

# 基于非成像光学的激光束整形系统的优化设计

刘丽红<sup>1,2</sup> 刘华<sup>1</sup> 孙强<sup>1</sup> 刘英<sup>1</sup> 荆雷<sup>1</sup> 辛迪<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对衍射型微透镜阵列的激光匀束系统提出一种新的优化设计方法。利用非成像光学中的等能量映射方法,建立了基于 Macro 宏语言的自定义优化函数。系统采用微透镜阵列和聚光球面镜作为匀光元件,在 Zemax 软件的序列模式中对微透镜阵列单元的非球面面型进行自动优化,实现了照度均匀性大于 90%、能量利用率为 83% 的 6 mm×6 mm 方形光斑的优化设计。采用 TracePro 光学软件对设计结果进行了仿真验证。此方法无需传统方法复杂的数学计算和器件参数的反复调整,是一种十分有效的微透镜阵列激光匀束系统的设计方法。

**关键词** 光学设计; 光束整形; 非成像光学; 微透镜阵列; Zemax 软件; 非球面透镜

中图分类号 TN243

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.102201

## Optimization Design Method for Laser Beam Shaping System Based on Optics Non-Imaging

Liu Lihong<sup>1,2</sup> Liu Hua<sup>1</sup> Sun Qiang<sup>1</sup> Liu Ying<sup>1</sup> Jing Lei<sup>1</sup> Xin Di<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A new design method of diffractive microlens array for laser beam uniformity adopting optimization procedure in Zemax is proposed. The custom optimization function in Macro language is created by means of energy mapping in non-imaging optics. A microlens array and a condensing spherical lens are used as the homogenization optical components in the system. The aspheric surface of the lens unit of the microlens array is automatically optimized in sequential mode of Zemax software, and a 6 mm×6 mm square spot with the irradiance uniformity greater than 90% and the energy efficiency of 83% on the target surface is realized. The design results are verified by TracePro simulation program. This method is valid and convenient in the system design of the microlens array for laser beam uniformity, without the need for the complex calculation and the repeating adjustment of the system parameters in the traditional method.

**Key words** optical design; beam shaping; non-imaging optics; microlens array; Zemax software; aspheric lens

**OCIS codes** 220.4298; 220.3620; 140.3300

## 1 引言

目前常用的激光整形器件有二元光学元件、液晶空间光调制器、积分镜、随机相位板、变折射率透镜、双折射透镜组和微透镜阵列等<sup>[1-6]</sup>。微透镜阵列具有辐照均匀、材料易获取、制造工艺简单、光学损耗低以及易于集成等优势。用于激光光束整形的微透镜阵列可分为成像型和衍射型两类<sup>[7-10]</sup>,成像型由两组透镜阵列和一个主透镜构成,衍射型由一组透镜阵列和一个聚焦透镜构成。成像型微透镜阵列与衍射型相比,结构复杂,装配困难,且应用大多局限在微型投影领域。

收稿日期: 2013-06-04; 收到修改稿日期: 2013-06-12; 网络出版日期: 2013-08-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程(Y10132N110)、吉林省科技发展计划项目(20130206018GX)

作者简介: 刘丽红(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光照明方面的研究。E-mail: sdhz160@163.com

导师简介: 孙强(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。

E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

目前,微透镜阵列面型的获得均是采用计算的方法,包括物理光学和几何光学两种计算方法。物理光学方法<sup>[11]</sup>基于标量衍射理论、矩阵光学等,计算出射光束的振幅分布和相位分布,需要反复调整器件参数并用软件模拟,比较繁复。几何光学方法<sup>[12]</sup>根据折射定律、积分约束条件等建立微分方程,但通过数值求解微分方程很难获得精确的面型结构。

本文针对衍射型微透镜阵列匀光系统,在 Zemax 的序列模式下,采用非成像光学的优化设计方法建立自定义的 Macro 宏语言优化函数,然后利用软件的光线追迹,自动优化微透镜阵列的面型结构,实现均匀高效的照明。相比于物理光学和几何光学的计算方法,它不需要复杂的数学运算和器件参数的反复调整。阵列单元采用凹面型结构,并引入非球面以精确地控制光束分布,提高光能传输效率。

