

衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化

刘志辉^{1,2} 杨欢¹ 石振东^{1,2} 李国俊¹ 方亮¹ 周崇喜¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 提出了一种用衍射微透镜阵列对面阵半导体激光光束进行匀化的方法, 解决了折射型微透镜阵列难于实现高填充因子、高精度面型的难题。基于标量衍射理论, 设计了具有多阶相位结构的衍射微透镜阵列, 推导了半导体激光从输入面到输出面的光场计算公式。数值模拟了非成像型微透镜阵列光束匀化系统, 并对其进行了实验验证。当衍射微透镜的口径为 0.125 mm, 相对孔径为 0.1, 相位台阶数为 8 时, 测得焦斑在快轴方向的不均匀性为 12.34%, 能量利用率为 96.6%; 慢轴方向的不均匀性为 5.42%, 能量利用率为 95.74%。实验结果与理论模拟的结果吻合, 验证了衍射微透镜阵列光束匀化系统模型的可行性。

关键词 衍射; 半导体激光器; 微透镜阵列; 光束匀化

中图分类号 TN245 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102005

Homogenization of the Semiconductor Laser Planar Array Using Diffractive Micro-Lens Array

Liu Zhihui^{1,2} Yang Huan¹ Shi Zhendong^{1,2} Li Guojun¹
Fang Liang¹ Zhou Chongxi¹

(¹ State Key Laboratory of Optical Technologies for Nano-Fabrication & Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to solve the problem that high fill factor and accurate surface shape of the refractive lens are difficult to realize, a new approach for homogenization of semiconductor laser planar array by using diffractive micro-lens array is proposed. Diffractive micro-lens array with phase steps based on the theory of scalar diffraction is designed. The equations of intensity distribution from the input plane to the output plane are derived. The numerical simulation and experiment of the non-imaging homogenization system of diffractive micro-lens array are carried out successfully. When the diameter of the micro-lens is 0.125 mm, relative aperture is 0.1 and phase step number is 8, in fast axis, the non-homogeneity is 12.34% and the energy efficiency is 96.6%; in slow axis, the non-homogeneity is 5.42% and the energy efficiency is 95.74%. The result of the experiment agrees well with the simulated result, proving the feasibility of the system of the diffractive micro-lens array for beam homogenization.

Key words diffraction; semiconductor lasers; micro-lens array; beam homogenization

OCIS codes 050.1970; 140.2010; 130.3990; 140.3300

1 引言

面阵半导体激光器具有高功率、高效率、小体

积、低成本、高可靠性等优点, 在工业、军事、医疗等领域有着广泛的应用^[1-4], 而均匀照明是实现这些

收稿日期: 2013-06-26; 收到修改稿日期: 2013-08-15

基金项目: 中国科学院开放课题(JTJG201206)

作者简介: 刘志辉(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光光束整形方面的研究。E-mail: lzhdear@126.com

导师简介: 周崇喜(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事微纳光学激光光束整形变换方面的研究。

E-mail: cxzhou@ioe.ac.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040M620)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

应用的关键手段,尤其激光抽运、激光加工等对光束的均匀性有着严格的要求。面阵半导体激光光束强度在快轴方向呈高斯型分布,均匀性较差,能量利用率不高,需通过有效的光学系统对其进行光束匀化。

目前,面阵半导体激光光束的匀化方法主要有光纤波导法和微透镜阵列法^[5-7]。光纤波导法基于光纤的全反射原理,将远场的光场耦合进光纤,通过光束在光纤中的多次反射在近场形成平顶光束达到光束匀化的目的,该方法的缺陷是光纤束很长、体积大、能量损耗严重、光亮度低。微透镜阵列法是基于微透镜阵列对激光光束的输入波前分割,被分割的每一个小波面经过后续光学系统在焦平面叠加而获得强度均匀分布的光斑,即先微分后积分的过程,该方法由于效率高、体积小、匀化效果好而被广泛应用。常用的微透镜阵列一般是由非球面的折射微透镜排列而成,但由于制作工艺的限制,非球面折射微透镜的面型不易控制,而且在工艺过程中存在过渡区,导致效率较低;而衍射型微透镜阵列具有设计简单、面型容易控制、阵列间填充比高等优点,因此本文采用衍射微透镜阵列对高功率半导体激光光束进行匀化。

