

高均匀性半导体激光器堆栈匀化系统

雷呈强¹ 汪岳峰¹ 殷智勇² 尹韶云³ 孙秀辉³ 周 全¹

¹ 机械工程学院电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003

² 装备学院航天指挥系, 北京 101416

³ 中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电技术研究中心, 重庆 400714

摘要 半导体激光器由于自身波导结构的不对称性导致光强分布不均匀而限制了其在工业加工上的应用, 为了对半导体激光光束进行整形以获得均匀光斑, 设计了一种基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统。分析了微透镜阵列对半导体激光匀化的原理, 通过微透镜边缘衍射对匀化光斑的影响确定了微透镜孔径范围。采用 6bar 条半导体激光器堆栈对微透镜阵列光束匀化系统进行了仿真和实验验证, 实现了均匀性为 92.59% 的光斑, 能量传输效率为 91.19%。该匀化系统在半导体激光焊接、熔覆以及硬化等表面处理中具有很强的实用性。

关键词 激光光学; 半导体激光器堆栈; 微透镜阵列; 光束匀化; 光斑均匀性

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s114005

High Homogenization Diode Laser Stack Beam Shaping System

Lei Chengqiang¹ Wang Yuefeng¹ Yin Zhiyong²

Yin Shaoyun³ Sun Xiuhui³ Zhou Quan¹

¹ Department of Electronic and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

² Department of Space Command, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

³ Integrated Optics and Electronic Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Science, Chongqing 400714, China

Abstract Intensity distribution of diode laser is not uniform due to the broad-area and ridge-waveguide designs, poor beam quality is the limiting factor of industrial applications. In order to achieve homogenized spot by beam shaping of high-power diode laser stack, a homogenization system for diode laser stack based on microlens array is designed. The diode laser beam shaping theory of microlens array is analyzed. The lower limit of clear aperture of microlens is confirmed by analysis of the impact of the diffraction of microlens edge on the spot homogeneity. The simulation and experimental test are carried out for the microlens array beam shaping system by a diode laser stack with 6 bars, realizing the spot with the homogeneity of 92.59% and energy utilization of 91.19%. The beam shaping system can be well used in diode laser welding, cladding, surface hardening and other industrial fields.

Key words laser optics; diode laser stack; microlens array; beam homogenization; spot homogeneity

OCIS codes 140.2010; 140.3300; 220.4830

1 引 言

半导体激光器(LD)具有体积小、重量轻、光电转换效率高、使用寿命长、可靠性高等优点,随着输出功率的不断提高,其已经在工业加工领域得到了广泛应用^[1-3]。当前实用化的半导体激光器受到其自身波导结构的限制,快慢轴方向发散角较大且不对称,输出光束近似为带有像散的椭圆高斯光束,导致光强分布不均

收稿日期: 2015-02-15; **收到修改稿日期:** 2015-03-15

作者简介: 雷呈强(1987—),男,博士研究生,主要从事半导体激光光束整形和固体激光技术方面的研究。

E-mail: lcqguangxue@163.com.

导师简介: 汪岳峰(1963—),男,博士,教授,主要从事固体激光器和光电检测技术方面的研究。E-mail: wyf_oec@163.com

匀^[4-5]。提高光束质量对半导体激光器的应用至关重要,尤其是大功率的半导体激光器堆栈,虽然可以依靠增加发光单元数量来提高功率但总是伴随着光束质量的下降。因此,必须对半导体激光器输出的光束进行整形,以满足实际应用需求^[6-7]。尤其在激光焊接、熔覆和硬化等表面处理应用中,除了功率密度外,还要求光源在工作面的光斑能量分布均匀。

