

## 提高半导体激光二极管功率密度的光束整形方法

辛光泽, 陈东启, 蔡毅, 白廷柱, 王岭雪\*

(北京理工大学光电学院 纳米光子学与超精密光电系统北京市重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 针对半导体激光二极管由束散角大( $14^\circ\sim 46^\circ$ )导致的激光功率密度在传播过程中不断衰减的问题, 提出了一种提高激光功率密度的光束整形方法。首先以 X 型柱面平凸透镜和 Y 型柱面平凸透镜对激光二极管输出光束慢轴和快轴方向进行准直, 然后通过一对平凸透镜组合进行扩束, 进一步提高光束平行度, 最后由单片平凸透镜将光束聚焦为高功率密度的光点。采用 Light Tools 软件仿真光路、优化光学元件参数, 对光学元件进行实际选型后安装并调试光束整形系统。测试结果表明: 半导体激光二极管输出光束的 67% 激光能量汇聚于直径 1 mm 圆内, 激光功率密度优于  $30\text{ W/cm}^2$ 。

**关键词:** 光束整形; 激光二极管; 光束聚焦; 功率密度

中图分类号: O435.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0805010

## Beam shaping method to improve power density of semiconductor laser diodes

Xin Guangze, Chen Dongqi, Cai Yi, Bai Tingzhu, Wang Lingxue\*

(Beijing Key Laboratory of Nanophotonics and Ultrafine Optoelectronic Systems, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To solve the problem that the power density of laser beam attenuated along the propagation direction, which was caused by large beam divergence angle ( $14^\circ\sim 46^\circ$ ) of semiconductor laser diode, a beam shaping optical system to improve power density was proposed. An X type planoconvex cylindrical lens and a Y type planoconvex cylindrical lens were selected to collimate the laser beam. Then, a pair of planoconvex spherical lenses were applied to improve the parallelism. Finally, a single planoconvex spherical lens focused the laser beam to a spot with high power density. The lenses were chosen and optimized through Light Tools simulation. A real beam shaping optical system was mounted and built. Test results show that 67% laser power is converged into a cycle with diameter of 1 mm, and the power density is over  $30\text{ W/cm}^2$ .

**Key words:** beam shaping; laser diode; beam focus; power density

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61471044)

作者简介: 辛光泽(1988-), 男, 博士生, 主要从事电子电路设计、光学设计方面的研究。Email: 1057374268@qq.com

通讯作者: 王岭雪(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外成像和图像处理方面的研究。Email: neobull@bit.edu.cn

## 0 引言

半导体激光二极管(LD)出射光线单色性好、功率高、结构简单、重量轻,被应用于军事、工业制造以及航天航空等领域。LD 出射光束光轴不对称且存在束散角,横截面光强分布满足高斯分布<sup>[1-2]</sup>,需对输出光束进行整形<sup>[3-4]</sup>。

LD 光束整形技术根据光线传播方式主要分为三类:折射法、反射法、衍射法。折射法通过调节透镜曲率半径改变折射光束与入射光束的夹角实现光束整形。赫瑞瓦特大学 Howard J Baker 采用单透镜对光束进行整形,将单透镜表面加工为曲面形状。经单透镜折射,出射光束横截面形状成为正方形或长条形,该方法适用于高强度的现代光纤激光器<sup>[5]</sup>。反射整形法借助全反射光学元件对光束在快轴、慢轴方向上的宽度进行调整。南安普顿大学光电研究中心 Clarkson 等人提出采用两个高反平面镜实现快、慢两个方向光束质量因子的均衡,将光束按照镜间错位距离分割、分段重排。然而,该方法使得光束在整形器中传播时相邻光束会发生部分重叠,对亮度提高有限制。衍射整形法可实现光束能量的均匀分布,具备更大的自由度,二元光学元件设计灵活、对波前控制更为精确<sup>[6-7]</sup>。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘华使用衍射光学元件调制光束的振幅和相位,对单片折射透镜进行离子刻蚀,使之成为折衍混合元件,实现光束的整形和聚焦<sup>[8]</sup>。

