

# 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

殷智勇<sup>1,2</sup> 汪岳峰<sup>1</sup> 尹韶云<sup>2</sup> 强继平<sup>1</sup> 雷呈强<sup>1</sup> 孙秀辉<sup>2</sup> 杨凯<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003  
<sup>2</sup>重庆绿色智能技术研究院微纳制造与系统集成中心, 重庆 401122)

**摘要** 为了进一步提高半导体激光器整形系统的能量传输效率,提出了基于双曲面基底微透镜阵列的半导体激光器堆栈光束整形系统。双曲面基底微透镜阵列可以同时实现光束的准直与分束双重功能,减少了系统中光学表面的使用量。运用远心光路设计了半导体激光器光束慢轴准直透镜以满足微透镜小视场的要求。通过 ZEMAX 软件进行仿真,验证了双曲面基底微透镜阵列半导体激光器整形系统的可行性,并获得了 30 mm×15 mm 的、不均匀性小于 7% 的光斑,系统能量传输效率达到 96%。

**关键词** 光学设计; 微透镜阵列; 高斯光束; 光斑均匀性; 功率密度

**中图分类号** TN245 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0602016

## Design of Semiconductor Laser Shaping System Based on Hyperbola Substrate Microlens Array

Yin Zhiyong<sup>1,2</sup> Wang Yuefeng<sup>1</sup> Yin Shaoyun<sup>2</sup> Qiang Jiping<sup>1</sup> Lei Chengqiang<sup>1</sup>  
Sun Xiuhui<sup>2</sup> Yang Kai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Optics & Electrics Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China  
<sup>2</sup>Micro-Nano Manufacturing and System Integration Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chongqing 401122, China

**Abstract** To further improve the energy transfer efficiency of the semiconductor laser shaping system, a semiconductor laser shaping system based on hyperbola substrate microlens array is proposed. Semiconductor laser beam collimation and splitting can be simultaneously achieved by this microlens array, as a result the number of optical surface is reduced. Slow axis collimated lens of semiconductor laser is designed with the use of telecentric optical path so as to meet the small field requirement of microlens. With the simulation result in ZEMAX, the feasibility of the semiconductor laser shaping system based on hyperbola substrate microlens array is verified. A 30 mm×15 mm irradiance area is obtained with the unhomogeneity of less than 7%, and the energy transfer efficiency of the system reaches 96%.

**Key words** optical design; beam shaping; microlens array; Gaussian beam; spot homogeneity; power density

**OCIS codes** 220.3620; 140.3300

## 1 引言

提高固体激光器功率的关键技术之一是解决优质抽运源问题,即需要高功率密度、高均匀性抽运光源。但半导体激光器因自身结构导致其光强分布不均匀,所以必须先对半导体激光器光束进行整

形<sup>[1~5]</sup>。相比常用的空心导管和波导管<sup>[6~8]</sup>而言,微透镜阵列(MLA)具有体积小、质量轻和传输损耗小等特点,其构成的整形系统结构简单、使用灵活,得到了广泛的应用<sup>[9~11]</sup>。但对于高功率半导体激光器堆栈而言,整形系统的能量传输效率将严重影

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-03-28

作者简介: 殷智勇(1984—),男,博士研究生,主要从事固体激光器和激光光束整形技术方面的研究。

E-mail: zzy8465@163.com

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

响抽运光斑的能量密度。通常的方法是在透镜表面镀增透膜以提高透镜表面的透射率。若要继续提高系统的能量传输效率,需要对整形系统结构做进一步优化。

双曲面基底微透镜阵列将准直透镜或积分透镜与微透镜阵列合二为一,通过整合来减少光学表面的使用数量,从而提高整形系统的能量传输效率,同时可进一步压缩整形系统的体积。本文在双曲面微透镜阵列的设计过程中对系统的实用性、冗余度进行了分析与优化。这对运用微透镜阵列整形高功率半导体激光器堆栈光束实现高均匀性和高功率密度抽运光斑的研究和设计具有指导意义。

