

# 利用衍射理论对基模高斯光束进行整形

王小发<sup>1,2,3</sup> 康治军<sup>3</sup> 樊仲维<sup>1,3,\*</sup> 连富强<sup>1,2,3</sup> 黄科<sup>1,2,3</sup> 余锦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100080  
<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>3</sup>北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085

**摘要** 为了获得在液晶修复技术中所需要的光束质量好、能量分布比较均匀的矩形光束,提出了一种新的光束整形系统。在这个系统中,通过对光阑后不同位置衍射效应的理论分析和计算,获得相应的衍射光斑图样,再利用  $4f$  像传递系统对理想的光斑图样进行提取和传递,经过扩束聚焦之后,用于加工样品,并设计了相应的实验装置来验证这种系统的可行性。研究结果表明,过光阑后不同位置的衍射面呈现出复杂的衍射图样,等效距离在  $56.0 \sim 58.5$  mm 之间能够选取到平化效果非常好的衍射面, $4f$  成像系统对其实现了较好的像传递,整形光束顶部的能量波动量小于 5%,能量提取率达到 80%。

**关键词** 激光光学;基模高斯光束;光束整形;矩形光阑; $4f$  成像系统

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0402006

## Beam Shaping of TEM<sub>00</sub> Gaussian Beam by Using Diffraction Theory

Wang Xiaofa<sup>1,2,3</sup> Kang Zhijun<sup>3</sup> Fan Zhongwei<sup>1,3</sup> Lian Fuqiang<sup>1,2,3</sup>  
Huang Ke<sup>1,2,3</sup> Yu Jin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup>Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China

**Abstract** In order to obtain the rectangular beam required for liquid crystal display (LCD) repair technology with good beam quality and uniform energy distribution, a new beam shaping system has been proposed. In this system, related diffraction patterns can be obtained by calculating and analyzing the diffraction effects in theory at different positions through rectangular aperture, and a proper diffraction surface, which will be used to process the sample, can be extracted and transferred by using  $4f$  image relaying system. In addition, a relevant experimental device has been designed to prove the feasibility of this system. The results show that there exist some of the complex diffraction patterns after passing through the aperture, and some diffraction planes with very good energy uniformity distribution can be selected in the  $56.0 \sim 58.5$  mm range of the equivalent distance. The effective delivery is achieved by the use of  $4f$  imaging system, the fluctuation range of energy on the top of shaped beam is less than 5%, and energy efficiency is about 80%.

**Key words** lasers optics; TEM<sub>00</sub> Gaussian beam; beam shaping; rectangular aperture;  $4f$  imaging system

**OCIS codes** 260.0260; 220.0220; 110.0110; 050.0050

## 1 引言

近年来,对有源矩阵液晶显示器进行非晶硅薄膜的退火和电路缺陷的修复成为一个激光应用新领域,因而备受关注<sup>[1,2]</sup>。进行液晶修复时,为了对电

路中的缺陷进行处理,同时又不至于损伤玻璃基底,对激光束的形状和尺寸是有要求的,一般利用光束质量好、能量比较平化、尺寸在  $20 \mu\text{m}$  左右的矩形激光束,而实际的基模激光束能量是高斯分布的,不

收稿日期: 2010-10-12; 收到修改稿日期: 2010-12-06

基金项目: 国家 863 计划(2008AA031901)和国家自然科学基金(60927010)资助课题。

作者简介: 王小发(1978—),男,博士研究生,主要从事工业激光器方面的研究。E-mail: bluebaby0614@126.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

能直接使用,因此需对其进行整形处理。

对高斯光束进行整形的方法很多<sup>[3~14]</sup>。而为了获得能量均匀的光束,最常用的方法是利用显微镜将高斯光束扩束准直后,提取其中心相对均匀的部分,但这样光能浪费很大,只有约 5% 的能量被利用。利用液晶光阀对光束进行整形也是一种方便快捷的方法,但是成本较高,而且能量利用率只有 10% 左右,这已经被大量报道<sup>[3~6]</sup>。此外,利用衍射理论对高斯光束的整形进行了相当多的理论研究<sup>[7~10]</sup>,利用基于衍射理论制作的积分镜<sup>[8]</sup>和矩形波导腔结构<sup>[11,14]</sup>来进行光束整形是近年来的研究热点,其优点是光束平化程度高,能量损失少,但是结构复杂,成本较高。因此寻找一种结构简单、平化效果较好、能量利用率较高的方法成为液晶修复技术中的迫切要求。基于此,本文通过对高斯光束传

