

半导体激光器光束匀化系统的光学设计

孙玉博^{1,2}, 熊玲玲¹, 张 普¹, 王明培^{1,2}, 刘兴胜³

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西安炬光科技股份有限公司, 陕西 西安 710119)

摘 要: 为了提高半导体激光器光束的均匀性, 设计了非球面与微柱透镜阵列相结合的匀光系统。快轴方向利用光线追迹设计非球面匀化透镜; 慢轴方向采用微柱透镜阵列对光束进行分割叠加。半导体激光器输出光束通过该匀光系统, 在目标面上可以得到能量匀化的方形光斑。利用 Zemax 光学软件对半导体激光器单管和阵列进行匀化仿真, 验证了该匀化系统应用于半导体激光器整形的可行性, 得到了目标面动态范围变化对均匀度的影响程度, 研究了微柱透镜阵列间距变化及快轴匀化透镜旋转对光斑均匀度的影响。单管和阵列在输出面上的光斑均匀度均大于 90%, 能量传输效率分别为 95.4% 和 96.2%。该设计结果对半导体激光器光束匀化具有一定的参考价值。

关键词: 光束匀化; 半导体激光器; 微透镜阵列; 光学设计; 激光光学

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1205003

Optical design of laser diode beam-homogenizing system

Sun Yubo^{1,2}, Xiong Lingling¹, Zhang Pu¹, Wang Mingpei^{1,2}, Liu Xingsheng³

- (1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Communication, Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Focuslight Technologies Inc, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to improve the uniformity of the laser diode beam, a homogenization system combined aspheric and microlens lens array was designed. The aspheric homogenization lens was designed by using ray tracing in the direction of the fast axis, and the microlens array was used to segment and overlay the beam in the slow axis direction. Laser diode output beam passed through the homogenizing system, the energy homogenization of the square spot can be obtained on the target surface. By using Zemax optical software to simulate the single tube and array, the feasibility of the optical system was verified. The influence of target dynamic range change on uniformity was obtained, and the influence of the change of the distance between micro-cylindrical lens arrays and the rotation of fast-axis homogenizing lens on the uniformity was studied. The homogeneity of single tube and laser array on the output surface was over 90%, and the energy efficiency was 95.4% and 96.2%, respectively. The design results have certain reference value for the beam homogenization of laser diode.

Key words: beam homogenization; laser diode; microlens array; optical design; laser optics

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61334010)

作者简介: 孙玉博(1994-), 男, 硕士生, 主要从事半导体激光器光束整形方面的研究。Email: yuboswg@gmail.com

导师简介: 刘兴胜(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要从事高功率半导体激光器封装方面的研究。Email: liuxs@focuslight.com.cn

0 引言

半导体激光器(Laser Diode, LD)自诞生以来发展迅速,与其他类型激光器相比,具有体积小、成本低、效率高、寿命长等优点,长期以来在工业、军事、医疗等领域中有着广泛的应用^[1-4],在熔覆、泵浦、医疗美容、激光加热等领域对 LD 光束的均匀性有着严格的要求。半导体激光器自身波导结构的限制导致光强分布不均匀,远场光斑分布为椭圆高斯型,即快慢轴光束质量均衡性较差且发散角不一致,能量利用率不高,为了满足应用需求,必须对半导体激光器输出光束进行整形和匀化处理。

目前,半导体激光器匀化的方法主要有非球面透镜组^[5-6]、微透镜阵列法^[7-9]、复眼透镜^[10]等。其中,2011 年 Gao 等研究了利用 Zemax 软件设计高斯光束整形系统的方法,选择超洛伦兹函数作为平顶光分布函数设计匀化非球面透镜对快慢轴方向进行匀化^[6],然而非球面对慢轴方向的匀化效果较差而且非球面透镜只能针对单光束进行匀化;Liu 等提出了用衍射微透镜阵列对半导体激光光束进行匀化的方法,但是由于半导体激光器同一阵列中的光束之间相干很强,导致匀化光斑快轴方向出现干涉条纹^[9],而且衍射微透镜阵列法的曲面面型很难加工;复眼透镜光束匀化效果与复眼的密度有关,而且复眼透镜通常针对单光束光源^[12]。