## 2 系统结构

基于双曲面基底微透镜阵列的光束整形系统由两个双曲面基底微透镜阵列构成,其光束整形原理与成像型多孔径光束积分器<sup>[12]</sup>类似。多个半导体激光器发光单元沿慢轴方向排列成一个 bar 条,同

时多个 bar 条在快轴方向上的叠加组成堆栈。在整形系统中,半导体激光器堆栈光束被微透镜阵列分为大量的细光束,每一个细光束的均匀性大于半导体激光器堆栈光束的均匀性,而且每个细光束范围内的微小不均匀性由处于对称位置的细光束相互叠加得补偿,从而使整个照明区域得到均匀化的光强分布。如图 1 所示,以单个半导体激光器为例,光束经快轴准直透镜后进入 MLA1,形成大量细光束并分别聚焦在 MLA2 表面上,最终叠加在目标平面处。其中,MLA1 中双曲面是用来准直半导体激光器慢轴方向光束的,焦距为  $F_C$ ,与快轴准直透镜一起将光束准直为平行光。MLA2 中双曲面是用来会聚光束的,焦距为  $F_1$ ,将大量的细光束准确叠加在目标平面处。MLA1 与 MLA2 中的微透镜阵列保持相对放置,其间隔为  $d$ ,两列微透镜口径都为  $p$ ,焦距分别为  $f_1, f_2$ 。两个双曲面基底微透镜阵列厚度为别为  $h_1, h_2$ 。

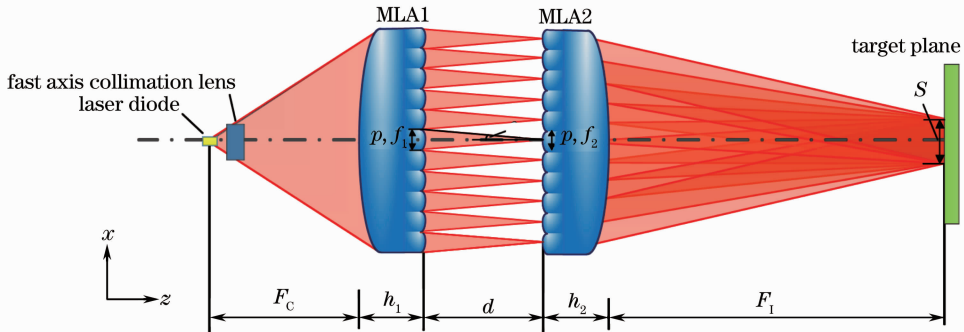


图 1 基于双曲面基底微透镜阵列的光束整形系统

Fig. 1 Beam shaping system based on hyperbola substrate microlens array

计算准直后光束经微透镜阵列到目标平面处形成的光斑  $S$  的尺寸,可表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ F_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/F_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h_2/n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/f_2 \\ d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/f_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ p \end{bmatrix} \\ S = \left[ \frac{F_1 d}{f_1 f_2} - \frac{F_1}{f_1} - \frac{F_1}{f_2} \right] p \end{cases} \quad (1)$$

当  $d = f_1 = f_2 = f$  时,目标平面处的光斑相当于微透镜口径被放大  $F_1/f$  倍。同时,光斑的形状与微透镜口径一致,基于双曲面基底微透镜阵列光束的整形系统可实现多种复杂的中心对称光斑。

## 3 系统设计

### 3.1 双曲面微透镜阵列设计

半导体激光器光束具有像散大且快慢轴发散角不同的特点,对光束的准直提出了很高的要求。目

前,快轴方向准直微柱透镜已经在半导体激光器中大量使用,半导体激光器光束准直后剩余发散角度为  $0.5^\circ$ 。对于光束慢轴方向,当半导体激光器发光单元的填充因子小于 0.3 时,可在快轴准直透镜后面再叠加慢轴方向微柱透镜进行光束准直。但对于大功率半导体激光器堆栈而言,发光单元的宽度将进一步增大以增大输出功率,其填充因子达到 0.5。这就意味着入射光束经快轴准直后慢轴方向上已经叠加在一起,因此需用柱透镜代替微柱透镜对半导体

