的平顶化整形;给出了较之前研究更加合理的非球面镜面形曲线函数表达式;并根据这一表达式提出了单透镜完成整形的方法;比较了不同的光学系统形式、非球面镜加工精度、输出光束半径对整形效果的影响及系统对入射光束尺寸的敏感性。并对这种折射式整形方案进行了理论研究和数值模拟,得出了利于这一方案设计和优化的相应结论。

2 基本理论

2.1 光束的平顶性

对于基模高斯光束的截面空间光强分布,可以用高斯函数来描述。而对于期望获得的平顶光束,可以用多种方法来描述和评价。如费米-狄拉克函数、超高斯函数或平顶高斯函数。经过整形器获得的并不是理想的平顶光束,若采用上述三种函数来描述输出光束的平顶性,需要先将输出光束光强的空间分布拟合为上述函数的形式,但是这样的过程是复杂的,并且在实际应用中不够直观方便。文献[15]提出一种简明、直观的光束平顶性评价方法。如图1所示,假设光束光强分布可以用函数 $f(r)$ 描述,其中最大光强为 I_{\max} ,并规定在某实际应用中,合适的工作光强为一特定值 I_{working} 。因此, E_1 为超过工作光强的能量部分; E_2 为低于工作光强的部分;只有 E_3 是在实际应用中有效且必要的部分。实际应用中希望 E_3 在总能量中的比值(下文中称其为有效利用比)较大,利用这一参数,可以很容易评价一光束平顶性的优劣。

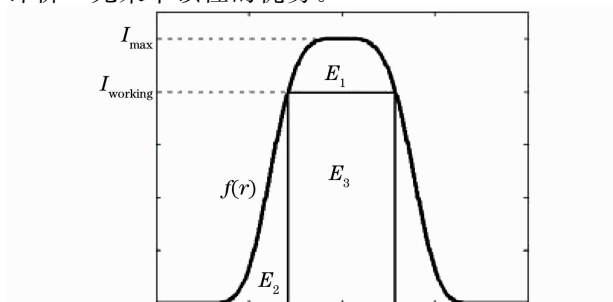


图1 应用中光束能量的有效部分与无效部分
Fig. 1 Effective part and useless parts of the beam energy in some applications

2.2 失真的望远镜结构

在设计的整形器中,输入为经过准直的高斯光束或其他截面光强分布没有角向分量函数的光束。利用两片特别设计的非球面平-凹/凸透镜,使输出为准直平顶光束。

如图2所示,采用两片非球面镜的整形器中第一片非球面镜为能量空间分布调整透镜,使光束光强在特定位置(第二片透镜处)为平顶分布;第二片非球面镜为再准直透镜。整形器可以看成一望远系统,只是不同孔径区域其放大率不相等,即望远镜成像是失真变形的。

望远镜设计整形器可以分为伽利略型和开普勒型。由图2可以看出,伽利略型设计没有实焦点。但是往往伽利略型设计中第一个非球面镜的面形相对复杂。

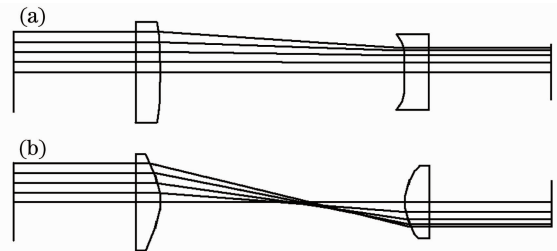


图2 双非球面透镜整形器示意图。(a)伽利略型, (b)开普勒型

Fig. 2 Schematic layout of double aspheric lenses reshaper. (a) Galilean design, (b) Keplerian design

2.3 非球面镜面形函数

合理地设计非球面透镜曲面是获得平顶光束输出的关键。故根据不同孔径区域的放大率,可得到透镜的面形函数。

如图3所示,当输入光斑尺寸为 ω_0 的基模高斯光束时,光束截面上半径小于 r 区域内功率为 $\frac{\pi I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \right]$,要得到光强为 I_f 的平顶光束,在输出面上这些能量应平均重排在半径为