为了得到均匀光斑,常采用成像透镜和空心导管等基于折/反射的方法,其主要缺点是匀化效果受输入光强分布影响较大、系统体积较大、且经过空心导管耦合后光束发散角增大^[8-9]。而基于微透镜阵列的光束匀化系统体积小,能量传输效率高,匀化效果对输入光强分布不敏感,可实现一定的焦深^[10-13]。微透镜阵列光束匀化系统源于科勒照明系统,其早期主要应用于投影照明系统中。因其在光束匀化中的良好性能,随之在激光光束匀化方面也获得了应用,并且微透镜阵列用于激光光束匀化在2000年后逐渐成为热点。美国Sanida国家实验室的Dickey F M等^[14-15]分别在2000年和2006年出版两本关于激光光束匀化的专著,其中都介绍了基于微透镜阵列的激光光束匀化的原理及方法。德国夫朗和费研究所、LIMO公司、DILAS公司等微透镜阵列的理论、应用及加工等方面进行了大量的研究^[16-17]。其中最为典型的是DILAS公司的Köhler B等^[18]于2007年基于微透镜阵列对半导体激光光束进行了整形,实现了功率密度为 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 、面积为 $55\text{mm}\times 20\text{mm}$ 、均匀性大于90%的平顶光斑输出。在国内,上海光学精密机械研究所早期基于激光核聚变中靶面的均匀照射需求在透镜阵列的光束匀化方面进行了一些研究^[19-21]。2010年后黄峰等^[22-24]针对半导体激光抽运固体激光器的特定需求对微透镜阵列半导体激光匀化原理及系统设计方面进行了研究。本文分析了微透镜阵列半导体激光光束匀化原理,通过微透镜的边缘衍射确定了匀化微透镜的孔径范围,设计了一种基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统,并结合实例对系统进行了仿真以及实验验证,能很好地满足半导体激光在工业加工中的应用要求。

2 微透镜阵列半导体激光光束匀化原理

微透镜阵列光束匀化系统主要由两个部分构成:将入射光束分成大量细光束的双列微透镜阵列和使各子光束在目标面上叠加的积分透镜,其原理如图1所示。在双列微透镜阵列中,第一列任意一微透镜与第二列中对应位置的微透镜组成一个通道,每个通道成为分割光束的重要单元元件。在每一通道中两微透镜的参数完全相同,且通道的长度正好等于微透镜的焦距。第一列微透镜阵列将入射光分割为一系列子光束,每个子光束与微透镜阵列中的子透镜孔径相对应,这些子光束经第一子透镜聚焦至对应的第二子透镜孔径上并通过第二子透镜后入射到积分透镜孔径,从而完成在各自通道内的传输,如图2所示。所有的子光束通过积分透镜后将在后焦面重合,每个子光束范围内的微小不均匀性将在重合的过程被平滑从而获得均匀光斑。

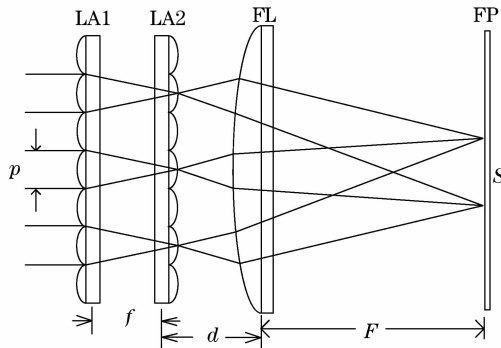


图1 微透镜阵列匀化系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of homogenizing system based on microlens array

由上述分析可以看出,微透镜阵列匀化系统能够实现半导体激光光束匀化,原因有以下三点:1)微透镜阵列凭借大量子透镜将入射光束分割成一系列细光束,因为细光束的光强分布只是入射光束分布中的一小部分,所以局部均匀性必然高于整体均匀性;2)对被轴对称的两片微透镜分割得到的一对细光束进行分析,每一束细光束的光强分布都不够均匀,但两束细光束的光强变化过程呈镜面对称,当两束细光束在目标平面处会聚叠加时,光强分布由于彼此互补而变得更加平滑;3)所有被微透镜阵列分割得到的大量细光束都在目标平面处会

聚,每一点处的光强都是所有细光束在这一点处的光强叠加,相当于积分过程,消除了部分光束的不均匀对整体光强分布的影响。由微透镜阵列匀化光束原理以及匀化系统结构参数得到抽运光斑尺寸 s 为^[14]:

$$s = \frac{F}{f}p \approx 2F \cdot NA, \quad (1)$$

其中, p 、 f 、 NA 分别为微透镜阵列中各个子透镜的孔径、焦距和数值孔径, F 为积分透镜的焦距。由(1)式可以看出,目标面处的光斑相当于由微透镜孔径 p 放大 F/f 倍得到,同时光斑形状与微透镜孔径一致,因此,基于微透镜阵列的光束匀化系统可以实现多种中心对称光斑。