激光器堆栈慢轴方向的光束进行整体准直。如图 2 所示,半导体激光器堆栈中每一个 bar 条长度为  $a$ , bar 条中心处与边缘处发光单元最大发散角度光线的高度差为  $l$ ,大小等于  $a/2$ ,而两条光线入射到曲面准直透镜表面的实际高度分别为  $b$ 、 $c$ ,二者的差值为  $c-b$ 。半导体激光器慢轴方向的远场发散角为  $\alpha$ ,通常约为  $10^\circ$ ,其半角的正切值为 0.0875,接近于 0,因此高度差  $c-b$  可近似等于  $a/2$ 。当 MLA1 的焦距远大于厚度时,可忽略两主平面的间隔对剩余发散角  $\theta_{\text{slow}}$  的影响。基于以上两个方面的近似,光束经慢轴准直后剩余发散角  $\theta_{\text{slow}}$  就可依据 (2) 式

$$\theta_{\text{slow}} \approx \arctan\left(\frac{a}{2F_C}\right). \quad (2)$$

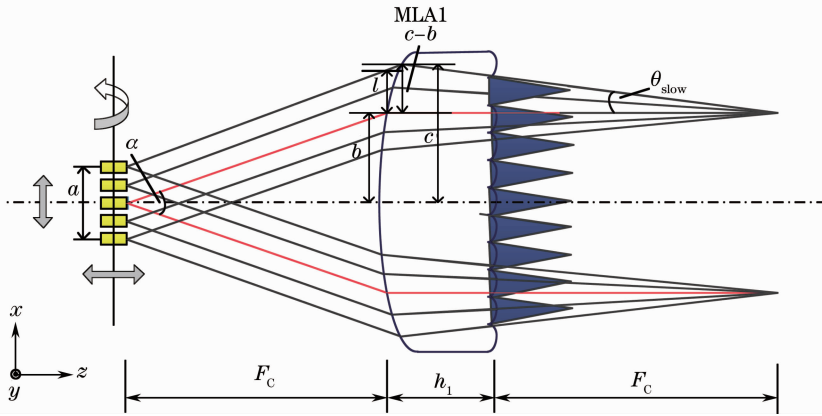


图 2 基于慢轴准直柱透镜的微透镜阵列

Fig. 2 Microlens array based on slow axis collimation cylindrical lens

在实际使用中,半导体激光器的封装误差会对准直效果造成影响。封装误差总体上可分为两类,一类是位置误差,另一类是转动误差,如图 2 中箭头所示。位置误差包括 bar 条沿  $x$  轴方向与沿  $z$  轴方向的移动,而沿  $y$  轴方向的移动对慢轴准直没有影响。以  $F_C=137\text{ mm}$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $a=10\text{ mm}$  为例,理想条件下  $\theta_{\text{slow}}=2.09^\circ$ ,随着 bar 条沿  $x$  轴与  $z$  轴的偏移量增加,剩余发散角  $\theta_{\text{slow}}$  随着偏移量的绝对值线性增大,如图 3(a)、(b)所示。转动误差同样包括三

个轴向的角度偏差,其中沿  $x$  轴方向的转动同样对慢轴准直没有影响。沿  $z$  的转动误差可以看成是  $x$  轴与  $y$  轴方向的位置误差同时存在而已。bar 条沿  $y$  轴的转动量对剩余发散角的影响如图 3(c)所示。即使 bar 转动  $20^\circ$ ,剩余发散角度也仅仅增加  $0.2^\circ$ ,但 MLA1 的孔径需要从  $32\text{ mm}$  增大到  $130\text{ mm}$ ,这就意味着需要加工更大尺寸的微透镜阵列,增大了元件的加工难度。因此在后续设计中除了增大微透镜的孔径角来提高对位置误差的冗余度之外,还是