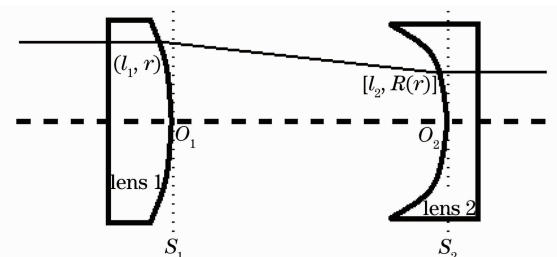


图3 双透镜光束整形器光线偏折示意图
Fig. 3 Schematic representation of a two lenses reshaper, showing the path of a general ray

$$R(r) = \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \right]} \quad (1)$$

的区域内。即经过 lens 1 折射后出射光线与光轴的夹角为

$$\theta(r) = \arctan \frac{R(r) \mp r}{L + h_1(r) - h_2(r)}, \quad (2)$$

式中 L 为 O_1, O_2 之间的距离, $h_1(r)$ 和 $h_2(r)$ 分别为

光线与两非球面镜交点到平面 S_1, S_2 的距离, 即两非球面函数。lens 1 面形函数在 r 处的导数为

$$k_1(r) = \frac{\sin \theta(r)}{n - \cos \theta(r)}, \quad (3)$$

式中 n 为玻璃材料的折射率。对(3)式关于半径积分可以写出非球面镜 1 的曲面方程

$$h_1(r) = \int_0^r k_1(\rho) d\rho = \int_0^r \frac{\sin \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} \mp \rho \right\} \right\} \right\}}{n - \cos \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} \mp \rho \right\} \right\} \right\}} \left[L + h_1(\rho) - h_2(\rho) \right] d\rho, \quad (4)$$

相似地可以写出非球面镜 2 的曲面方程

$$h_2(r) = \int_0^r \frac{\sin \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} \mp \rho \right\} \right\} \right\}}{n + \cos \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} \mp \rho \right\} \right\} \right\}} \left[L + h_1(\rho) - h_2(\rho) \right] d\rho, \quad (5)$$

(4),(5)式积分复杂, 并且 $h_1(\rho)$ 和 $h_2(\rho)$ 是未知的, 所以这是一个数值迭代求解的过程, 利用计算机辅助计算可以容易地求出球面方程的数值解。(4),(5)式与文献[15]中给出的曲面函数表达式不同, 在文献[15]的表达式中, 没有考虑透镜曲面对传输距离的影响, 只适用于计算 $L \gg 10\omega_0$ 情况下的曲面函数, 否则其不能获得等相位的准直平顶光束, 这限制其必须采用两片非球面平-凸/凹透镜, 并需要具有较长的筒长才能取得较好的整形效果。

2.4 单透镜整形器

图 4 为设计的单透镜整形器, 这里非球面镜的前后表面分别代替双透镜系统中两片透镜实现对光束的匀化和准直, 单个透镜的两个曲面仍然构成变形失真的望远镜系统。相似于(4),(5)式写出单透镜整形器中非球面镜前后表面的面形函数

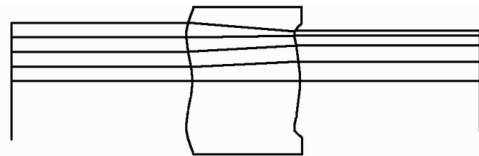


图 4 单透镜整形器光路示意图

Fig. 4 Schematic layout of single lens reshaper

$$h_{s_1}(r) = \int_0^r \frac{\sin \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} - \rho \right\} \right\} \right\}}{\frac{1}{n} - \cos \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} - \rho \right\} \right\} \right\}} \left[L + h_1(\rho) - h_2(\rho) \right] d\rho, \quad (6)$$

$$h_{s_2}(r) = \int_0^r \frac{\sin \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} - \rho \right\} \right\} \right\}}{\frac{1}{n} + \cos \left\{ \arctan \left\{ \left\{ \sqrt{\frac{I_0 \omega_0^2}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}\right) \right]} - \rho \right\} \right\} \right\}} \left[L + h_1(\rho) - h_2(\rho) \right] d\rho, \quad (7)$$