光束整形技术改变激光束散角,使光束具备准直特征。然而在工业制造或科学研究如晶圆激光切割、激光打孔、激光增材制造、物质受激辐射研究<sup>[9]</sup>中,需要对整形光束进一步聚焦,使激光功率密度提高至每平方米几十甚至上百瓦。

反射和衍射方法存在加工周期长、成本高、系统结构复杂、装调精度难以控制等问题,而折射整形光学元件光能转换效率高、结构简单<sup>[10]</sup>。因此,文中基于折射法设计了先准直、扩束、再聚焦的提高光束功率密度的方法,并搭建实际光学系统进行验证。

## 1 LD 光束特性及质量评价

### 1.1 LD 光束特性

LD 出射光束为高斯光束,其腰斑半径在光轴方

向总大于一个最小值,该最小值被称为束腰半径  $\omega_0$ ,将其对应的位置  $z=0$  定义为束腰位置。

高斯光束波前的曲率半径在  $z$  轴方向上的分布满足:

$$R(z)=z \left| 1 + \left( \frac{z_R}{z} \right)^2 \right| \quad (1)$$

对于给定波长  $\lambda$  的 LD,其腰斑半径在  $z$  轴方向上的分布满足:

$$\omega(z)=\omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (2)$$

式中: $z_R=\pi\omega_0^2/\lambda$  被称为瑞利距离。

当  $z \gg z_R$  时,公式(2)可近似表示为:

$$\omega(z)=\frac{\omega_0 z}{z_R} \quad (3)$$

此时光束包络线近似为斜率的直线,其与  $z$  轴的夹角  $\theta=\lambda/\pi\omega_0$  为 LD 的束散角。

LD 光束横截面示意图如图 1 所示,光束在快轴(垂直于结平面)和慢轴(平行于结平面)方向以不同束散角出射,其横截面近似为椭圆形。

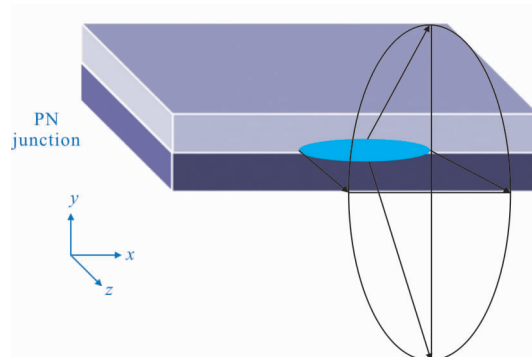


图 1 激光二极管出射光束横截面形状

Fig.1 Shape of the LD beam cross section

光束沿传播方向上的强度分布可表示为:

$$I(\theta_x, \theta_y)=I_0 \exp \left\{ -2 \left[ \left( \frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^{2G_x} + \left( \frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right] \right\} \quad (4)$$

式中: $I_0$  为  $z$  轴上光强; $\theta_x$  和  $\theta_y$  分别是光束与  $x-z$  面和  $y-z$  面夹角; $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向上高斯强度  $1/e^2$  点的远场束散角; $G_x$  和  $G_y$  分别是  $x$  和  $y$  方向上的“超级高斯因子”,其值为 1 时,是典型的高斯分布。对于实际 LD,其快轴和慢轴方向上的超高斯因子  $G_x$  和  $G_y$  均大于 1,表征实际输出的激光束中除基

模外还包含其他的高阶模分量。

### 1.2 光束质量评价

高斯光束的束散角与束腰半径的乘积即光参量乘积  $B_{pp}^{[1]}$ , 满足:

$$B_{pp} = \omega * \theta \quad (5)$$

式中:  $B_{pp}$  在光学成像系统中为不变量, 光束的束腰宽度  $\omega_0$  与束散角  $\theta$  为反比关系。

国际标准组织(ISO)采纳光束质量因子  $M^2$  作为光束质量评价方法, 即:

$$M^2 = \frac{B_{pp}}{B_{pp00}} \quad (6)$$

式中:  $B_{pp}$  为实际光参量乘积;  $B_{pp00}$  为高斯光参量乘积; 光束质量因子  $M^2$  表征实际光束相比衍射极限(基模高斯光束)的倍数, 将基模高斯光束的束散角