2 衍射微透镜阵列匀化系统设计

2.1 原理简介

衍射微透镜阵列匀化系统的原理如图 1 所示。非成像型匀化系统由一系列衍射微透镜阵列及快轴、慢轴场镜构成。准直后的入射光束经过微透镜阵列后被分割成许多子光束,最后通过快轴、慢轴场镜分别叠加在其后焦平面上。设衍射微透镜的口径为 D ,焦距为 f ,快轴场镜的焦距为 F_F ,慢轴场镜的焦距为 F_S ,则在焦平面快、慢轴方向上的焦斑尺寸 H_F 、 H_S 分别为^[8]

$$H_F \approx F_F \times \frac{D}{f}, \quad (1)$$

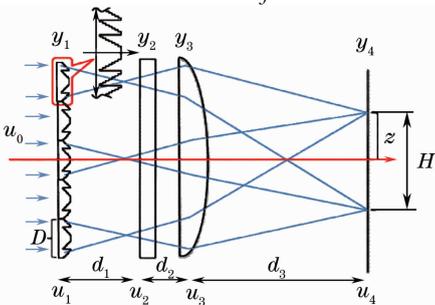


图 1 非成像衍射微透镜阵列匀化系统原理图

Fig. 1 Principle of non-imaging homogenization system with diffractive micro-lens arrays

$$H_S \approx 2 \times F_S \times \tan \theta_S, \quad (2)$$

式中 θ_S 为半导体激光在慢轴方向的半发散角。

2.2 衍射微透镜的理论设计

衍射微透镜是将连续面型的折射微透镜以 2π 为周期进行量化得到的多相位台阶结构,如图 1 中放大的微透镜所示。设 L 为衍射微透镜的相位台阶数, N 为微透镜的波带数, M 为相位台阶的序列号,相邻波带的光程差为波长 λ 。那么依此设计出的多相位台阶衍射微透镜的透射比函数为^[9]

$$T_0(y) = \sum_{M=1}^{NL} \exp\left[\frac{-i(M-1)2\pi}{L}\right] \times \text{rect}\left\{\frac{|y| - [(\sqrt{M} + \sqrt{M-1})/2]r}{(\sqrt{M} - \sqrt{M-1})r}\right\}, \quad (3)$$

式中 r 为第 1 个台阶的半径,且有 $r = \sqrt{\frac{2\lambda f}{L}}$ 。

2.3 衍射微透镜阵列匀化系统的光路计算

由于面阵半导体激光器不同巴条之间光束的相干性较差,因此子光束在焦平面上进行强度叠加。面阵半导体激光光束强度在慢轴方向呈超高斯分布,快轴方向呈高斯分布,因此入射光束的振幅分布为

$$u_0 = A_0 \exp\left[-\left(\frac{y^2}{\omega_F^2}\right)^{G_y} - \left(\frac{x^2}{\omega_S^2}\right)^{G_x}\right], \quad (4)$$

式中 A_0 为振幅系数, ω_F 、 ω_S 分别为快轴、慢轴方向上的束腰半径, G_y 、 G_x 分别为超高斯因子。由于微透镜阵列及场镜的宏观尺寸远远大于其厚度,因此在计算过程中将它们当作理想的薄透明屏处理。微透镜阵列及场镜的透射比函数分别为^[10]

$$T_1(y) = \sum_{m=-g}^g \delta(y - mD) \otimes \text{rect}\left(\frac{y}{D}\right) \times T_0(y), \quad (5)$$