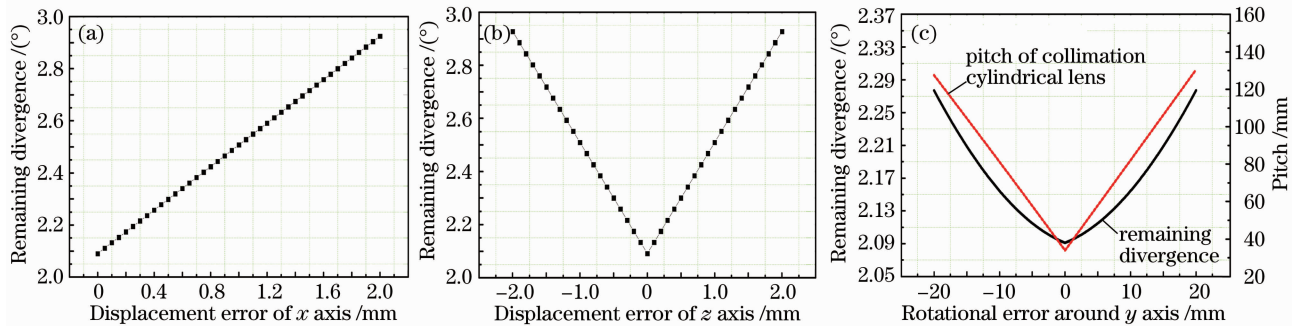


图 3 封装误差与剩余发散角的关系。(a)  $x$  轴位置误差;(b)  $z$  轴位置误差;(c)  $y$  轴转动误差

Fig. 3 Relation between packaging errors and remaining divergence. (a)  $x$ -axis displacement errors; (b)  $z$ -axis displacement errors; (c)  $y$ -axis rotational errors

要尽量避免使用 bar 条沿  $y$  轴转动的半导体激光器堆栈。

微透镜的孔径角需大于光束准直后的剩余发散角,以保证所有细光束在各自的通道中完成传输<sup>[13]</sup>。如图 4 所示,当微透镜孔径角为  $3^\circ$  的准直光束的剩余角度小于等于  $3^\circ$  时,目标平面处光强分布成平顶型,具有锐利的边缘,且光强度与均匀性都无差异。而当剩余角度大于微透镜孔径角时,原光斑区域光强分布依旧呈平顶型,但强度降低,在其两侧形成旁瓣。剩余角度越大,旁瓣占有的能量就越多,同时旁瓣数量也会增加。因此光束剩余角度小于微透镜的孔径角是保证系统整形效果的关键。

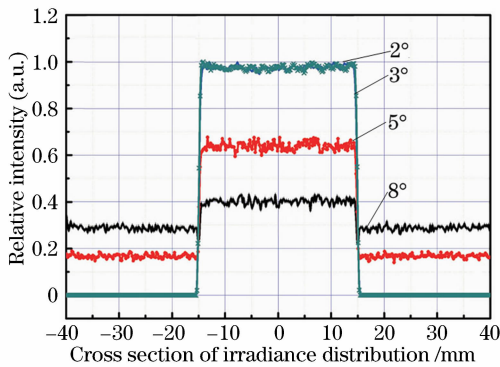


图 4 不同剩余角度的准直光束对目标平面处光场分布的影响

Fig. 4 Effects of different remaining angles of collimated beams on the optical field distribution

MLA2 中双曲面实现积分透镜的功能,其焦距  $F_1$  由(1)式给出,当  $d = f_1 = f_2 = f$  时,由光斑尺寸  $S$ 、微透镜的孔径  $p$  和焦距  $f_2$  共同决定。其面形同样以双曲面代替球面,矫正像差主要是畸变对光斑的影响。而第二列微透镜阵列对大量细光束起到场镜的作用,在一定发散角度内光束主光线经微透镜阵列后出射为平行光束,经双曲面后聚焦在目标平面的中心处,保证了大量细光束形成的光斑中心重合。