文中通过非球面透镜与柱透镜阵列相结合的办法,在快慢轴两个方向分别匀化,结合实例用 Zemax 光学设计软件分别对 LD 单管和阵列光束匀化系统进行模拟,可以得到均匀度较高的光斑,该系统整体设计简单,容易实现。

1 光束匀化原理

1.1 快轴匀化

半导体激光器快轴光束发散角一般为 20°~40°,光束质量接近衍射极限,光束能量分布为基模高斯分布,非球面透镜可实现光束的匀化。快轴输出光束能量分布如图 1 所示。

阴影部分功率为:

$$A(x) = \frac{\pi P \omega^2}{2} [1 - e^{-2x^2/\omega^2}] \quad (1)$$

式中: P 为光束中心光强; ω 为激光功率下降到 $1/e^2$

处的光束宽度。输出平顶光斑半径为 S ,则

$$B(S) = \pi S^2 \cdot H \quad (2)$$

令 $A(x) = B(S)$, 则

$$S^2 = \frac{P \omega^2}{2H} [1 - e^{-2x^2/\omega^2}] \quad (3)$$

平顶光束输出半径为 K , 当 $R \rightarrow \infty$, 由公式(1)、(2)可得:

$$K^2 = \frac{P \omega^2}{2H} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(3)中,得:

$$S(x) = K \sqrt{1 - e^{-2x^2/\omega^2}} \quad (5)$$

基于光线追迹原理,通过公式(5)编写 Macro 程序进行镜头优化,输入坐标与像面上对应目标值归一化,将输入坐标等比例取样循环追迹可求得对应输出光束的目标值^[12]。

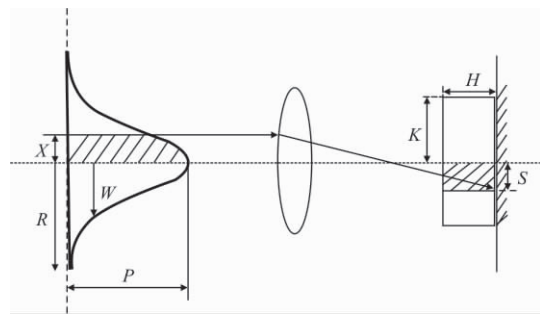


图 1 激光光束整形系统示意图

Fig.1 Sketch of laser beam shaping system

1.2 慢轴匀化

半导体激光器慢轴方向发散角范围一般为 6°~15°,光束质量较差,能量分布为多模-高斯分布。慢轴方向采用微柱透镜阵列对光束进行匀化,匀化原理如图 2 所示。图中从左到右分别是入射光束,第一组透镜阵列、第二组透镜阵列、傅里叶积分透镜和目标平面。

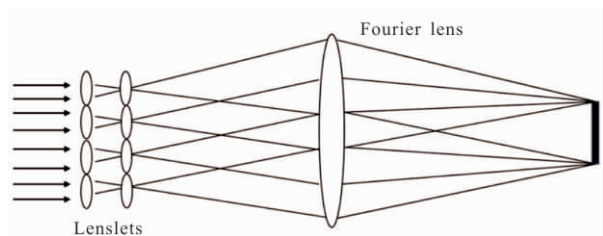


图 2 微透镜阵列匀化系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of homogenizing system based on microlens array

图 2 的入射光束为高斯分布,如图 3(a)所示。图 2 的入射光束通过第一组和第二组透镜阵列后被分割成多个光束,分割后光束强度如图 3(b)所示。分割后的光束经过积分透镜在输出面上叠加,如图 3(c)所示。每个子光束范围内的微小不均匀性将在重合的过程中获得均匀的光斑。目标光斑尺寸 $s^{[13]}$ 为:

$$s = p \frac{F}{f} \quad (6)$$

式中: p 和 f 分别为微柱透镜阵列的子单元口径和焦距; F 为积分透镜的焦距。由公式(6)可以看出,焦面处的光斑相当于由微柱透镜阵列孔径 p 放大 F/f 倍得到的,其形状与微透镜孔径一致。