$$T_2(y) = \exp\left(-i \frac{ky^2}{2F}\right), \quad (6)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, m 为微透镜的序列号, F 为场镜的焦距, g 为微透镜序列号取值范围。光束经过薄透明屏时,屏后复振幅分布 $u(y, z^+)$ 为屏前复振幅分布 $u(y, z^-)$ 与屏透射比函数的乘积,即

$$u(y, z^+) = u(y, z^-) T(y), \quad (7)$$

式中 z^- 、 z^+ 分别为屏前、屏后的轴向坐标。光束经过自由空间时的光场计算可由菲涅耳公式得^[11]

$$u_o(y_o, z_o) = \frac{\exp(jkd)}{j d \lambda} \exp\left(j \frac{k}{2d} y_o^2\right) \int_{-\infty}^{\infty} u_i(y_i, z_i) \times \exp\left(j \frac{k}{2d} y_i^2\right) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda d} y_i y_o\right) dy_i, \quad (8)$$

式中 d 为光束在自由空间传播的距离, u_i 、 u_o 分别为输入、输出振幅分布,下标 i 、 o 分别对应输入、输出

坐标。在系统的光路计算过程中，快轴方向的光场依次通过衍射微透镜阵列及快轴场镜，因此经过两次相位调制及两次自由空间传播后，得到焦平面上快轴方向的振幅分布 u_F 及强度分布 I_F 的关系为

$$I_F \propto |u_F|^2. \quad (9)$$

由于衍射微透镜阵列对光场没有起到分割作用，因此慢轴方向的光场仅经过一次相位调制及两次自由空间传播，在焦平面上慢轴方向的振幅分布 u_S 及强度分布 I_S 的关系为

$$I_S \propto |u_S|^2. \quad (10)$$

2.4 衍射微透镜阵列光束匀化系统的评价

光束匀化系统的优劣一般通过焦斑的均匀性及焦斑的能量利用率来评价。焦斑均匀性可通过光强的均方根 M_{RMS} 来评价，可表示为

$$M_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^{n'} (I_p - \bar{I})^2}{n' - 1}} \times 100\%, \quad (11)$$

表 1 非成像光束匀化系统参数

Table 1 Parameters of the non-imaging beam homogenization system

Element	Parameter	Value
Source	Wavelength /nm	808
	Radius of waist /mm	$\omega_F=0.65, \omega_S=4.5$
	Super-Gauss factor	$G_F=1, G_S=10$
	Width of single bar /mm	$W_F=1.5, W_S=10$
	Half divergence angle /($^\circ$)	$\theta_F=35, \theta_S=8$
	Number of bars	60×8
Diffractive micro-lens array	Diameter /mm	0.125
	Relative aperture	0.1
	Phase steps	8
	Number of micro-lens	W_F/D
Field lens in fast axis	Focal length in fast axis /mm	$F_F=300$
Field lens in slow axis	Focal length in slow axis /mm	$F_S=375$
Speckle in focal plane	Size /mm	30×100

3.2 模拟及分析

基于标量衍射理论，利用 Matlab 数学软件编程进行数值模拟，模拟参数如表 1 所示。图 2 为准直后的入射光束经过匀化系统之后在焦平面内的相对光强分布。焦斑在快轴方向呈现出许多细条纹，这种现象的产生是由于不同衍射微透镜聚焦出射的子光束之间产生了多光束干涉的缘故。衍射微透镜阵列将光束分割并聚焦于后焦面，在焦点处聚焦的光相当于众多的相干光源，相干光源之间的距离为微透镜口径 D 的整数倍，相干光束经过快轴场镜焦距 F_F 的自由空间传播后在焦平面上产生干涉。

波长为 λ 的单色平面波发生多光束干涉时，设衍射微透镜的个数为 $n(n=2g+1)$ ，则在主极大之

式中 I_p 为取样点的光强值， n' 为光强的总取样点数， \bar{I} 为输出光强的平均值。焦斑的能量利用率定义为^[12]

$$\eta = \frac{\sum_{q=1}^{m'} I_q}{\sum_{p=1}^{n'} I_p} \times 100\%, \quad (12)$$