### 3.2 间距的选择

两个基于双曲面基底的微透镜阵列的间距直接影响目标平面处光斑的边缘锐利程度与均匀性。如图 5 所示,同样以微透镜孔径角度  $3^\circ$  为例,当间距等于微透镜焦距( $f = 3.816 \text{ mm}$ )时,经微透镜阵列出射的所有细光束的主光线都为平行光束,这就意味着所有细光束形成的光斑中心完全重合,其目标平面处远场分布成平顶型分布。当间距不等于  $f$  时,细光束的主光线中心不再重合,光场分布的边缘锐利程度下降,每束细光束形成的光斑尺寸随着微透

镜间距的增加而减小,不但影响光斑形状还大大降低了光斑的均匀性。

$$f_2 = \frac{p}{\tan \theta + \tan \theta_{MLA1}}, \quad (3)$$

$$S' = \frac{f_2 - f_1}{f_1} p. \quad (4)$$

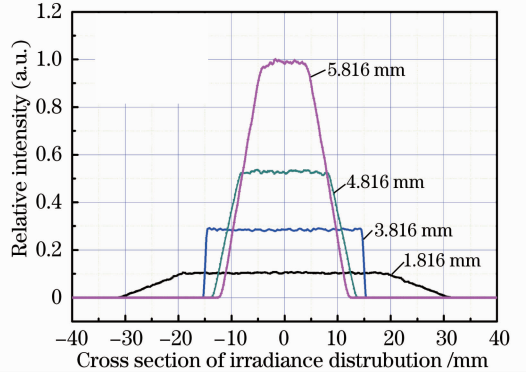


图 5 不同间距对目标平面处光场分布的影响  
Fig. 5 Effects of different space on the optical field distribution

虽然当两个双曲面基底微透镜阵列的间距为微透镜的焦距时,整形效果最理想。但在实际应用中,焦点在第二列微透镜表面时,不但会损坏增透膜甚至会毁伤微透镜。为使焦点在第二列微透镜阵列之外,适当增加间距,并同时改变第二列微透镜焦距。以经第一列微透镜的光束依然穿过同样  $x, y$  坐标的第二列微透镜为前提,增加第二列微透镜的焦距  $f_2$  并设为两列微透镜阵列间距。如图 6 所示,依据  $\triangle COD$  与  $\triangle C'OD'$  相似关系,可确定当  $f_2$  满足(3)式时,可保证发散角度小于孔径角  $\theta_{MLA1}$  细光束主光线经第二列微透镜后的主光线依然是平行光束。入射在第二列微透镜上的光斑面积  $S'$  如(4)式所示,能量密度降低  $1/S^2$ ,在保证光斑的锐利边缘及高度均匀性的同时避免会聚光斑造成微透镜的

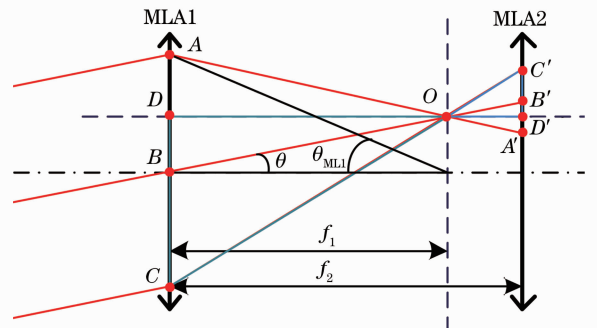


图 6 微透镜阵列焦距变化时的几何光路  
Fig. 6 Optical path when the focal length of micro-lens array is variable