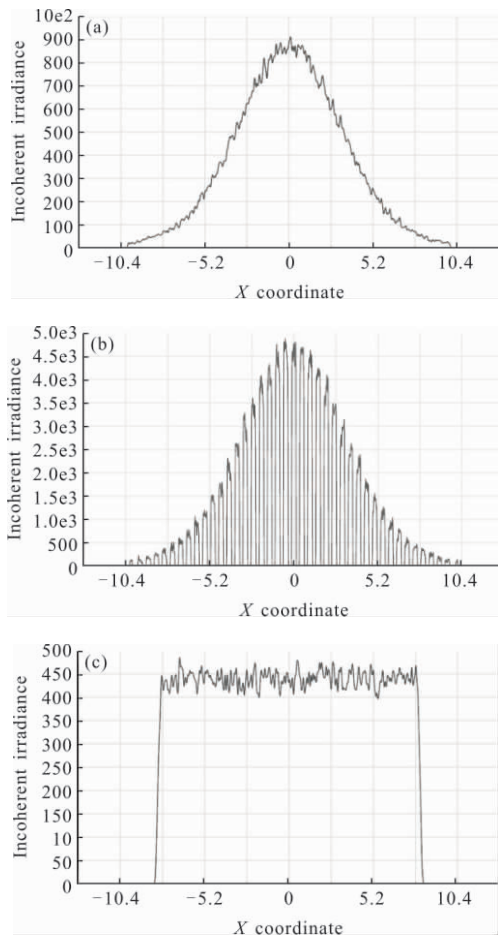


图 3 柱透镜阵列匀化过程

Fig.3 Cylindrical lens array homogenization process

均匀度的计算公式:

$$\gamma = \left(1 - \frac{\sum |E_i - \bar{E}|}{n \cdot \bar{E}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

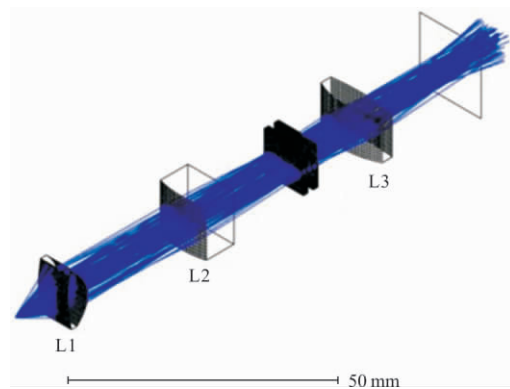
式中: E_i 为采样点数值; \bar{E} 为采样点平均值; n 为采样

点个数。均匀度值越大,能量分布越均匀。

2 光束匀化系统模拟仿真

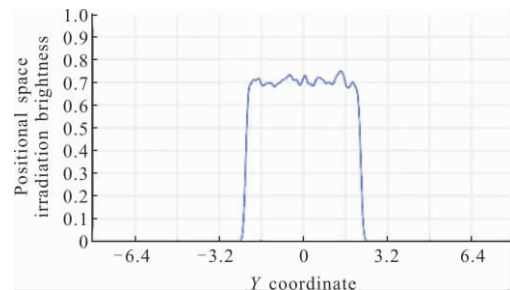
2.1 单光束匀化仿真

模拟的 LD 单管波长为 808 nm, 发光区尺寸 $200 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, 慢轴 X 方向发散角 $\theta_{//} = 8^\circ$, 快轴 Y 方向的发散角 $\theta_{\perp} = 34^\circ$ (半峰全宽)。基于方程(5)利用 ZEMAX 软件编程 Macro 命令进行优化,模拟结果如图 4 所示。系统总长为 90 mm, 系统中透镜依次为非球面透镜(L1), 慢轴准直镜(L2), 两组柱透镜阵列以及傅里叶积分透镜(L3)。光学元件材料选用 BK7 玻璃, 折射率 $n = 1.5168$ 。两个柱透镜阵列完全相同, 尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, Pitch 为 $250 \mu\text{m}$, 子透镜曲率半径为 0.711 mm , EFL 为 1.6 mm 。慢轴方向使用柱透镜代替微柱透镜阵列进行光束准直, 增加光束宽度, 可以被更多子透镜分割, 提高匀化效果。图 5 分别为出射光束与积分透镜后焦面的矩形光斑, 匀化后均匀度达到 93.6%, 光斑在快慢轴边缘范围分别占光斑不同方向尺寸的 2.84% 和 3.28%, 能量传输效率达到 95.4%。