$\theta_0 = 4\lambda/\pi\omega_0$  及公式(4)代入公式(6), 则可得:

$$M^2 = \frac{\pi\theta\omega_0}{4\lambda} \quad (7)$$

式中: 基模光束的束腰宽度  $\omega_0$  由 LD 的 P-N 结物理结构决定;  $\theta$  对应实际光束的束散角。实际的 LD 输出为多模激光束, 包含更多的高阶模分量, 为提高其光束质量因子  $M^2$ , 文中通过透镜增大光束的束腰宽度, 减小束散角  $\theta$ , 同时在腰斑最小位置放置光阑滤除部分高阶模分量。

## 2 提高功率密度的光束整形系统设计仿真

### 2.1 光束整形系统原理框图

根据 LD 光束特性以及光束评价质量标准, 采用图 2 所示的步骤提高功率密度的光束整形。

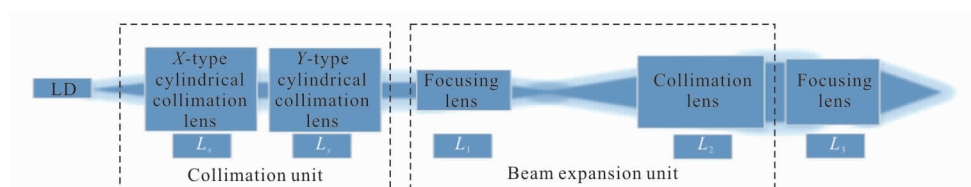


图 2 光束整形系统原理框图

Fig.2 Schematic diagram of beam shaping system

### 2.2 激光准直单元设计

由公式(1)可知, 在瑞利距离处, 高斯光束的腰斑半径为束腰半径的  $\sqrt{2}$  倍, 实际使用中认为高斯光束在瑞利距离内可看作近似平行光, 也称瑞利距离为准直距离, 因此通过透镜变换增加高斯光束的束腰半径, 可以获得较长的准直距离。

由于 LD 出射光束为椭圆形状, 文中提出一种 X 型柱面平凸透镜结合 Y 型柱面平凸透镜的方式进行准直。如图 3 所示, 首先对慢轴光束进行准直, 光束横截面形状长宽比值为 z 轴坐标值的函数, 在光斑长宽比最接近 1 的坐标处放置快轴准直透镜, 使准

直后的光束能量均匀分布于光学元件中心。

设图 3 中 X 型柱面镜为薄透镜, 焦距为  $f_x$ , 且焦点位于 LD 高斯光束的束腰位置, 由公式(1)、(2)可得, 在透镜处的入射光束波前曲率半径及腰斑半径为:

$$\begin{cases} R_x = f_x \left[ 1 + \left( \frac{\pi\omega_{x0}^2}{\lambda f_x} \right)^2 \right] \\ \omega_x = \omega_{x0} \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda f_x}{\pi\omega_{x0}^2} \right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

又由透镜对球面波(柱面波)的变换公式:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} - \frac{1}{f} \quad (9)$$

可得到经过 X 型柱面镜准直后的出射光束的束腰半径、束腰位置及束散角:

$$\begin{cases} \omega'_{x0} = \frac{\lambda f_x}{\pi\omega_{x0}} \\ l'_{x0} = f_x \\ \theta'_{x0} = \frac{\pi\omega_{x0}^2}{\lambda f_x} \theta_{x0} \end{cases} \quad (10)$$