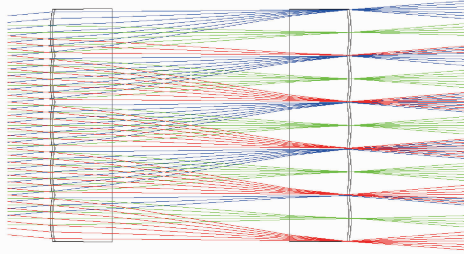


图2 入射光束经微透镜阵列分束

Fig. 2 Incident beam splitted by microlens array

3 匀化系统设计

3.1 慢轴光束准直

微透镜焦距越短,口径越大,即矢高越大,其表面刻蚀过程中越容易产生误差,进而对匀化光斑形状及均匀性产生影响。为了降低微透镜表面矢高,其数值孔径应小于 0.06,半导体激光光束的发散角要小于微透镜阵列的数值孔径要求方能使其进入匀化系统,因而,光束准直是半导体激光光束整形的前提和关键。所用波长为 808 nm 的 6 bar 条半导体激光器堆栈带有快轴准直透镜,其具体参数如表 1 所示。快轴经准直后最大光强 $I_{1/2}$ 处发散角约为 1° ,满足微透镜数值孔径要求;慢轴方向 $I_{1/2}$ 处发散角约为 10° ,必须经过准直方能满足要求。由于半导体激光器堆栈填充因子达到 0.5,意味着半导体光束经快轴准直后在慢轴方向上已经叠加在一起,无法采用微柱透镜对每一发光单元进行准直,而采用柱透镜对慢轴光束整体进行准直更为可行。(表 1 中 FWHM 为半高全宽)

表 1 激光二极管阵列光源参数

Table 1 Parameters of LD stack source

Item	Parameters
Wavelength/nm	808
Beam divergence(FWHM)/($^\circ$)	$1_\perp, 10_\parallel$
Bar number	6
Bar length/mm	10
Emitter number	49
Emitter area/ μm^2	100×1
Emitter pitch/ μm	200

慢轴方向准直透镜各参数之间的关系如图 3 所示。半导体激光器 bar 条长度为 a ,慢轴方向光束发散角为 2α ,准直后剩余发散角为 θ_{rem} 。分别来自中心处与边缘处高度差为 $l=a/2$ 的两个发光单元的光线,入射到准直柱透镜表面的高度分别为 b 和 c ,其高度差为 $c-b$ 。而半导体激光器慢轴发散角 $2\alpha=10^\circ$,其半角的正切值为 0.0875,可约等于 0,因此两点的高度差 $c-b$ 可近似等于 $a/2$ 。又因为慢轴方向准直柱透镜的焦距 f_c 远大于厚度 h ,所以可忽略两主平面的间隔对剩余发散角 θ_{rem} 影响。基于以上两点近似,光束经慢轴准直后剩余发散角 θ_{rem} 就可以根据(2)式进行估算。可以看出,半导体激光器慢轴方向的准直效果与 bar 条长度 a 和准直透镜焦距 f_c 有关,而与发光单元的尺寸,填充因子及出射光束的发散角无关,这就增加了准直微透镜的通用性。在设计过程中,入射到准直柱透镜边缘的离轴光线受到像差的影响,出射后剩余角度大于理论值。这时需要将透镜的面型由球面改为双曲面,以兼顾中心光束与边缘光束的剩余发散角,实现半导体激光

器慢轴光束的最好准直效果。 θ_{rem} 的表达式为

$$\theta_{rem} \approx \arctan\left(\frac{a}{2f_c}\right). \quad (2)$$

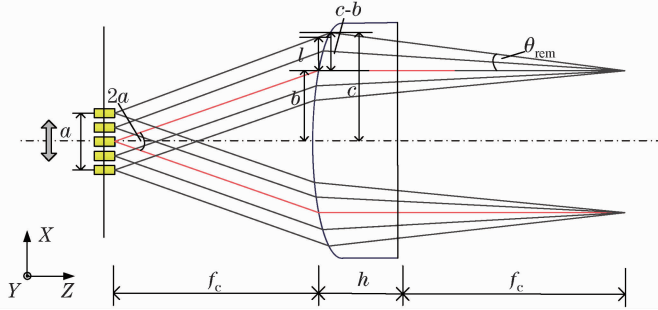


图3 慢轴方向光束准直原理图

Fig. 3 Schematic diagram of slow axis beam collimation

根据微透镜数值孔径要求,结合柱透镜加工实际情况,设定慢轴准直后剩余发散角半角目标值为 2.5° ,柱透镜具体参数如表2所示。慢轴准直后剩余发散角半角约为 2.5° (90%能量分布),如图4所示。