式中 I_q 为大于 $0.9\bar{I}$ 的光强值， m' 为光强值大于 $0.9\bar{I}$ 的取样点个数。

3 衍射微透镜阵列光束匀化系统的数值模拟

3.1 参数设计

表 1 为非成像型衍射微透镜阵列光束匀化系统的参数设计，其中 W_F 、 W_S 为单巴条发光单元在快、慢轴方向的宽度， θ_F 、 θ_S 为单巴条发光源在快、慢轴方向的半发散角。

间有 $n-1$ 个极小值，又在极小值之间必有一个最大值，故在主极大值之间有 $n-2$ 个次最大值。光强主极大值的位置为

$$y = j \frac{F_F \lambda}{D}, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots. \quad (13)$$

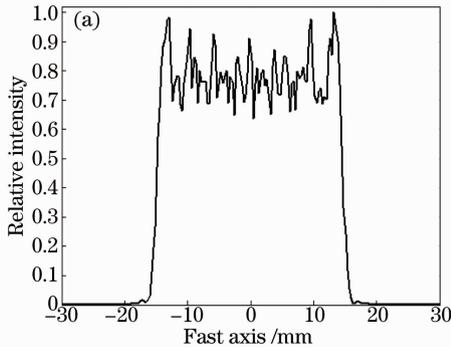
而相邻主极大值之间的间距为

$$\Delta y = \frac{F_F \times \lambda}{D}. \quad (14)$$

将 $F_F=300$ mm, $\lambda=808$ nm, $D=0.125$ mm 代入 (14) 式，得 $\Delta y=1.94$ mm。又由于准直后的快轴光束仍具有 0.4° 的发散角，经过光束匀化系统之后光强主极大值的线宽增大， $\Delta W = F_F \times \tan 0.4^\circ = 2.09$ mm。由于发散角的存在，干涉现象产生的光强主极大值之

间的次极大及极小值全都被覆盖了,从而焦斑在宏观上表现为快轴方向存在许多的细条纹。

根据功率探测器的口径 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 步距 0.2 mm , 对模拟结果进行平滑处理, 即在目标平



面内每隔 0.2 mm 对 0.5 mm 范围内的点取均值作为一个探测点。经数据处理后, 快轴方向的相对强度分布如图 2(a) 所示。焦斑在快轴方向的不均匀性 $M_{\text{RMS}}=8.85\%$, 能量利用率 $\eta=97.92\%$ 。

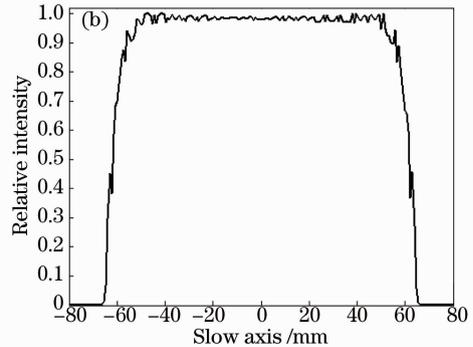


图 2 数值模拟得到的焦斑光强分布。(a) 快轴方向; (b) 慢轴方向

Fig. 2 Intensity distributions in focal plane from the numerical simulation. (a) In fast axis; (b) in slow axis

由于面阵半导体激光在慢轴方向呈超高斯分布, 且具有 8° 左右的半发散角, 因此经过慢轴场镜之后, 强度分布基本保持不变。经数据处理后(同快轴), 慢轴方向的相对强度分布如图 2(b) 所示。焦斑在慢轴方向的不均匀性 $M_{\text{RMS}}=5.26\%$, 能量利用率 $\eta=96.7\%$ 。