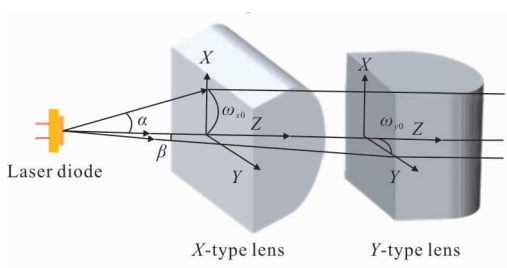


图 3 柱面透镜对 LD 光束准直示意图

Fig.3 Collimation of LD beam by cylindrical lens

同理,对于 Y 型柱面镜,可得准直后的出射光束的束腰半径、位置及束散角:

$$\begin{cases} \omega_{y0}' = \frac{\lambda f_y'}{\pi \omega_{y0}} \\ l_{y0}' = f_y' \\ \theta_{y0}' = \frac{\pi \omega_{y0}^2}{\lambda f_y'} \theta_{y0} \end{cases} \quad (11)$$

由此可知对于柱面准直透镜,焦距  $f$  越大,准直后的出射光束束腰半径越大且束散角越小。为实现光束的进一步整形,应使得快轴、慢轴方向的光束在准直后束腰半径、束散角尽可能相近,由公式(10)、(11)可得 X、Y 型柱面镜的焦距关系需满足:

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{\omega_{x0}}{\omega_{y0}} = \frac{\theta_{y0}}{\theta_{x0}} \quad (12)$$

同时要使 X、Y 方向准直后的出射光束束腰位置也尽可能接近,应满足:

$$f_x = f_y \quad (13)$$

由公式(4)可知,透镜焦距  $f$  越大,准直后出射光束的束散角越小,但同时入射光束在透镜处的腰斑半径越大,这使得透镜的直径和厚度增大,不再满足薄透镜假设,导致出射光束的球差增加,降低光束质量。文中根据经验公式设置柱面镜焦距和直径,如柱面镜高度可取为 20~25 mm、透镜直径的 85% 为光束有效准直范围等。

### 2.3 激光扩束单元设计

准直单元改善光束的长宽比和平行度,但柱面透镜尺寸较小,导致准直光束腰斑较小。根据 2.1 节光参积不变原理可知,准直光束仍存在束散角,为进一步压缩准直光束的束散角,文中在准直单元后引入激光扩束单元。

激光扩束镜按照组合透镜类型分为两种:开普勒式扩束镜和伽利略式扩束镜。如图 4(a)所示,开普勒式扩束镜由一片输入正透镜和一片输出正透镜以共焦形式组合而成。如图 4(b)所示,伽利略式扩束镜

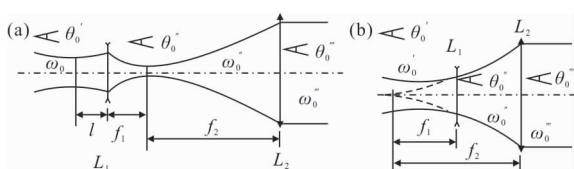


图 4 (a)开普勒式扩束镜;(b)伽利略式扩束镜

Fig.4 (a) Kepler beam expander; (b) Galileo beam expander

由一片输入负透镜和一片输出正透镜以虚共焦形式组合而成,输入透镜将虚焦点光束传递给输出透镜。

对比两种扩束镜共焦方式:在开普勒式扩束镜的焦点处增加针孔光阑,可滤除外界杂散光并截取光场能量的均匀部分,同时滤除 LD 光束中部分高阶模分量,提高光束质量因子  $M^2$ ,而伽利略式扩束镜的虚共焦方式导致其无法实现该效果。因此,文中选择开普勒式扩束镜进行激光扩束,如图 4(a)所示,柱面组合透镜出射的准直光束以束散角  $\theta_0'$ 、束腰半径  $\omega_0'$  输入扩束单元,束腰位置与输入透镜  $L_1$  距离为  $l_1$ ,此时  $f_1 \ll l_1$ ,由公式(8)可得  $L_1$  的输出光束为:

$$\begin{cases} \omega_0'' \approx \frac{f_1}{l_1} \omega_0' \\ l_1' \approx f_1 \end{cases} \quad (14)$$