毁坏。

## 4 系统仿真

系统设计目标是实现光斑尺寸  $30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ，光斑不均匀性小于  $7\%$ ，系统能量传输效率大于  $90\%$ ，光斑边缘范围小于  $5\%$ 。选用德国 DILAS 公司的 E15Y-808.3-xxx 型垂直封装半导体激光器堆栈作为光源，具体参数如表 1 中所示。依据上文中所述，准直透镜的焦距与半导体激光器 bar 条的长度是准直设计的关键。因此首先确定 MLA1 的焦距  $F_c = 137\text{ mm}$ ，圆锥常数为  $-2$ ，bar 条的长度为  $10\text{ mm}$ ，依据(2)式可知，慢轴准直后剩余发散角小于  $2.1^\circ$ 。为保证光斑的长径比  $2:1$ ，同时微透镜的数值孔径大于剩余发散角对应的数值孔径，MLA1、MLA2 中每一微透镜的孔径为  $400\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ 。MLA1 中微透镜的焦距  $f_1 = 3.816\text{ mm}$ ，而依据(3)式，MLA2 中微透镜的焦距选取  $f_2 = 4.404\text{ mm}$ 。MLA2 的焦距可从(1)式中得到， $F_1 = 330\text{ mm}$ ，双曲面面型优化后圆锥常数为  $-2.112$ 。

表 1 半导体激光器堆栈参数

Table 1 Parameters of laser diode stack

Parameters	Value
Fast-axis divergence (lensed) / ( $^\circ$ )	0.5
Slow axis divergence (FWHM) / ( $^\circ$ )	10
Wavelength / nm	808
Bar length / mm	10
Number of emitters	49
Emitter spacing / $\mu\text{m}$	200
Emitter size / $\mu\text{m}$	100

根据 ZEMAX 软件中  $5.0 \times 10^7$  条光线追迹下结构可知，光斑均匀性达到  $95.47\%$ 。如图 7 所示，目标平面处光斑尺寸为  $14.9\text{ mm} \times 29.9\text{ mm}$  (包含的能量占总能量的  $95\%$  以上)。光斑在  $y$  轴边缘范围为  $0.5\text{ mm}$ ，慢轴方向边缘范围为  $0.7\text{ mm}$ ，分别占光斑不同方向尺寸的  $3.33\%$  与  $2.33\%$ 。在透镜表面镀  $808\text{ nm}$  增透膜的前提下 (透射率达到  $99\%$ )，系统的最终能量传输效率达到  $96.01\%$ 。

由于半导体激光器堆栈光束经准直后快慢轴方向上的剩余角度不同。而在相同方向上又因为入射到第二列微透镜阵列时每块微透镜接受的细光束的发散角度不同，最终导致  $x$  方向实际边缘范围要大于  $y$  方向。而且在光束传输过程中，各光学表面都会对光束产生一定程度的反射，即使镀增透膜反射也不能够被完全消除，依然会对系统的能量传输效率产生影响。理论上 4 个光学表面造成的能量损失约占总能量的  $3.94\%$ ，与仿真结果相一致。

双曲面基底的微透镜阵列可以有效降低光能损耗，使得系统的紧凑性获得提升，但其独特的外形也会给加工制作带来挑战。尤其是当器件的质量较大时，传统光刻蚀工艺的涂胶环节可能会遇到无法吸附或转速难以提升等问题。比较合适的制作手段是采用精密热压方法，这一方法通过加热使得玻璃或石英从固态变为液态，结合精密模具，可以实现此类器件的一次成型。