从图2可以看出,整形过程中开普勒结构的光线偏折角度远大于伽利略结构。因为单透镜整形器中透镜的厚度远小于双透镜整形器中透镜间的距离,所以往往光线在重排过程中偏折角度较双透镜系统有所增大;镜面获得较大的偏折角度意味着较小的曲率半径,合理厚度的单透镜整形器中,若采用开普勒形式设计,透镜表面局部曲率半径需很小,这样的设计非常困难,甚至无法实现。同时,单透镜整形器如果采用开普勒结构,光线会在透镜内部聚焦,可能破坏透镜,所以在单透镜整形器中应采用伽利略结构设计,避免出现实焦点,并降低光线偏折角度以保证非球面镜各区域曲率半径在合理范围。

相比传统的双透镜整形器,单透镜型光线折射次数由4次降低为2次,界面能量损失小;同时体积、重量、成本明显降低,便于安装使用,实用性明显提高。

3 数值分析与仿真

根据(4),(5)式或(6),(7)式可以求得一定输入、输出光束尺寸,一定筒长或透镜厚度下的非球面透镜面形曲线函数,并拟合出面形曲线的高次多项式。假定一定尺寸的高斯光束光强为 I_0 ,不同的输出光束尺寸条件下对应的输出光强空间分布如图5所示。可见双透镜、单透镜整形器都可以较好地地将高斯光束整形为平顶光束。其中单透镜型输出光束口径不宜过小。当透镜厚度为2倍高斯光斑尺寸时,若输出光强 I_f 大于 $0.7I_0$,会因为光线偏折角度过大、非球面镜局部曲率半径过小而不能获得均匀的平顶光束输出。

光束通过按照 $I_f=0.5I_0$ 设计的双透镜或单透镜整形器,若根据2.1小节中介绍的有效利用比评价光束平顶性,如图6所示,可以看出,光束经整形后,有效利用比相对高斯光束有显著提高。单透镜型整形器输出光束平顶性与双透镜型整形器相比没有明显差别。

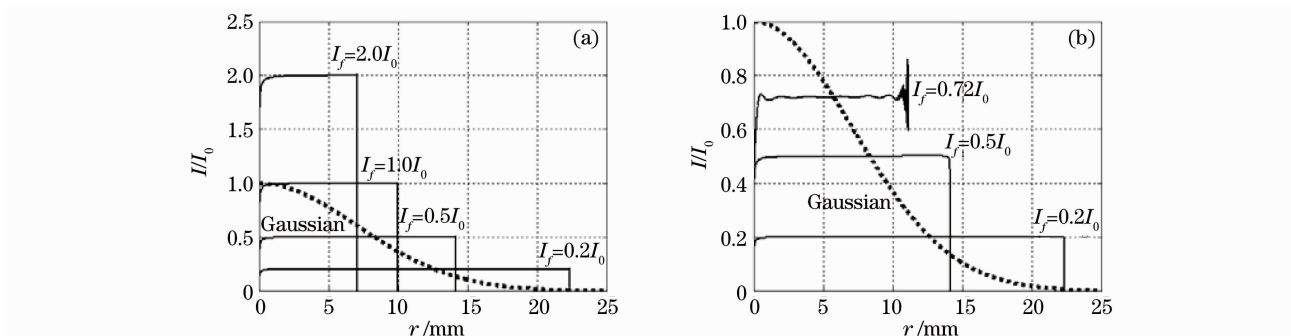


图5 不同输出光束尺寸下的整形器输入、输出光强分布。(a)双透镜整形器,(b)单透镜整形器

Fig. 5 Intensity values along radial before and after the Gauss-to-flattop reshapers in different spot sizes of output beam.