输出透镜  $L_2$  的焦距为  $f_2$ ,其焦点位于  $\omega_0''$  处,由公式(8)可知,扩束单元输出光束的束腰半径及位置为:

$$\begin{cases} \omega_0''' = \frac{\lambda l_1 f_2}{\pi f_1 \omega_0'} = \frac{l_1 f_2}{f_1 f_{x/y}} \omega_{x/y}' \\ l_2' = f_2 \end{cases} \quad (15)$$

开普勒式扩束镜对光束的扩束倍率为:

$$M' = \frac{\theta_0''}{\theta_0'} = \frac{f_2 \omega(l)'}{f_1 \omega_0'} = M \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda l_1'}{\pi \omega_0'} \right)^2} \quad (16)$$

式中:  $M = f_2 / f_1$ ;  $\theta_0'$  为入射光束发散角;  $\theta_0''$  为出射光束发散角;  $\omega(l)'$  为  $L_1$  前表面光斑半径。

### 2.4 激光聚焦单元

对激光束进行聚焦可在焦点位置得到高斯光束的最小腰斑,提高光束的功率密度。

对于给定的聚焦透镜  $L_3$ ,设其焦距为  $f_3$ ,由公式(8)可得:

$$\omega_0''' = f_3 \sqrt{\frac{1}{\left( \frac{f_3 - l_3}{\omega_0''} \right)^2 + \left( \frac{\pi \omega_0''}{\lambda} \right)^2}} \quad (17)$$

此时若满足  $\pi \omega_0''^2 / \lambda \gg f_3$ ,且  $l_3 \gg f_3$ ,则可使用焦距较短的透镜进行聚焦,在距离扩束单元出射光束束腰位置较远的位置处,公式(17)可近似为:

$$\omega_0''' = \frac{\lambda f_3}{\pi \omega_0''} = \frac{\lambda f_3 f_1 f_{x/y}}{\pi l_1 f_2 \omega_{x/y}'} \quad (18)$$

将公式(18)代入激光功率密度公式:

$$I = \frac{P}{\pi \left( \omega_0 / 2 \right)^2} \quad (19)$$

即可求得整形后的激光功率密度。文中根据期望达到的功率密度范围,逆向对聚焦单元、扩束单元和准直单元进行仿真和优化。

### 2.5 光束整形系统仿真及其结果

采用 Light Tools 软件对光束整形系统进行仿真,以日亚 NDB7K75 型激光二极管为例,根据表 1 参数设置 LD 光源中心波长 448 nm,光束慢轴和快轴方向束散角分别为 14°、46°,并根据实际功率需要设置光源出射功率为 376 mW。

表 1 NDB7K75 激光二极管参数

Tab.1 Parameters of the NDB7K75 LD

	Min	Typical	Max
Output power/W	3.4	3.5	3.6
Wavelength/nm	440	448	455
Operating voltage/V	4.0	4.3	4.7
Parallel divergence/(°)	10	14	20
Vertical divergence/(°)	40	46	50

仿真时使用 SIGMA KOKI 公司生产的透镜,表 2 列出了透镜的参数,其中  $f$  为焦距,  $r$  为曲率半径,  $A \times B$  为柱面透镜长  $\times$  宽,  $D$  为球面透镜直径,  $t_e$  为

表 2 透镜参数(参考波长 546.1 nm)

Tab.2 Parameters of lenses (reference wavelength 546.1 nm)

	Type	$f$ /mm	$r$ /mm	$A \times B$ /mm <sup>2</sup>	$D$ /mm	$t_e$ /mm	$t_c$ /mm
Slow axis collimation lens	CLB-2020-25PM	25	12.98	20 $\times$ 20	-	7.0	2.3
Fast axis collimation lens	CLB-2020-100PM	100	51.90	20 $\times$ 20	-	4.0	3.0
Expansion incidence lens	SLB-25.4-30PM	30	15.57	-	25.4	8.3	1.7
Expansion emerging lens	SLB-80-150PM	150	77.85	-	80	14.1	3.0
Beam focusing lens	SLB-80-100PM	100	51.90	-	80	21.8	3.0