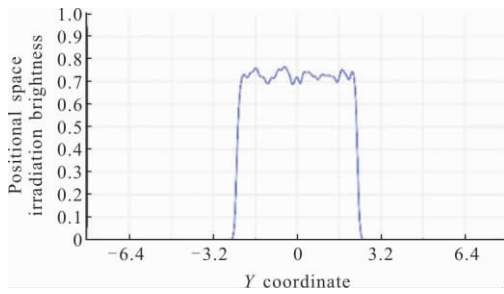
(a) 光路原理图

(a) Diagram of optical path



(b) 快轴能量分布

(b) Fast axis intensity distribution



(c) 慢轴能量分布

(c) Slow axis intensity distribution

图 4 匀化示意图和光强分布

Fig.4 Homogenization diagram and light intensity distribution

93.8%，光斑在快慢轴边缘范围分别占光斑不同方向尺寸的 4.34% 和 4.48%，能量传输效率达到 96.2%。

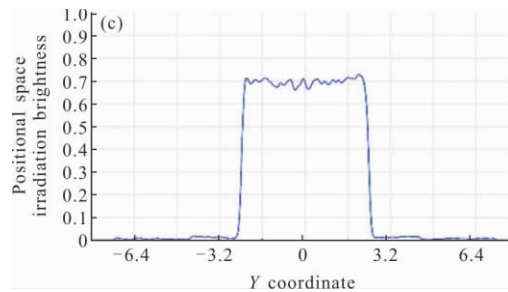
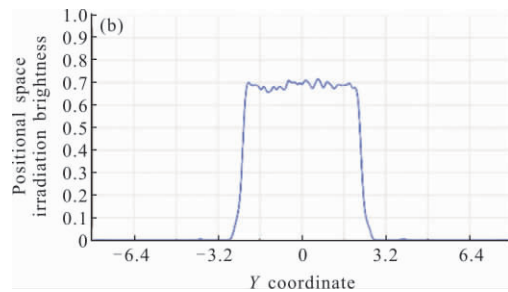
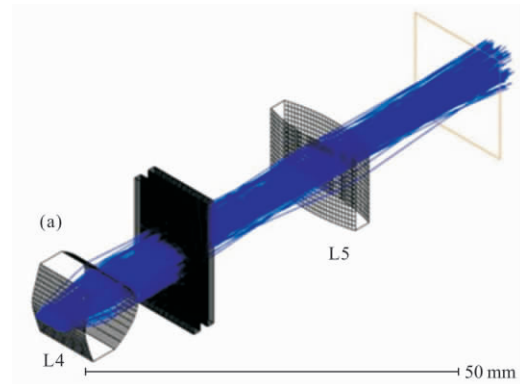


图 6 匀化示意图和光强分布

Fig.6 Homogenization diagram and light intensity distribution

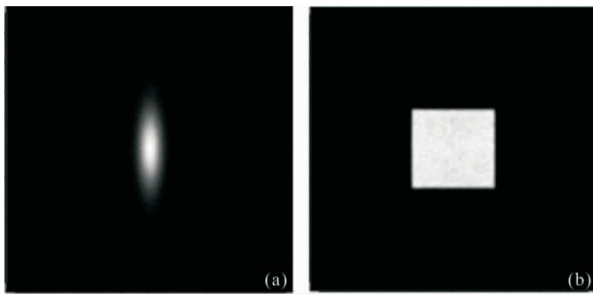


图 5 光斑追迹成像(a)出射光束(b)后焦面光斑

Fig.5 Spot tracking image(a) ejected beam (b) spot of back focal plane

模拟得到匀化系统中各透镜参数如表 1 所示。

表 1 透镜参数

Tab.1 Parameters of lens

Unit/mm	Ry1	Ky1	Ry2	Ky2	Rx1	Kx1	Rx2
L1	24.671	-19.003	-6.378	-0.899	-	-	-
Single emitter	L2	-	-	-	21.094	-2.271	-
L3	-	-	-	-	15.652	-1.997	-67.695