## 2 系统设计

### 2.1 设计指标

激光表面加工技术包括激光切割、激光焊接、激光熔覆、钎焊、表面硬化<sup>[13-14]</sup>等,对光斑的形状和光强分布有特定的要求。表面硬化技术需要大小为  $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\sim 10\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  的矩形光斑,并且光强分布的均匀性对材料硬化的效果有直接影响<sup>[15-16]</sup>。针对上述要求,本文设计了  $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$  的平顶方形光斑,照度均匀性指标为  $90\%$ ,能量利用率指标为  $83\%$ 。

### 2.2 系统设计参量

为达到上述设计指标,采用的光学系统的设计参量如表 1 所示。

表 1 光学系统的设计参量

Table 1 Design parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength /nm	486.1
Diameter of entrance pupil /mm	30
Apodization type of entrance pupil	Gaussian
Apodization factor of entrance pupil	1

### 2.3 透镜阵列光束匀化原理

微透镜阵列通过对入射波的分割与出射子波的重新叠加实现光束的匀化作用。如图 1 所示假设透镜阵列的前表面为平面,后表面为非球面,并采用准直的高斯光束入射。当透镜单元的数目足够大时,入射光波可以简化为一系列均匀平面波垂直入射到子透镜的前表面,后表面具有发散的面型结构,经过偏折,转化为负焦距的出射子波。阵列由  $N\times N$  个相同的透镜单元构成,并将入射波分割为  $N^2$  个子波,经由聚焦透镜叠加在目标面上,进而对光源能量进行重新分配,实现均匀化。

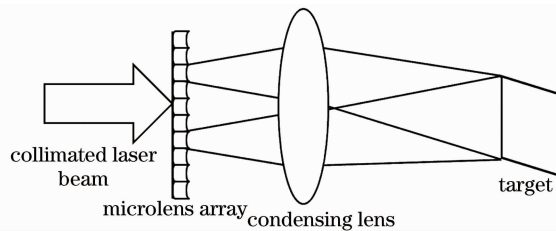


图 1 透镜阵列光束整形示意图

Fig. 1 Diagram of microlens array laser beam shaping

### 2.4 透镜单元的等能量映射关系

透镜阵列匀光系统的设计重点是满足要求的透镜单元,透镜单元的形状和大小决定了目标面上光斑的形状和大小。本文采用方形的子透镜,不仅加工简易而且降低了子透镜边缘的光能损失<sup>[11]</sup>。

非成像光学的设计思想是首先对光源进行等能量网格的划分,然后根据能量映射的方法建立入射面和目标面上光线坐标的一一对应。如图 2 所示,将透镜单元的前表面作为入射面,入射面上的光强分布恒为  $I_0$ ,目标面上均匀照度值为  $E_0$ 。方形子透镜的口径为  $d_{\max}$ ,目标面上方形光斑的宽度为  $T_{\max}$ 。依据能量守恒原

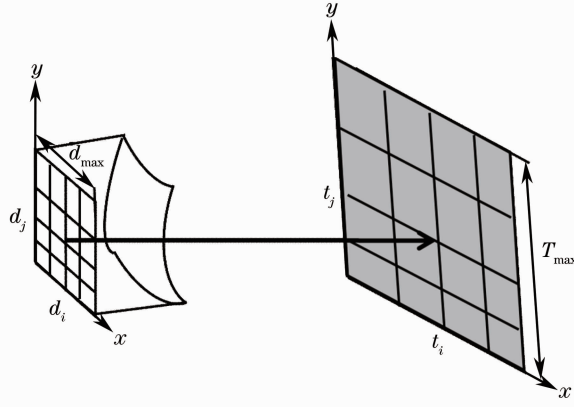


图2 入射面和目标面之间的能量映射关系

Fig. 2 Energy mapping between incident and target surfaces

理,有

$$I_0 d_{\max}^2 = E_0 T_{\max}^2. \quad (1)$$

为了设计方便,将入射面分成  $M \times M$  份,共  $M^2$  个网格,且每个网格的能量相等,第  $i$  行、第  $j$  列对应的光线坐标为  $(d_i, d_j)$ :