透镜边缘厚度,  $t_c$  为透镜中心厚度。

平凸透镜无限远共轭成像具有如下特点:(1)用于聚焦光线时,平行光从凸面一侧入射,球差较小,成像更清晰,即焦点光斑较小;(2)把点光源变成平行光时,光线由平面一侧入射可得到更高平行度出射光线。依据以上成像特点设定光路中各平凸透镜放置方向。

调用仿真软件内部聚焦、准直评价函数,将光学元件的坐标值添加为优化变量进行优化,结果如图 5 所示,其中的黑色实线代表光线追迹效果,  $L_x$

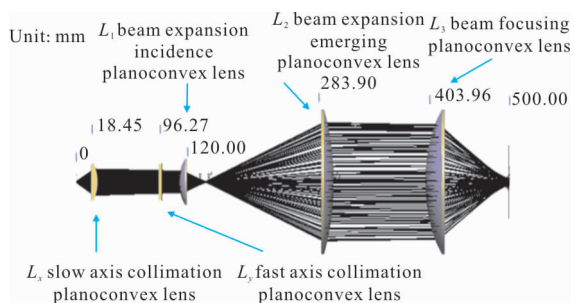


图 5 光学系统空间坐标及光线追迹

Fig.5 Spatial position of the lens and results of ray tracing

和  $L_y$  透镜分别为慢轴准直透镜和快轴准直透镜,二者组成准直单元,  $L_1$  和  $L_2$  组合为扩束单元,  $L_3$  为聚焦透镜。

图 6 和图 7 分别为 LD 光束经扩束单元扩束后在距离光源 50 cm 和 2 500 cm 处的横截面功率分布,光斑半径分别为 41、47 cm,小于  $\sqrt{2}$  倍束腰半径,处于瑞利距离,说明光束平行度得到进一步提高。如图 8 所示,光束整形系统将 LD 光束功率汇聚于透镜焦点处 4 mm 直径腰斑,说明激光功率密度得到提高。

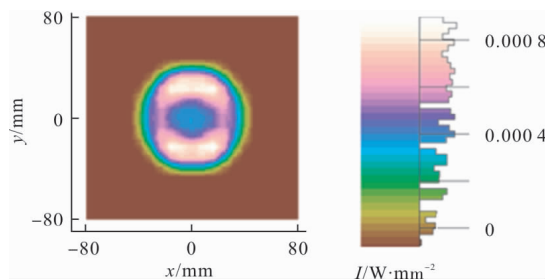


图 6 扩束镜出射光束在距离 LD 光源 50 cm 处功率密度分布  
Fig.6 Expanded beam power density distribution at 50 cm away from LD

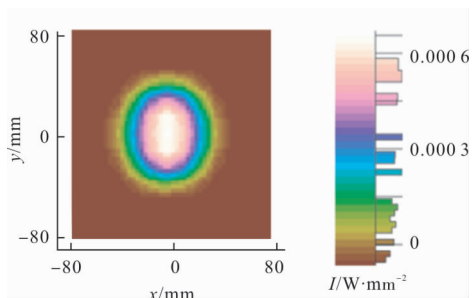


图 7 扩束镜出射光束在距离 LD 光源 2 500 cm 处功率密度分布  
Fig.7 Expanded beam power density distribution at 2 500 cm away from LD

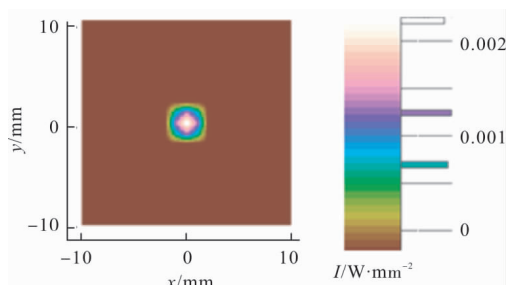


图 8 光束在汇聚透镜焦点处功率密度分布  
Fig.8 Beam power density distribution at the focus of the focal lens