表2 柱透镜主要参数

Table 2 Main parameters of cylindrical lens

Item	Parameters
Material	Fused silica
Refractive index@808nm	1.45
Effective focal length/mm	114.52
Aperture size/mm	35
Radius of curvature/mm	51.53

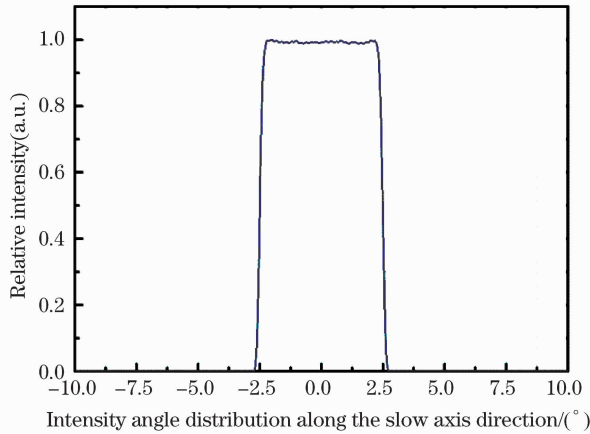


图4 慢轴方向准直后剩余发散角

Fig. 4 Remaining divergence of slow axis after beam collimation

3.2 微透镜及孔径选择

通过上述微透镜阵列半导体激光光束匀化机制分析可知,微透镜阵列匀化系统主要通过先分束而后积分叠加的方式对光束进行匀化,在这一过程中不均匀成分得到了平滑,均匀性得到了提高。表面上分割光束的子透镜数量越多得到的光斑均匀性越好,但在半导体激光器堆栈面积一定的情况下,子透镜数量越多意味着其口径越小,这样目标光斑会因单微透镜的衍射效应影响而导致光强分布锐利程度下降。所以,在设计微透镜口径时应充分考虑衍射效应对匀化光斑的影响,而非涅耳数是评估微透镜衍射效应对目标光斑均匀性干扰程度的有效方法^[15]。

菲涅耳数等于光程差(O_{pd})对应的半波数量,其表达式为^[14]:

$$N_F = 2 \times O_{pd} = \frac{r^2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_w} \frac{1}{R_o} \right), \quad (3)$$

其中 R_w 是波前面的曲率半径, R_o 是聚焦透镜的曲率半径, r 为子孔径半径, λ 是入射光波波长。对应于微透镜阵列匀化系统有 $1/R_w = 1/f + 1/F$, $1/R_o = 1/F$, $r = p/2$, 其中 p 、 f 分别为微透镜阵列中各个子透镜的孔径和焦距, F 为积分透镜的焦距, 将 R_w 、 R_o 及 r 值代入(3)式可得:

$$N_F = \frac{p^2}{4\lambda f}. \quad (4)$$

为了准确设计微透镜阵列匀化系统, 减小微透镜孔径边缘衍射对匀化光斑的影响, 微透镜菲涅耳数 N_F 至少要大于 10; 同时为保证入射光束完全进入匀化系统并在相应的通道内完成光束分割, 光束入射角度的正切值不得超过微透镜的数值孔径, 即有:

$$\begin{cases} \frac{p^2}{4\lambda f} \geq 10 \\ \frac{p}{2f} \geq \tan \alpha \end{cases}, \quad (5)$$

其中 α 为入射光束的发散角半角。综上所述, 即可确定用于匀化的微透镜孔径范围。

4 仿真与实验

基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统框图如图 5 所示, 该匀化系统由半导体激光器堆栈、慢轴准直柱透镜、双列微透镜阵列以及积分透镜组成。其中, 柱透镜用于半导体激光器堆栈慢轴光束准直; 双列微透镜阵列用于分割光束, 将入射光束分割成大量细光束; 积分透镜用于细光束积分叠加, 将大量细光束会聚叠加在焦平面处, 从而实现均匀光斑。