$$d_i = \frac{i}{M} d_{\max}, \quad (2)$$

$$d_j = \frac{j}{M} d_{\max}, \quad (3)$$

式中  $i=1,2,3,\dots,M; j=1,2,3,\dots,M$ 。

依等能量映射原理,建立入射面和目标面之间光线坐标的对应关系:

$$I_0 d_i d_{\max} = E_0 t_i T_{\max}, \quad (4)$$

$$I_0 d_j d_{\max} = E_0 t_j T_{\max}. \quad (5)$$

依据(1)~(5)式,每个能量网格对应的入射光线映射到目标面上的坐标为  $(t_i, t_j)$ :

$$t_i = \left( \frac{I_0 d_{\max}^2}{E_0 T_{\max}} \right) \frac{i}{M}, \quad (6)$$

$$t_j = \left( \frac{I_0 d_{\max}^2}{E_0 T_{\max}} \right) \frac{j}{M}. \quad (7)$$

依据对称性,只考虑  $1/4$  部分的入射面与目标面上光线坐标的对应关系,且将入射面的中心与坐标原点重合。令  $k_1 = \frac{d_{\max}}{2}$ ,  $k_2 = \frac{I_0 d_{\max}^2}{2E_0 T_{\max}}$ , 入射光线在子透镜前表面的坐标为  $\left( k_1 \frac{i}{M}, k_1 \frac{j}{M} \right)$ , 映射到目标面上的坐标为  $\left( k_2 \frac{i}{M}, k_2 \frac{j}{M} \right)$ 。

## 2.5 透镜单元的优化设计

基于上述已建立的光线对应关系,使用 Zemax 内置的优化操作函数,对每个网格内的光线设置目标值,优化就会变得非常繁冗,同时降低了优化速度。针对数目繁多的光线,利用 Zemax 内置的 Macro 宏语言,自定义优化函数,建立入射面与目标面上光线坐标的一一对应关系。

建立宏语言优化函数,需要定义视场坐标和光瞳坐标,从而规定光线追迹路径。由于是以平行光入射到子透镜的前表面,视场坐标  $(H_x, H_y)$  为  $(0,0)$ , 归一化的光瞳坐标  $(P_x, P_y)$  为  $(i/M, j/M)$ 。经过光线追迹,得到目标面上光线坐标的实际值。将实际值与已经建立的目标面上光线坐标的理想值进行比较,利用最小二乘法构建优化评价标准。

由于光学系统具有轴对称性,采用偶次非球面拟合,拟合阶次为 16 阶,拟合后的面型已经很精确。偶次非球面方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_2\gamma^2 + \alpha_4\gamma^4 + \alpha_6\gamma^6 + \alpha_8\gamma^8 + \alpha_{10}\gamma^{10} + \alpha_{12}\gamma^{12} + \alpha_{14}\gamma^{14} + \alpha_{16}\gamma^{16}, \quad (8)$$

式中  $z$  为面型矢高,  $c$  为非球面顶点的曲率,  $k$  为二次曲线系数,  $r$  为径向坐标,  $\alpha_i$  为偶次多项式的各项系数。优化后子透镜的面型系数如表 2 所示。透镜阵列的设计参量如表 3 所示。

表 2 子透镜的面型系数

Table 2 Morphological coefficients of the microlens surface

Parameter	Surface 1	Surface 2
$c$	0	4.2
$k$	0	-2.8
$\alpha_2$	0	$2 \times 10^{-2}$
$\alpha_4$	0	$-8.563 \times 10^{-3}$
$\alpha_6$	0	$2.862 \times 10^{-3}$
$\alpha_8$	0	$-5.403 \times 10^{-4}$
$\alpha_{10}$	0	$8.041 \times 10^{-5}$
$\alpha_{12}$	0	$-1.445 \times 10^{-5}$
$\alpha_{14}$	0	$1.808 \times 10^{-6}$
$\alpha_{16}$	0	$-8.655 \times 10^{-8}$