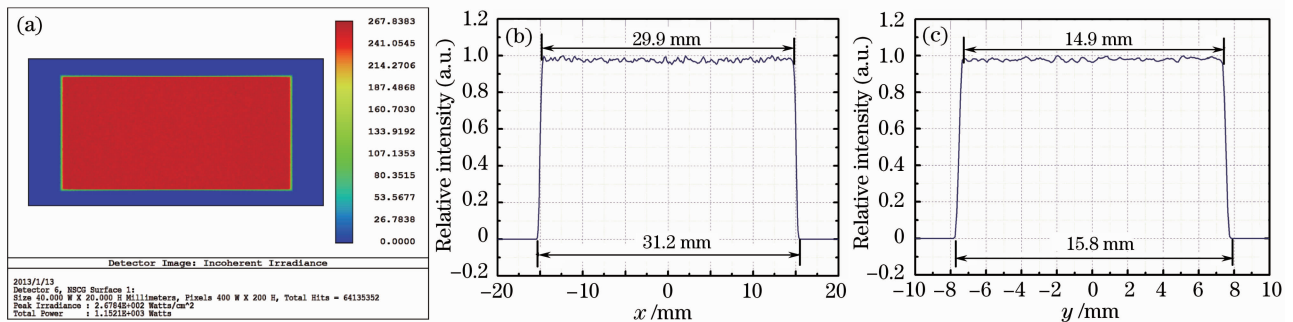


图 7 光斑均匀性分析。(a) 二维光斑图样；(b) 慢轴方向光场分布；(c) 快轴方向光场分布

Fig. 7 Spot homogeneity analysis. (a) Two dimensional spot pattern; (b) optical field distribution in slow axis direction; (c) optical field distribution in fast axis direction

## 5 结论

提出了基于双曲面基底微透镜阵列的半导体激光器整形系统。依据菲涅耳公式，计算了基于平面基底微透镜阵列的光束整形系统中由于分界面光束

反射造成的能量损失量，进而确定基于双曲面基底微透镜阵列的光束整形系统的合理性。以提高光斑均匀性及减小光斑尺寸为目标，总结了基于双曲面微透镜阵列的光束整形系统设计及结构优化方法。

通过 ZEMAX 软件仿真实现了均匀性为 95.47% 的光斑图样。基于双曲面基底微透镜阵列的光束整形系统相比原有系统具有结构简单、能量传输效率高的特点,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,具有很强的实用性。

### 参 考 文 献

- 1 S. Haiyin. Laser Diode Beam Basics, Manipulations and Characterizations[M]. New York: Springer, 2012
- 2 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
- 3 F. Bachmann, P. Loosen, R. Poprawe. High Power Diode Lasers: Technology and Applications[M]. New York: Springer, 2007
- 4 R. Diehl. High-Power Diode Lasers Fundamentals, Technology, Applications[M]. Heidelberg: Springer, 2000
- 5 A. Lapucci, M. Ciofini. Efficiency optimization for a diode-pumped Nd:YAG ceramic slab laser[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(20): 4388~4393
- 6 B. Köhler, A. Noeske, T. Kindervater *et al.*. 11 kW direct diode laser system with homogenized  $55 \times 20 \text{ mm}^2$  Top-Hat intensity distribution[C]. *SPIE*, 2007, **6546**:645600

- 7 M. Traub, H. D. Hoffmann, H. D. Plan *et al.*. Homogenization of high power diode laser beams for pumping and direct applications[C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 61040Q
- 8 J. R. Lee, H. J. Baker, G. J. Friel *et al.*. Hig-average-power Nd:YAG planar waveguide laser that is face pumped by 10 laser diode bars[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(7): 524~526
- 9 P. Schreiber, P. Dannberg, B. Hofer *et al.*. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion[C]. *SPIE*, 2005, **5876**: 58760k
- 10 F. Wippermann, U. D. Zeitner, P. Dannberg *et al.*. Beam homogenizers based on chirped microlens arrays [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6218~6231
- 11 C. Kopp, L. Ravel, P. Meyrueis. Efficient beamshaper homogenizer design combining diffractive optical elements, microlens array and random phase plate[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 1999, **1**(3): 398~403
- 12 F. M. Dickey, S. C. Holeswade, D. L. Shealy. Laser Beam Shaping Applications[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2006
- 13 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

栏目编辑: 张 腾