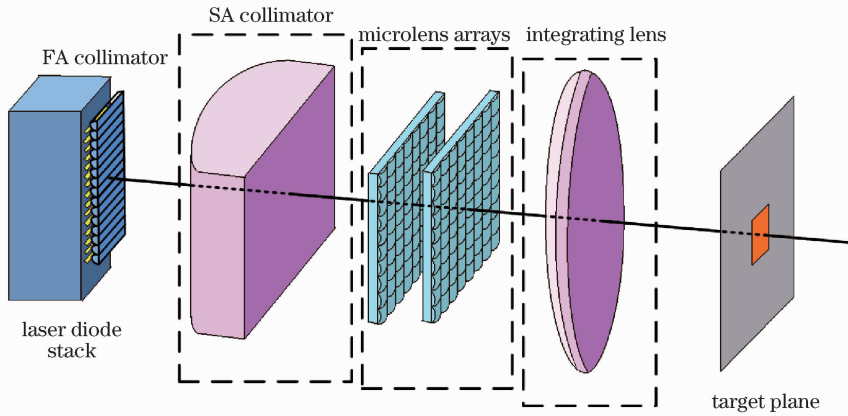


图 5 微透镜阵列匀化系统框图

Fig. 5 Diagram of homogenizing system based on microlens array

以 808 nm 连续激光输出 6bar 条半导体激光器堆栈为例对上述微透镜阵列匀化系统进行仿真, 半导体激光器堆栈具体参数如表 1 所示, 准直柱透镜参数如表 2 所示。通过(5)式设定微透镜孔径大小为 $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.0485, 积分透镜焦距为 31 mm。仿真光斑如图 6(a)、(b)所示, 由图可知: 通过系统仿真, 得到一大一小为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 均匀方形光斑, 其快慢轴方向光场均为平顶分布, 光强分布不均匀性为 5.25%。

对系统进行实验验证并对获得的光斑光强分布进行测试。通过 CCD 拍摄得到的光斑图样如图 7(a)所示, 其快慢轴方向的光场分布如图 7(b)所示。在积分透镜后焦面上得到大小约为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的光斑, 其中心区域与仿真结果一致为平顶型分布, 其尺寸约为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 光强分布不均匀性为 7.41%。通过基于积分球的高功率激光测量装置分别对整形前后半导体激光器堆栈的输出功率进行测试, 其 $p-I$ 曲线图如图 8 所示。当输入电流 I 为 100A 时, 半导体激光器堆栈的最大输出功率为 619.27W, 经过基于微透镜阵列的光束匀化系统后最大输出功率为 564.7W, 可得匀化系统的能量传输效率为 91.19%。

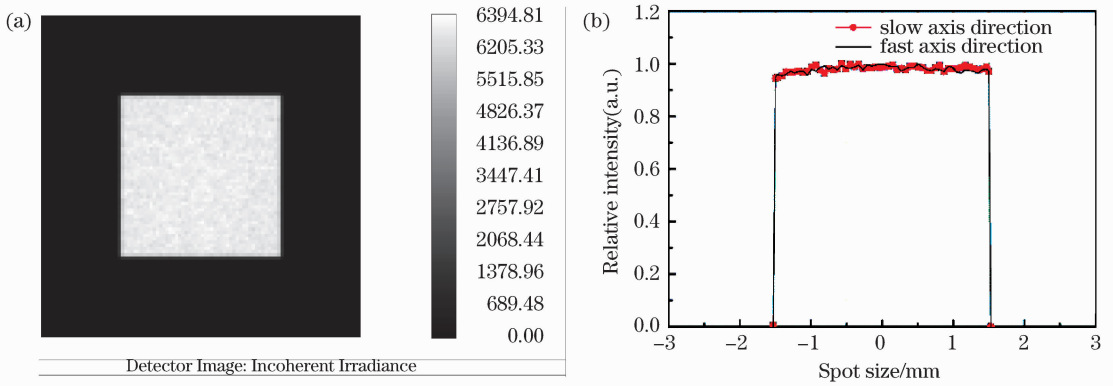


图 6 仿真目标平面处光强分布。(a) 仿真光斑强度分布；(b) 仿真光斑快慢轴方向强度分布
 Fig. 6 Simulation of intensity distribution test at target plane. (a) Simulation of spot field distribution;
 (b) simulation of spot field distribution in fast and slow axis direction