(a) two aspheric lenses reshapers, (b) single aspheric lens reshapers

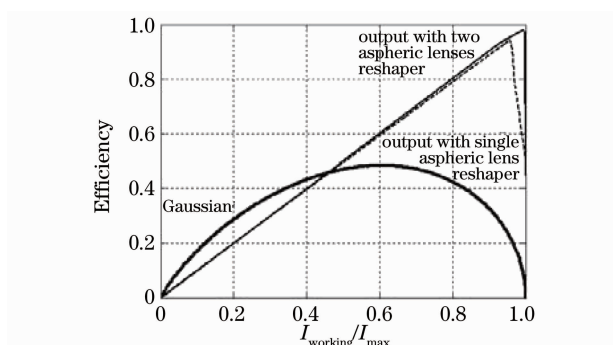


图6 高斯光束与整形器获得平顶光束有效利用比

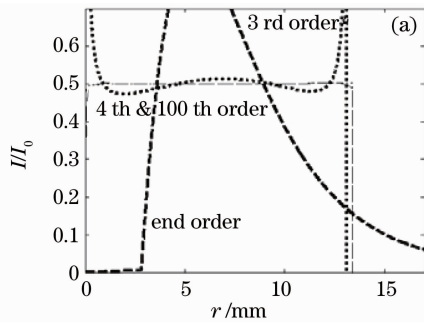
Fig. 6 Efficiency part of beam before and after the Gauss-to-flattop reshapers

因为单透镜整形特殊的结构,不能获得较小的输出光斑。但是在实际应用中,为了获得具有较好传播特性的平顶光束,不论采用单透镜整形器还是

采用双透镜整形器都不应将输出光斑尺寸压缩得过小。因为在实际光束传播过程中,衍射现象是不可避免的^[16]。如果直接获得光束尺寸很小的平顶光束输出,光束传播过程中很快会发生等相位面弯曲,不适于远距离传输,这在实际应用中是很不利的。所以应该尽量采用口径较大的非球面透镜,获得大光斑尺寸的平顶光束,以便在传输过程中保持光束的平顶、准直特性,在工作平面附近再采用聚焦系统对光束聚焦。由此看出,单透镜整形器关于放大率范围的限制并不会影响实际应用。

非球面镜的阶次可以在一定程度上反映出非球面镜镜面的复杂程度,不论是双透镜系统还是单透镜系统,只有用足够高阶次的多项式拟合描述由(4)~(7)式得到的面形曲线,才能获得较好的整形效果。如图7所示,不论是双透镜整形器还是单透

镜整形器,用较低阶次的多项式拟合非球面镜面均不能获得较好的平顶输出,而当多项式阶次超过



4 次后,输出光束平顶性明显提高并接近理想输出特性。

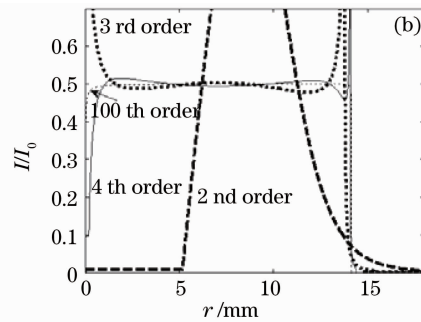


图 7 不同多项式阶次的整形器输出光强分布。(a)双透镜整形器,(b)单透镜整形器

Fig. 7 Intensity values along radial after the Gauss-to-flattop reshaper with different orders of polynomial.

(a) two aspheric lenses reshaper, (b) single aspheric lens reshaper

因为入射准直器的光束为已准直光束,往往具有较大的光束尺寸,所以这样的准直器需要大口径非球面镜。但大口径非球面镜在加工过程中面临着制造难度大、成本极高、加工效率低等难题^[17]。目前的非球面镜加工手段中,同时满足这类准直器所需大口径、高功率密度、高精度、低成本等要求是很困难的。可以合理成本小规模生产非球面镜的金刚石车削法因其产品较差的表面粗糙度,很难用于对可见光或近红外波段光束的平顶化准直。但是随着磁流变抛光法等新型加工手段的发展,高次非球面镜制造工艺的不断提高,这类平顶化准直器在非球面镜加工方面的困难会被逐渐克服。

整形过程中,透镜的加工精度直接影响到这类平顶准直器的使用。透镜的表面粗糙度和面形误差都是影响输出光束质量和光学系统可靠性的重要因素。透镜表面粗糙度和使用波长有关。一般地,中远红外波段对表面粗糙度要求较低,目前金刚石车削法加工的非球面镜就能满足表面粗糙度要求。但是当使用在近红外和可见光波段则需要更好的透镜表面粗糙度。通常,在低功率条件下使用,表面粗糙度应小于 12 nm ^[18],而若在高功率下使用,为了提高非球面镜的抗激光损伤阈值,对表面粗糙度的要求更高,至少需要达到相同工作条件下球面透镜的表面粗糙度水平。对于面形误差对输出光束质量的影响如下分析,在透镜面形曲线有限个点引入正态分布的误差值,并用非球面公式

$$h(r) = \frac{r^2}{R + \sqrt{R^2 + (1+c)r}} + A_4 r^4 + A_6 r^6 + A_8 r^8 + \dots \quad (8)$$