2.2 LD 阵列光束匀化仿真

模拟采用的 LD 阵列波长为 808 nm，发光区尺寸 100 μm×1 μm，慢轴 X 方向发散角 $\theta_{//}=6.5^\circ$ ，快轴 Y 方向的发散角 $\theta_{\perp}=36.5^\circ$ (半峰全宽)，9 个发光点。系统总长 54 mm，系统中透镜依次为非球面透镜 L4，两组微柱透镜阵列以及积分透镜 L5。为使子光束更多地覆盖透镜阵列的子孔径，取消慢轴准直镜，使每个发光点的光束被更多子透镜孔径分割并在积分透镜的后焦面叠加，这样会增大透镜阵列出射光束的发散角，需要通过积分透镜的焦距设计进行补偿。得到矩形光斑如图 6 和图 7 所示，匀化后均匀度达到

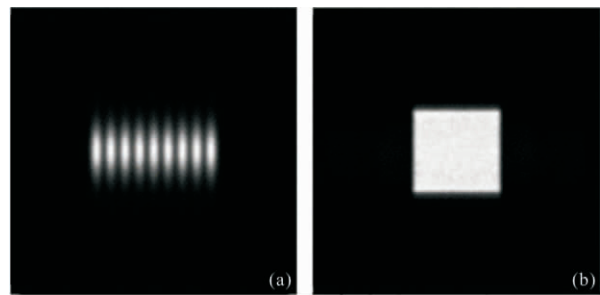


图 7 光斑追迹成像(a)出射光束(b)后焦面光斑

Fig.7 Spot tracking image(a) ejected beam (b) spot of back focal plane

模拟得到匀化系统中各透镜参数如表 2 所示。

表 2 透镜参数

Tab.2 Parameters of lens

Unit/mm	Ry1	Ky1	Ry2	Ky2	Rx1	Kx1	Rx2
Mini	L4	3.585	-9.543	-3.706	-0.883	-	-
bar	L5	-	-	-	28.123	-0.457	-25.119

2.3 结果分析及讨论

匀光后目标面动态范围能量均匀度变化情况如图 8 所示。在 10 mm 范围能量均匀度可达 92% 以上, 从图中可以看出探测面从积分透镜焦面远离透镜组时, 均匀度减小缓慢; 靠近透镜组时, 均匀度降低较快。

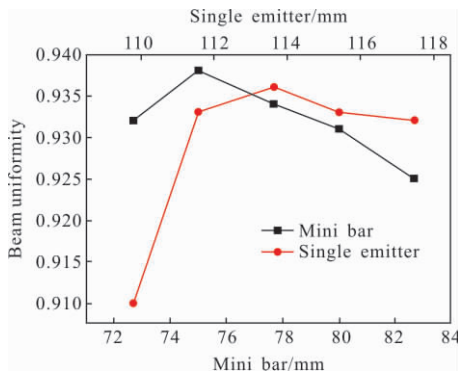


图 8 动态范围均匀度变化

Fig.8 Uniformity variation in a dynamic range

图 9(a)是两组透镜阵列间距变化对均匀度的影响, 变化范围 0.6 mm, 随着间距增加, X 方向光斑尺寸缩短, 且能量向光斑两侧集中, 因此微柱透镜阵列相对位置变化对光束匀化效果具有较大影响; 图 9(b)是快轴匀化透镜旋转对均匀度的影响, 透镜沿 Z 轴旋转 4° 时开始产生较明显变化, 强度边缘开始明显倾斜, 能量向中心集中, 因此匀化效果对透镜绕光轴旋转容忍度较高。设计中应选择合适数值孔径的微柱透镜阵列, 保证 LD 阵列的子光束 ±6.5° 范围内均能被接收, 提高匀化效率。积分透镜应选用非球面透镜从而降低像差对匀化结果的影响。