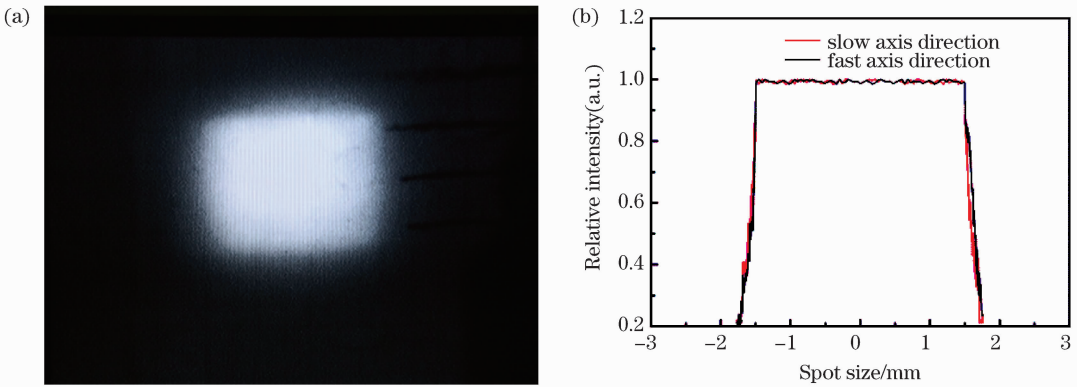


图 7 目标平面处光强分布。(a) 实验光斑强度分布；(b) 实验光斑快慢轴方向强度分布
 Fig. 7 Intensity distribution test at target plane. (a) Test of spot field distribution;
 (b) test of spot field distribution in fast and slow axis direction

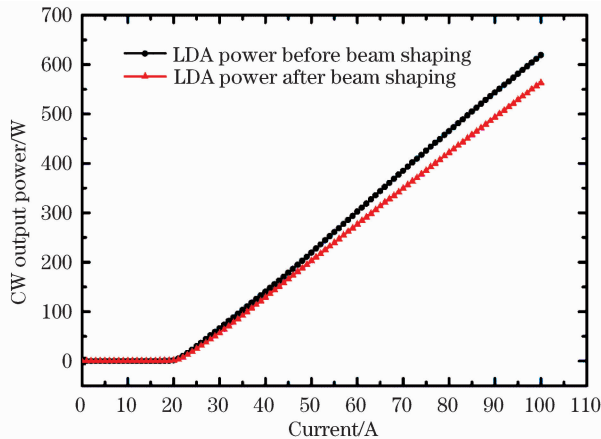


图 8 整形前后半导体激光器堆栈输出功率图
 Fig. 8 CW output power of LD stack before and after beam shaping

5 结 论

浇半导体激光器由于自身波导结构的不对称性导致输出光束光强分布不均匀而限制了其应用。为了对半导体激光光束进行整形以获得均匀光斑,设计了一种基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈光束匀化系统。并采用 6bar 条半导体激光器堆栈对微透镜阵列光束匀化系统进行了仿真和实验验证,实现了均匀性为

92.59%的均匀光斑,系统能量传输效率为91.19%。在工业加工领域诸如激光焊接、熔覆和硬化等激光表面处理应用中,除了光斑均匀性要求外,不同的激光加工方式要求不同的激光功率密度,同时还要求几何尺寸合适的光斑,而基于微透镜阵列的光束匀化系统除了能获得均匀光斑外,对半导体激光器堆栈本身没有特殊要求,特定形状的光斑可通过改变微透镜孔径进行控制,因而该匀化系统在半导体激光工业加工领域具有很强的实用性。