的形式做非线性拟合^[19]。这里的误差不能描述镜面上划痕、瑕疵等,而是描述实际透镜面形曲线与理

想曲线的宏观面形误差,这种误差所引入的衍射效益可以忽略,仅用几何光学分析其对输出光束平顶性的影响。图 8 为单透镜整形器输出光束平顶性与透镜加工精度的关系,随着实际透镜与理想曲线之间差距的标准差增大,输出光束平顶性明显降低,特别当透镜误差大于 $1 \mu\text{m}$ 后,输出光束平顶性快速降低。并能看出,当输出光束尺寸较大时,透镜加工精度对输出特性的影响相对较小。

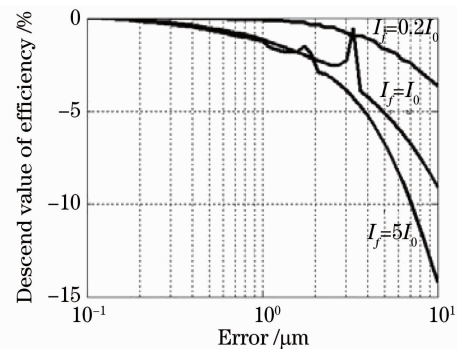


图 8 透镜加工误差对输出光束平顶性的影响

Fig. 8 Effect of lens surface scratch on the output in single aspheric lens reshaper

在实际运用中,入射的高斯光束尺寸与理想值有一定差别。假设针对 $\omega_0 = 10 \text{ mm}$ 准直高斯光束设计的单透镜型整形器,实际入射光束尺寸为 $8, 12 \text{ mm}$,输出光束光强分布如图 9 所示。可以看出,利用折射式平顶整形器对入射光束尺寸是比较敏感的,所以高斯光束进入整形器前应进行准确的扩束保证正确的光斑尺寸。开普勒型、伽利略型双透镜整形器与单透镜型整形器对入射光束尺寸敏感性的比较如图 10 所示,可以看出单透镜型整形器、伽利略型双透镜整形器对入射光束尺寸敏感度相近,而开普勒型敏感度较低。

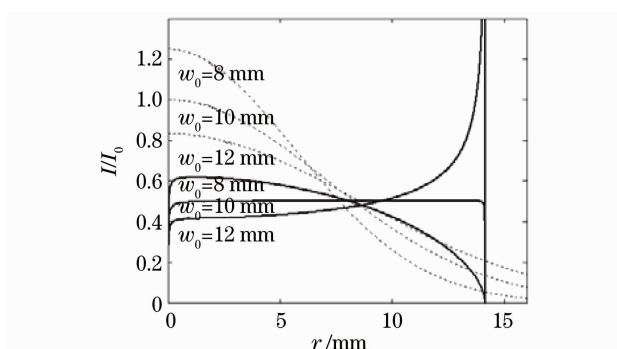


图 9 单透镜型整形器入射光束尺寸偏差对输出光束平顶性的影响

Fig. 9 Effect of incident beam spot-size bias on the output in single aspheric lens reshaper

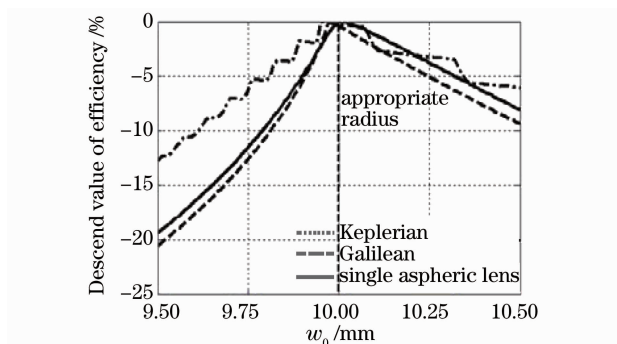


图 10 三种整形器对入射光束尺寸偏差敏感性的比较
Fig. 10 Comparison of sensitivity of the bias of incident beam spot size between different designs