表 3 透镜阵列的设计参量

Table 3 Design parameters of the microlens array

Parameter	Value
Diameter of microlens /mm	1.653
Diameter of lens array /mm	40
Material of microlens array	K7
Thickness of lens array /mm	3

### 3 仿真模拟验证

利用 TracePro 软件对上述设计结果进行仿真模拟,采用束腰半径为 0.9 mm 的准直高斯光束入射。图 3 为光源在入射面上的照度分布图,图中纵坐标采用相对照度  $E'(x,y)$  来表示:

$$E'(x,y) = \frac{E(x,y)}{\bar{E}}. \quad (9)$$

式中  $E(x,y)$  为入射面上取样点  $(x,y)$  的照度,  $\bar{E}$  为所有取样点的照度平均值。

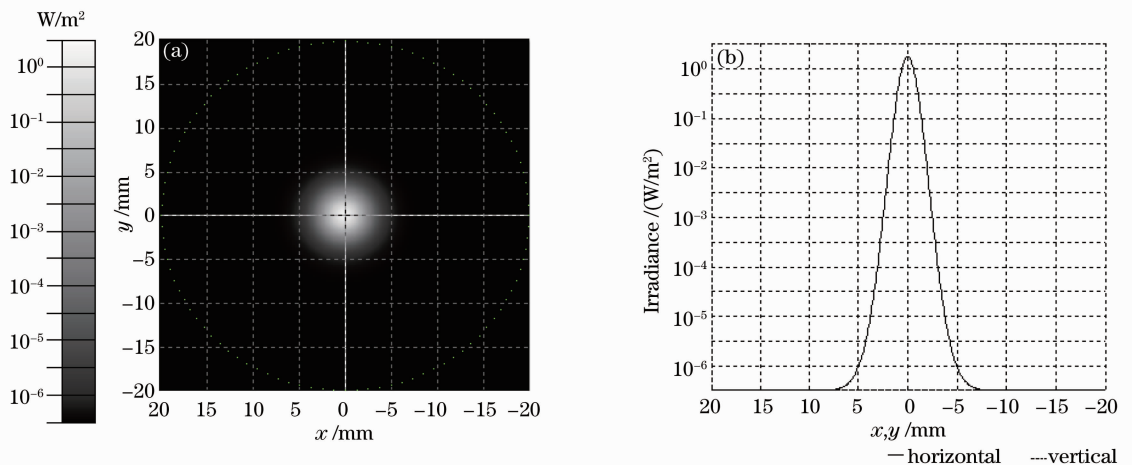


图 3 光源在入射面上的照度分布图。(a)二维照度分布图;(b)照度分布曲线图

Fig. 3 Irradiance distribution of the source on the incident surface. (a) Two-dimensional irradiance distribution; (b) curve of the irradiance distribution

透镜阵列前表面与目标面的距离为 239 mm,在聚焦透镜的后焦面上得到目标光斑,聚焦球面镜的设计参量如表 4 所示。

表 4 聚焦球面镜的设计参量

Table 4 Design parameters of the condensing spherical lens

Parameter	Value
Radius of surface 1 /mm	141,182
Radius of surface 2 /mm	-124,584
Conic of surface 1	0
Conic of surface 2	0
Material	K7
Diameter /mm	40
Focal length /mm	131
Thickness /mm	21

光斑的能量分布如图 4 所示。以预定照明区域的照度最小值与最大值的比值来定义光斑的均匀性,以目标面上接收到的能量与透镜阵列前表面接收到的能量的比值定义微透镜阵列的光能传输率。经过对图 4(b)数据的计算,目标面上  $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$  的方形光斑在水平方向的照度均匀性为 90%,在竖直方向的照度均匀性为 91%,能量利用率为 83%,实现了高斯光束转化为平顶矩形光束的目标。上述结果与用于均匀照明的单片微透镜阵列面形设计<sup>[8]</sup>相比,达到较高的照度均匀性,同时验证了基于非成像光学的等能量映射原理对透镜阵列进行优化设计的有效性。