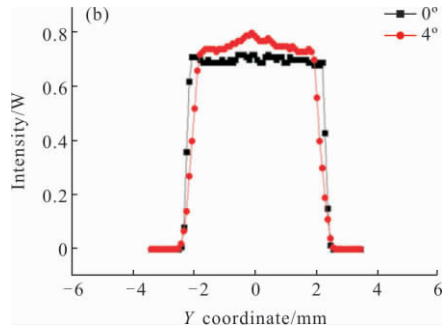
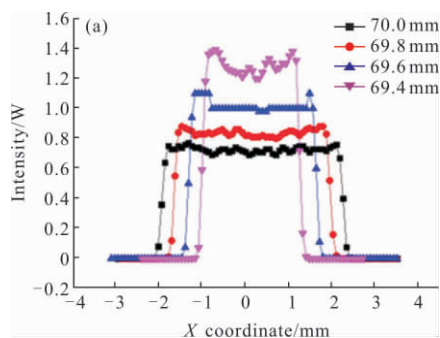


图 9 透镜阵列间距与角度变化对均匀度的影响(a)透镜阵列间距影响均匀度(b)快轴匀化透镜旋转对均匀度影响
Fig.9 Spot tracking image effect of lens array distance and angle variation on uniformity (a) lens array distance affects uniformity (b) fast axis homogenizing lens rotation affects uniformity

3 结论

以照明和激光抽运等应用为需求, 设计了 LD 激光二极管的光束匀化整形系统, 快轴方向用非球面透镜进行匀化, 慢轴方向采用微柱透镜阵列组进行匀化, 通过 ZEMAX 宏指令优化透镜参数, LD 单管和阵列光束在目标面上得到均匀度分别为 93.6% 和 93.8% 的 4 mm×4 mm 矩形光斑。研究了装调误差对系统的影响, 发现匀化焦面对动态范围的容忍度较高。模拟结果表明该匀化系统应用于半导体激光器整形具有可行性。现今, 非球面镜的加工技术已经比较成熟, CNC 抛光非球面透镜和模压非球面透镜^[14]均得到广泛应用, 大大提高了非球面整形系统的实际应用价值。该研究可以促进半导体激光器在激光照明、显示、医疗及泵浦等领域的广泛应用, 为激光二极管光束整形的光学设计提供了一种新的参考途径。

参考文献:

[1] Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weiming, et al. Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31 (11): 1296-1230. (in Chinese)

[2] 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. (in Chinese)

[3] Traub M, Hoffmann H D, Plum H D, et al. Homogenization

- of high power diode laser beams for pumping and direct applications[C]//SPIE, 2006, 6104: 6104Q1-10.
- [4] Meng Dongdong, Zhang Hongbo, Li Mingshan, et al. Laser technology for direct IR countermeasure system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105009. (in Chinese)
- [5] Shi Guangyuan, Yang Xiaoping, Liang Yanmei, et al. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(s1): 439-442. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] Wang Zexiong, Zhu Guangzhi, Huang Yan, et al. Analytical model of microlens array system homogenizer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2015, 75(1): 214-220. (in Chinese)
- [8] Cao Axiu, Shi Lifang, Yu Jinqing, et al. Laser beam homogenization method based on random microlens array[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 124-128. (in Chinese)
- [9] Liu Zhihui, Shi Zhendong, Yang Huan, et al. Homogenization of semiconductor laser using diffractive micro-lens array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2092-2096. (in Chinese)
- [10] Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng, et al. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(2): 1-5. (in Chinese)
- [11] Bart Van Giel, Youn Meurel, Hugo Thienpont. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light emitting diode light sources[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(4): 1-6.
- [12] Li Weisen, Wu Dengxi, Dong Guangyan, et al. Homogenization design in Gaussian laser beam transformation based on Zemax[J]. *Electronic and Electro-optical Systems*, 2009, 1(1): 1-3. (in Chinese)
- [13] Dickey F M, Holswade S C. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2000: 276-279.
- [14] Yin Shaohui, Zhu Kejun, Yu Jianwu, et al. Micro aspheric glass lens molding process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(15): 182-192. (in Chinese)