参 考 文 献

- 1 Robin K. Huang, Bien Chann, Leo J. Missaggia, *et al.*. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. IEEE Photo Technol Lett, 2007, 19(4):209-211.
- 2 Andre Timmermann, Jens Meinschien, Peter Bruns, *et al.*. Next generation high-brightness diode lasers offer new industrial applications [C]. SPIE, 2008, 6876:68760U.
- 3 David Havrilla, Marco Holzer, Rudiger Brockmann, *et al.*. Dramatic advances in direct diode lasers[C]. SPIE, 2010, 7583:7583B.
- 4 F. Bachmann, P. Loosen, R. Poprawe. High Power Diode Lasers[M]. New York: Springer, 2007.
- 5 S. Haiyin. Laser Diode Beam Basics, Manipulations and Characterizations[M]. New York: Springer, 2012.
- 6 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan, *et al.*. Study on beam shaping of high power diode lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202010.
彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠, 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2):0202010.
- 7 Zhang Jun, Peng Hangyu, Liu Yun, *et al.*. High brightness diode laser source based on three-wavelength multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4):0402011.
张 俊, 彭航宇, 刘 云, 等. 三波长合束高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402011.
- 8 Gao Hongyun, Fu Rulian, Qin Hua, *et al.*. Novel coupling system in solidstate laser end-pumped by LDA-taper duct[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 17(4):419-423.
邵洪云, 傅汝廉, 秦 华, 等. LDA 端泵浦固体激光器的新型耦合系统—圆锥形导管[J]. 光电子 • 激光, 2006, 17(4):419-423.
- 9 Liu Xiaojuan, Fu Rulian, Qin Hua, *et al.*. Theoretical and experimental research on lens duct for LDA coupling[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2):167-172.
刘晓娟, 傅汝廉, 秦 华, 等. LDA 耦合系统透镜导管的理论与实验研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2):167-172.
- 10 P. Schreiber, P. Dannberg, B. Hofer, *et al.*. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion[C]. SPIE, 2005, 5876:58760K.
- 11 F. Wippermann, U. D. Zeitner, P. Dannberg, *et al.*. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays[J]. Opt Express, 2007, 15(10):6218-6231.
- 12 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Jia Wenwu, *et al.*. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7):0702007.
殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. 中国激光, 2012, 39(7):0702007.
- 13 Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1):0102005.
刘志辉, 杨 欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. 中国激光, 2014, 41(1):0102005.
- 14 Dickey F. M. . Laser Beam Shaping: Theory and Techniques[M]. New York: CRC press, 2000.
- 15 Dickey F. M. , Lizotte T E, Holswade S. C. , *et al.*. Laser Beam Shaping Application[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- 16 Peter Schreiber, Sergey Kudaev, Peter Dannberg, *et al.*. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays[C]. SPIE, 2005, 5942: 59420K.
- 17 O. Homburg, D. Hauschild, F. Kubacki, *et al.*. Efficient beam shaping for high-power laser applications[C]. SPIE, 2006, 6216:621608.
- 18 Bernd Köhler, Axel Noeske, Tobias Kindervater, *et al.*. 11 kW direct diode laser system with homogenized 55 × 20 mm(2) top-hat intensity distribution[J]. SPIE, 2007, 6456:64560O.
- 19 Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun, *et al.*. Uniform illumination of large focal targets using a lens array[J]. Chinese J. Lasers, 1985, 12(5):257-260.
邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 等. 用透镜阵列实现大焦斑面的均匀照射[J]. 中国激光, 1985, 12(5):257-260.
- 20 Qiu Yue, Qian Liejia, Huang Hongyi, *et al.*. Improve illumination uniformity by suppressing the diffraction of a lens array[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(1):27-31.
丘 悦, 钱列加, 黄宏一, 等. 用消衍射方法改善透镜阵列的辐照均匀性[J]. 中国激光, 1995, 22(1):27-31.
- 21 Jiang Xiujian, Zhou Shenlei, Lin Zunqi, *et al.*. Improved target irradiation uniformity using two-dimensional spectral dispersion and lens array[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(11):1533-1537.
江秀娟, 周申蕾, 林尊琪. 利用二维光谱色散和透镜阵列改善靶面辐照均匀性[J]. 中国激光, 2007, 34(11):1533-1537.
- 22 Huang Feng, Jia Wenwu, Hou Junyan, *et al.*. Laser diode end-pumped coupling system applying multi-aperture beam integration principle [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3):437-441.
黄 峰, 贾文武, 侯军燕, 等. 应用多孔径光束积分原理的 LD 端面抽运耦合系统[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3):437-441.

- 23 Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng, *et al.*. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2):0202008.
贾文武, 汪岳峰, 黄 峰, 等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. 中国激光, 2011, 38(2):0202008.
- 24 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Yin Shaoyun, *et al.*. Design of semiconductor laser shaping system based on hyperbola substrate microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6):0602016.
殷智勇, 汪岳峰, 尹韶云, 等. 基于双曲面基底微透镜阵列的半导体激光器整形系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6):0602016.

栏目编辑: 韩 峰