### 3 光束整形系统实验

根据仿真优化的光学元件间距,搭建光路平台进行实物验证,如图 9 所示,从左至右依次为 LD 驱动电源(通过调节驱动电压可连续调节激光二极管输出功率)、LD、慢轴准直柱面透镜、快轴准直柱面透镜、扩束单元入射透镜、扩束单元出射透镜及聚焦透镜。

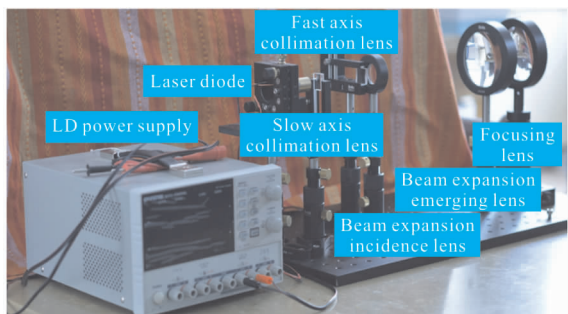


图 9 激光二极管光束整形系统  
Fig.9 LD beam shaping system

LD 如图 10(a)所示,其安装了散热铜柱并固定在俯仰角、方位角可调的夹持器上(见图 10(b))。

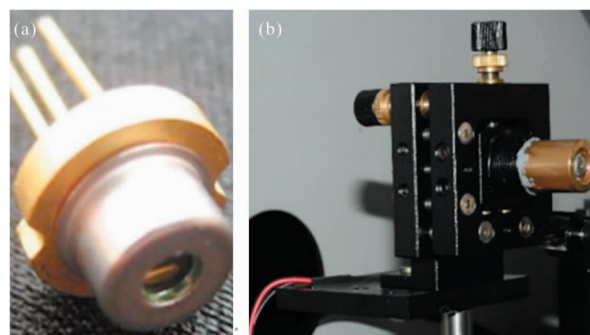


图 10 (a)半导体激光二极管;(b)装配散热铜柱及可调底座  
Fig.10 (a) Semiconductor LD;(b) LD fixed to the adjustable mount

图 11(a)、(b)分别为 LD 出射光束经过扩束单元后在 50、2 500 cm 处的光斑形状,说明 LD 光束经过扩束后,平行度得到改善。

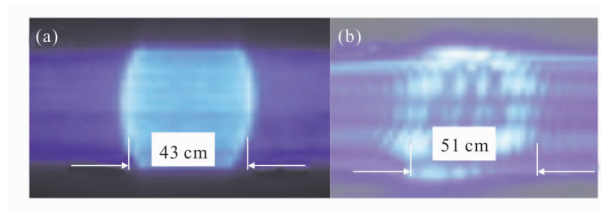


图 11 LD 光束经准直及扩束后在(a) 50 cm 和 (b) 2 500 cm 处光斑形状

Fig.11 Spot shape of collimated and expanded LD beam at (a) 50 cm and (b) 2 500 cm

实验时,对 LD 加载 4.0 V 的偏置电压,使用激光功率计测量 LD 的输出功率为 376 mW。为获得光束整形后的功率密度,以光斑中心为圆心,测量不同直径圆内多个点的激光功率并取平均值,通过差分计算出相邻同心圆所形成的圆环内激光功率及圆环面积,二者求比值,得到不同圆环内的平均激光功率密度。文中测量的光斑直径为 1.00、1.25、1.50、1.75、2.00、2.25、2.50 mm。图 12 橙线为平均激光功率密度离散值所绘制的折线图,其趋势表明光斑半径越大,激光功率密度越小。蓝线为拟合离散数据,为高斯曲线,近似代表聚焦透镜焦点处光斑功率密度的整体分布。图 13 是不同光斑直径下激光功率仿真结果(蓝色曲线)与实验结果(蓝色折线)的对比,实验结果与仿真结果基本吻合。红色折线为不同直径光斑内激光功率同二极管输出总功率之比。由图 13 可知,1 mm 直径圆内激光功率为 252 mW,