如果采用 Zemax 中的 REAY、REAX 优化操作数,通过控制光线在目标面上的坐标值,达到上面类似的设计指标,需要在入射面上采集 900 个点,通过控制这 900 个点在目标面上的  $x$  和  $y$  坐标来实现。

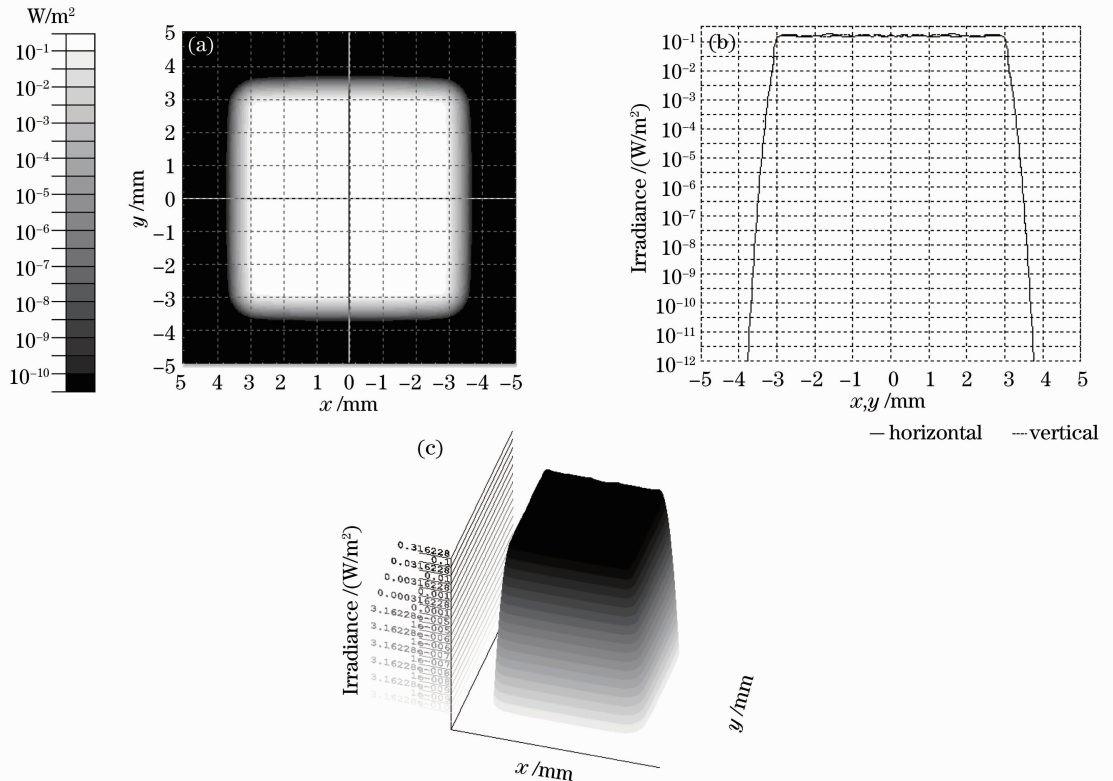


图 4 目标面上的照度分布图。(a)二维照度分布图;(b)照度分布曲线图;(c)三维照度分布图

Fig. 4 Irradiance distribution on the target surface. (a) Two-dimensional irradiance distribution; (b) curve of the irradiance distribution; (c) three-dimensional irradiance distribution

## 4 结 论

采用非成像光学的思想,完成了衍射型微透镜阵列激光匀束系统的优化设计。基于光源和目标面的等能量映射原理,建立自定义的优化函数,通过控制目标面上的光线坐标,对透镜单元的面型结构进行优化,以得到平顶矩形的输出光束。采用准直高斯光束入射,微透镜阵列和聚焦透镜作为匀光元件,在聚焦透镜的后焦面上得到目标光斑。利用 TracePro 仿真模拟,光斑均匀性达到 90%,能量利用率为 83%,验证了上述优化式整形设计方法的正确性,从而为光束整形领域提供了一种全新、有效的设计思想。