初始光束相对于系统光轴的入射角, 会对焦斑在目标平面的位置产生影响, 且焦斑的偏移量满足

$$\Delta l = F_F \times \tan \varphi, \quad (15)$$

式中 φ 为初始光束的入射角。当 $\varphi = 5\text{ mrad}$ 时, 偏移量 Δl 为 1.5 mm , 且对焦斑强度分布几乎不产生影响, 而在实验过程中, 入射角可以控制在 $0 \sim 5\text{ mrad}$ 范围内。

3.3 实验与分析

采用波长为 808 nm 的面阵半导体激光器, x 方向的巴条数为 8, 间隔 11.5 mm ; y 方向的巴条数为 60, 间隔为 1.8 mm 。采用如图 3 所示的非成像光

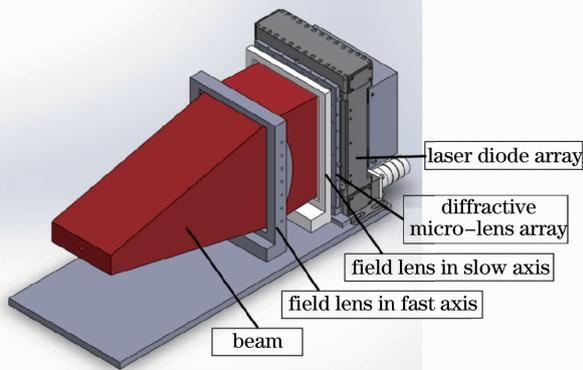


图 3 非成像光束匀化系统实验装置

Fig. 3 Experimental device of the non-imaging beam homogenization system

束匀化系统, 实验参数如表 1 所示。

焦斑的光强分布是通过光纤传导的光电探测器扫描测量得到的, 如图 4 所示。图 4(a) 是焦斑强度的二维(2D)分布图, (b) 是焦斑在快轴方向的强度分布图, (c) 是焦斑在慢轴方向的强度分布图, (d) 是焦斑强度的三维(3D)分布图。由图 4 可知, 焦斑处于焦平面的中央, 而且关于 x 轴, y 轴对称, 说明初始光束经准直后可作为平行平面波入射; 焦斑强度大于 $0.9\bar{I}$ 的尺寸约为 $40\text{ mm} \times 120\text{ mm}$, 且在快轴方向上存在许多细而密的条纹, 而在慢轴方向上的强度分布比较均匀。快轴方向的均方根(取 $x=0$) 值为 12.34% , 能量利用率为 96.6% ; 慢轴方向(取 $y=0$) 的均方根值为 5.42% , 能量利用率为 95.74% 。

从实验结果可以看出焦斑在快轴方向的均匀性比较差, 主要原因有三: 1) 受制作工艺的限制, 衍射微透镜是折射微透镜以 2π 为周期进行量化后得到的周期台阶相位结构, 台阶数 L 越大, 面型越接近连续面型的微透镜, 而实验所用微透镜的台阶数为 8, 若台阶数为 16 或以上, 通过数值模拟得到快轴方向的不均匀性可降低到 5% 以下, 另外套刻对准误差也对焦斑的均匀性产生影响; 2) 干涉效应对焦斑强度的调制, 单巴条发出的光束具有很强的相干性, 在焦平面上产生强烈的相干效应, 对焦斑的强度分布进行了调制, 破坏了其均匀性; 3) 发散角对焦斑强度的调制, 具有一定发散角的光束可消除由于干涉效应产生的光强极小值以及次极大值, 从而减弱干涉效应对焦斑强度分布的调制。初始光束在慢轴方向的强度分布呈接近于平顶的超高斯分布, 衍射微透镜阵列并没有对慢轴方向的光束进行分割, 仅有