约占 LD 出射光束总功率的 67%。说明光束整形系统在实现提高激光功率密度的同时具备较高的功率传输效率。

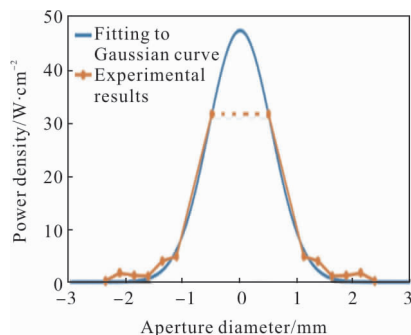


图 12 光束功率密度离散点拟合为高斯曲线

Fig.12 Fitting the discrete points of power density to Gaussian curve

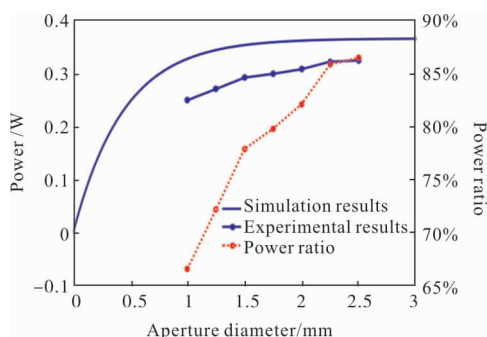


图 13 激光功率同光斑直径函数关系

Fig.13 Relationship between the laser power and aperture diameter

## 4 结 论

提出并实验验证了一种提高激光功率密度的光束整形方法，使用准直、扩束及聚焦单元的设计思路，成功地将半导体激光二极管 67% 的能量汇聚于直径 1 mm 的圆内，激光功率密度优于 30 W/cm<sup>2</sup>。这说明文中设计的 LD 光学整形系统功率传输效率高，采用分立光学元件实现的光束整形系统结构简单、易于搭建，具有较高的应用价值。

## 参 考 文 献:

- [1] Wan Zhongjie. The Fourier transform and fractional Fourier transform of Gaussian beam[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2016. (in Chinese)
- [2] Lu X Z, Lin C, Lin Z H, et al. Laser beam shapers applied in the laser micro-jet processing [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2010, 29(32): 1925-1929.
- [3] 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)
- [4] Xu Dan, Huang Xuesong, Jiang Menghua, et al. 500 W fiber-coupled semiconductor laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (6): 0606003. (in Chinese)
- [5] Baker Howard J. Beam shapers for high power lasers, fabricated by laser micro-machining[C]//Conference on Quantum Electronics and Laser Science, 2009: 1-2.
- [6] Chen Benyong, Xu Zheyi, Zhang Shihua, et al. Laser diode beam shaping method based on complex amplitude modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 153-160. (in Chinese)
- [7] Li Fengyou, Li Hongjun, Lu Zhenwu, et al. Focused spot shaping in laser writing system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 14-18. (in Chinese)
- [8] Liu Hua. Gaussian beam shaping diffractive optical element designed by Hankel transformation [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 277-283. (in Chinese)
- [9] Zhang Zhenrong, Wang Cheng, Li Guohua, et al. Exciting laser beam shaping in planar laser-induced fluorescence experiment[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 359-364. (in Chinese)
- [10] Zhang Shuang, Qin Hua, Yang Kai, et al. Particle swarm optimization method for designing aspheric lens Gaussian beam shaping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1206005. (in Chinese)
- [11] Wu Hualing, Guo Linhui, Yu Junhong, et al. Design of 500 W-output fiber-coupled diode laser module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (10): 1005005. (in Chinese)