利用商用光学设计软件 Zemax 中蒙特卡罗法光线追迹方法进行仿真。设计一单非球面镜整形器将一定尺寸的准直高斯光束整形为平顶光束。通过(6),(7)式,求得非球面镜面形曲线多项式系数、其他光学系统参数及输入光束参数如表 1 所示。表 1 所描述光学系统仿真结果如图 11 所示。

可以看出,这一设计可以获得较好的平顶输出,输出结果与之前数值分析结果近似。

表 1 仿真光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system in simulation

Incident beam		
Beam spot-size w_0 /mm	5	
Intensity I_0 /(W/cm ²)	65	
Reshaper		
Lens center thickness /mm	3	
Aperture of lens /mm	20	
Material of lens	Fused silica	
	First surface of lens	Second surface of lens
A_8 of polynomial	0.011147	-0.071039
A_7 of polynomial	-0.14512	0.60298
A_6 of polynomial	0.77397	-2.0942
A_5 of polynomial	-2.1302	3.8086
A_4 of polynomial	3.0242	-3.8801
A_3 of polynomial	-1.5423	2.1836
A_2 of polynomial	-0.74651	-0.25816
A_1 of polynomial	-0.046885	0.076355

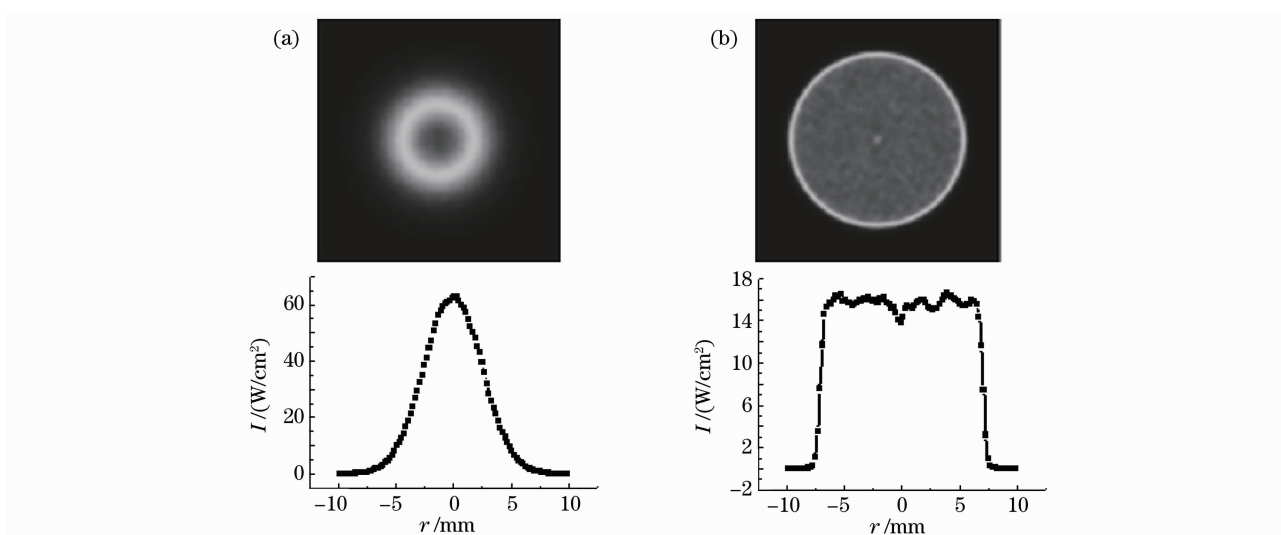


图 11 Zemax 蒙特卡罗法光线追迹结果。(a)入射高斯光束,(b)出射平顶光束

Fig. 11 Results of ray tracing in Zemax by the method of Monte Carlo. (a) incident Gaussian beam, (b) emergent flat-topped beam

4 结 论

利用非球面透镜可以将高斯光束整形为平顶光

束,大多数情况下仅使用一片非球面镜就能实现这一功能,相比双非球面镜整形方法,单透镜整形器具

有体积小、成本低、安装使用方便等优点。在具体设计时,应选择较大的输出光束光斑尺寸,以降低衍射效应的影响,保证准直光束可以传播较远的距离,并能够降低对非球面镜加工精度的要求。需要指出的是,这种整形方法需要准确调节入射光束的光斑尺寸。同时,目前高次非球面镜的加工技术尚不成熟,以合理的成本制造这类平顶准直器所需的大口径、高精度的高次非球面镜还是很困难的,但相信,这一困难会随着高次非球面镜加工工艺的逐步提高而被克服,其优势和商业前景会逐步显现。