## 参 考 文 献

- 1 Gong Huaping, Lü Zhiwei, Lin Dianyong. Present status of laser spatial shaping [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(9): 2-5.  
龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(9): 2-5.
- 2 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.  
柴 路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 3 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(9): 1107-1111.  
陈怀新, 隋 展, 陈祯培, 等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, 21(9): 1107-1111.
- 4 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao, *et al.*. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514001.  
于晓晨, 胡家升, 王连宝, 等. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514001.
- 5 Shen Su, Pu Donglin, Hu Jin, *et al.*. Fabrication of microlens arrays based on spatial light modulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0316003.  
申 溯, 浦东林, 胡 进, 等. 一种基于空间光调制器的微透镜阵列制备技术[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0316003.
- 6 Shang Jianli, Zhu Xiao, Chen Peng, *et al.*. Refractive optical reshaper that converts a laser Gaussian beam to a flat-top beam [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2543-2549.  
尚建力, 朱 晓, 陈 鹏, 等. 一种折射式激光高斯光束平顶整形器 [J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2543-2549.
- 7 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Jia Wenwu, *et al.*. Fourier analysis of light beam uniformity based on the microlens array [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2): 119-123.  
殷智勇, 汪岳峰, 贾文武, 等. 基于微透镜阵列光束均匀化的傅里叶分析[J]. *激光与红外*, 2012, 42(2): 119-123.
- 8 Li Dan, Xue Yunyun, Cao Wen, *et al.*. Optimization of DMD illumination system with microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122002.  
李 丹, 薛芸芸, 曹 雯, 等. 基于微透镜阵列的 DMD 芯片投影系统照明优化[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122002.
- 9 Huang Feng, Jia Wenwu, Wang Yuefeng, *et al.*. Theory and design of laser beam homogenizer based on multi-aperture beam integrator [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 40(1): 44-47.  
黄 峰, 贾文武, 汪岳峰, 等. 多孔径光束积分激光匀束器理论与设计[J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 44-47.
- 10 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.
- 11 Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun, *et al.*. Improved lens arrays optical system with controllable focus width for uniform irradiation [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(3): 331-336.  
郑建洲, 于清旭, 卢永军, 等. 焦距可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. *中国激光*, 2007, 34(3): 331-336.
- 12 Zhao Run, Sun Lei, Wang Wenjun, *et al.*. Design of monolithic microlens array for homogeneous illumination [J]. *Materials and Devices*, 2011, 36(12): 915-919.  
赵 润, 孙 雷, 王文军, 等. 用于均匀照明的单片微透镜阵列面形设计[J]. *材料与器件*, 2011, 36(12): 915-919.
- 13 Liu Youqiang, Cao Yinhua, Pan Fei, *et al.*. Beam transformation of diode lasers used in laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 455-460.  
刘友强, 曹银花, 潘 飞, 等. 激光加工用半导体激光器的光束变换[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 455-460.
- 14 Hu Changkui, Chen Peifeng, Huang Tao. Switching focusing and integrating of light beam in high power laser process [J].

Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(2): 53–56.

胡昌奎, 陈培锋, 黄涛. 高功率激光加工中光束的转换、聚焦和整合[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(2): 53–56.

15 Yu Gang, Wang Henghai, He Xiuli. Laser surface hardening using determined intensity distribution [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 480–486.

虞钢, 王恒海, 何秀丽. 具有特定光强分布的激光表面硬化技术[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 480–486.

16 Li Xianghong, Liu Jun, Zhang Binzhen, *et al.*. Fabrication of NOA73 curved microlens arrays [J]. J Optoelectronics • Laser, 2013, 24(2): 292–296.

李向红, 刘俊, 张斌珍, 等. NOA73 材料的曲面微透镜阵列的制作[J]. 光电子·激光, 2013, 24(2): 292–296.