后面的场镜对其进行放大缩小,并不改变其强度分

布,因此慢轴方向光强均匀性好。

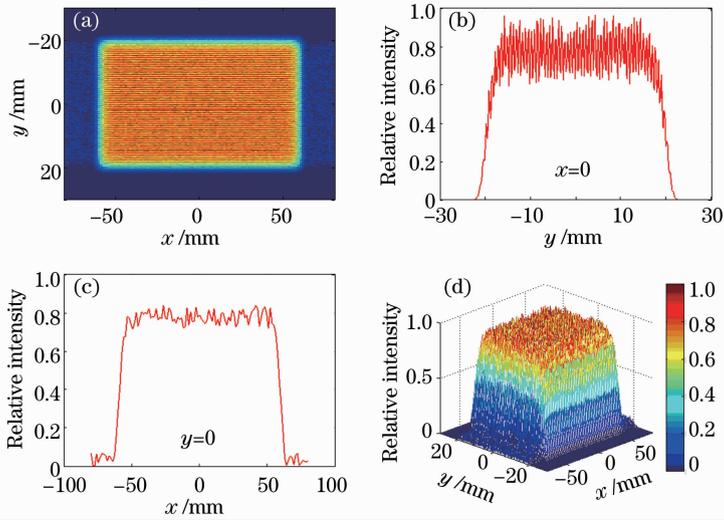


图4 实验所得焦斑强度分布图。(a) 焦斑强度的二维分布图;(b) 焦斑在快轴方向的强度分布图;(c) 焦斑在慢轴方向的强度分布图;(d) 焦斑强度的三维分布图

Fig. 4 Intensity distributions in focal plane from the experiment. (a) 2D intensity distribution of the focal spot; (b) intensity distribution in fast axis; (c) intensity distribution in slow axis; (d) 3D intensity distribution of the focal spot

4 结 论

设计了衍射微透镜阵列面阵半导体激光光束匀化系统,并进行了理论推导和数值模拟。数值模拟及实验验证表明,在单色平面波照明的情况下,焦斑在快轴方向的不均匀性为 12.34%,能量利用率为 96.6%;慢轴方向的不均匀性约为 5.42%,能量利用率为 95.74%。衍射微透镜阵列产生了等间隔的相干光源,导致焦平面内产生了多光束干涉现象,破坏了光斑的均匀性。若要获得更好的光斑均匀性,可增加衍射微透镜的相位台阶数及在系统中加入消相干器件。通过理论和实验证实了衍射微透镜阵列光束匀化系统的可行性,为利用衍射光学元件进行光束匀化提供了一种理论模型,对实际工程应用具有一定的指导意义。

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 J Lasers, 2004, 31(11): 1296-1300.
周崇喜, 刘银辉, 谢伟明, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1296-1300.
- 2 M Traub, H D Hoffmann, H D Plum, *et al.*. Homogenization of high power diode laser beams for pumping and direct applications [C]. SPIE, 2006, 6104: 61040Q.
- 3 K Frank, W Holger, B Peter, *et al.*. Successful diode laser material processing using application specific micro-optical beam shaping[C]. SPIE, 2007, 6824: 682403.
- 4 Fei Bing, Wang Youzi, Liu Tao, *et al.*. Variable beam divergence design method for high power diode laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 071401.

- 费冰, 王悠子, 刘涛, 等. 大功率半导体激光束变发散角整形系统设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 071401.
- 5 A Buttner, U D Zeitner. Wave optical analysis of light-emitting diode beam shaping using micro-lens arrays[J]. Opt Eng, 2002, 41(10): 2393-2401.
- 6 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. 基于双曲面基底的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.
- 7 Xiao Yanfen, Zhu Jing, Yang Baoxi, *et al.*. Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0216001.
肖艳芬, 朱菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0216001.
- 8 R Voelkel, K J Weible. Laser beam homogenizing: limitations and constraints[C]. SPIE, 2008, 7102: 71020J.
- 9 Jin Guofan, Wu Minxian. Binary Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 89-94.
金国藩, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 89-94.
- 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 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics[M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi, *et al.*, Transl, 3rd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 60-61.
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等译. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2006. 60-61.
- 12 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.

栏目编辑: 史敏