参 考 文 献

- 1 Wang Yunshan, Wang Juanjuan, Zhu Fudong. Beam optimum system for laser heat treatment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1730~1734
王云山, 王娟娟, 朱福栋. 激光热处理光束优化系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1730~1734
- 2 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying *et al.*. Novel kind of wide-band shaping parabolic mirror for high power laser processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1853~1856
罗曦, 陈培锋, 王英等. 一种大功率激光加工用新型宽带光斑成形抛物面镜[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1853~1856
- 3 J. Cordingley. Application of a binary diffractive optic for beam shaping in semiconductor processing by lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14): 2538~2542
- 4 Xie Jie, Fan Wei, Li Xuechun *et al.*. Spatial laser beam shaping using binary panels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1959~1966
谢杰, 范薇, 李学春等. 二元振幅型面板用于光束空间整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1959~1966
- 5 Liu Qiang, Wu Rong, Zhang Xiaobo *et al.*. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1165~1168
刘强, 邬融, 张晓波等. 多台阶衍射光学元件的工艺优化[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1165~1168
- 6 Yu Gang, Nie Shuzhen, Zheng Caiyun *et al.*. Beam transformation technology of pixellated Dammann grating in laser processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1841~1846
虞钢, 聂树真, 郑彩云等. 用于激光加工中的矩形孔径 Dammann 光栅光束变换技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1841~1846
- 7 F. M. Dickey, S. C. Holswade. *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques*[M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000. 159
- 8 D. L. Shealy, S. Chao. Design of GRIN laser beam shaping system[C]. *SPIE*, 2004, **5525**: 138~147
- 9 Wang Zhiyong, Chen Hong, Zuo Tiechuan. Design of strip integral mirror for high power laser processing[J]. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2002, **28**(3): 334~336
王智勇, 陈虹, 左铁钊. 一种大功率激光加工用带式积分镜的设计[J]. *北京工业大学学报*, 2002, **28**(3): 334~336
- 10 B. R. Frieden. Lossless conversion of a plane laser wave to a planewave of uniform irradiance [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**: 1400~1403
- 11 J. L. Kreuzer. Coherent light optical system yielding an output beam of desired intensity distribution at a desired equiphase surface[P]. U. S. Patent 3,476,463, 1969
- 12 W. Jiang, D. L. Shealy, J. C. Martin. Design and testing of a refractive reshaping system[C]. *SPIE*, 2000, **1993**: 64~75
- 13 D. Golini, W. I. Kordonski, P. Dumas *et al.*. Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing[C]. *SPIE*, 1999, **3782**: 80~91
- 14 J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson. Beam shaping with a plano-aspheric lens pair[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(11): 3090~3099
- 15 A. Laskin. Achromatic refractive beam shaping optics for broad spectrum laser applications[C]. *SPIE*, 2009, **7430**: 743003
- 16 Luo Shirong, Lü Baida, Zhang Bin. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1213~1217
罗时荣, 吕百达, 张彬. 平顶高斯光束的传输特性[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1213~1217
- 17 Han Chengshun, Dong Sheng, Tang Yuyong. Ultra-precision grinding of large optical aspheric surface[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, **35**(8): 905~918
韩成顺, 董申, 唐余勇. 大型光学非球面超精密磨削关键技术的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, **35**(8): 905~918
- 18 Gao Honggang, Cao Jianlin, Zhu Yong *et al.*. The development and application of ultra-smooth surfaces [J]. *Physics*, 2000, **29**(10): 610~614
高宏刚, 曹健林, 朱镛等. 超光滑表面及其制造技术的发展[J]. *物理*, 2000, **29**(10): 610~614
- 19 Qu Yunxia. Research on the Surface Error and Imaging Quality of Aspheric Lens[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006, 41~42
屈云霞. 非球面镜表面加工误差和成像质量分析方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006, 41~42