播衍射理论的分析,构造了一个新的整形系统。理论和实验研究表明,该整形系统能够获得高转换效率、高平化质量的矩形光束。

## 2 系统模型

图 1 为基模高斯光束整形的简化实验模型。其中,laser 是端面抽运的 Nd:YAG 全固态激光器,腔长为 400 mm,波长为 1064 nm,TEM<sub>00</sub> 模输出,OC 为输出镜。A 是焦距为 50 mm 的凸透镜,B 是矩形光阑,由两可调节宽度的狭缝构成,置于腰斑位置。C 是焦距为 100 mm 的凸透镜,位置离矩形光阑 100 mm 处,D 为需要选择的衍射面,同时也是 4f 成像系统的物面,E 为像面。接下来是放大倍数为 4 倍的扩束镜,F 为聚焦透镜。实验中采用 CCD 相机采集图像。

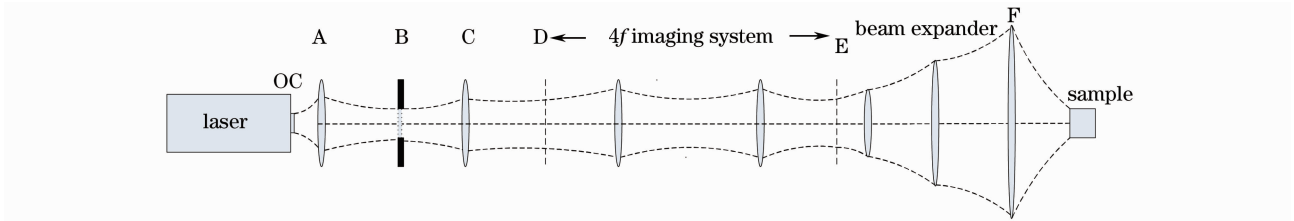


图 1 基模高斯光束整形的实验构架

Fig. 1 Experimental framework based on fundamental mode Gaussian beam shaping

## 3 理 论

为了选取到光束平化效果最好的衍射面,对过矩形光阑后 D 面的衍射情况进行了数值模拟。从矩形光阑 B 到衍射位置 D 的传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中  $d$  为 B 和 C 之间的距离, $f$  为透镜焦距, $d_1$  为透镜到 D 面之间的距离。衍射位置 D 处的复振幅可以用柯林斯公式表示<sup>[15]</sup>

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkL)}{j\lambda B_1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp\left\{ \frac{jk}{2B_1} [A_1(x_1^2 + y_1^2) + D_1(x^2 + y^2) - 2(x_1x + y_1y)] \right\} dx_1 dy_1, \quad (2)$$

式中  $k$  为波数, $L$  为衍射距离, $\lambda$  为波长,  $U_1(x_1, y_1) = UP(x_1, y_1)$  为入射平面光波复振幅,  $U = \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w^2}\right)$  为单位振幅高斯光的复振幅, $w$  为高斯光束的腰斑半径。  $P(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{L_x/2}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{L_y/2}\right)$  为矩形光阑的光瞳函数表达式,  $L_x$  和  $L_y$  分别是矩形的长和宽。

对(2)式积分部分相位因子进行配方,由  $A_1 D_1 - B_1 C_1 = 1$  关系,可以整理成与非涅耳衍射积分相似的形式,求出等效方形孔的宽度及等效衍射距离,利用矩形孔非涅耳衍射的解析公式写出 D 面的强度分布

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkL)}{j\lambda B_1} \exp\left[ j \frac{kC_1}{2A_1} (x^2 + y^2) \right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_1, y_1) \exp\left\{ j \frac{k}{2B_1 A_1} [(A_1 x_1 - x)^2 + (A_1 y_1 - y)^2] \right\} dx_1 dy_1, \quad (3)$$

做变量代换  $x_a = A_1 x_1, y_a = A_1 y_1$  得

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkL)}{j\lambda B_1 A_1^2} \exp\left[j \frac{kC_1}{2A_1} (x^2 + y^2)\right] \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} U_1\left(\frac{x_a}{A_1}, \frac{y_a}{A_1}\right) \exp\left\{j \frac{k}{2B_1 A_1} [(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2]\right\} dx_a dy_a, \quad (4)$$

等效方孔宽度  $L_a = |A_1 L_x|$ , 等效衍射距离  $z_a = |A_1 B_1|$ , 等效腰斑半径  $\omega_1 = |A_1 \omega|$ , 从(4)式可以看出, 当波长和焦距确定时, 衍射面 D 处的光强分布由上述 3 个等效量决定, 固定其中两个量可以考察第 3 个量对光强分布的影响。

此外,  $4f$  系统的传输矩阵可以表示为 ( $f = 100 \text{ mm}$ )

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

由(5)式可以看出,  $4f$  系统相当于把一个面复制了或者说把面移动了零距离, 但却不改变面的性质。后续的扩束和聚焦系统在此不作详细讨论。

## 4 结果与讨论

### 4.1 衍射面 D 的光斑图样选择

基于矩形孔的等效菲涅耳衍射解析公式, 利用快速傅里叶算法(FFT), 数值模拟了衍射面 D 的光斑图样<sup>[14]</sup>, 所用的参数取值如下:  $L_a = 0.55 \text{ mm}$ ,  $\omega_1 = 0.5 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 。

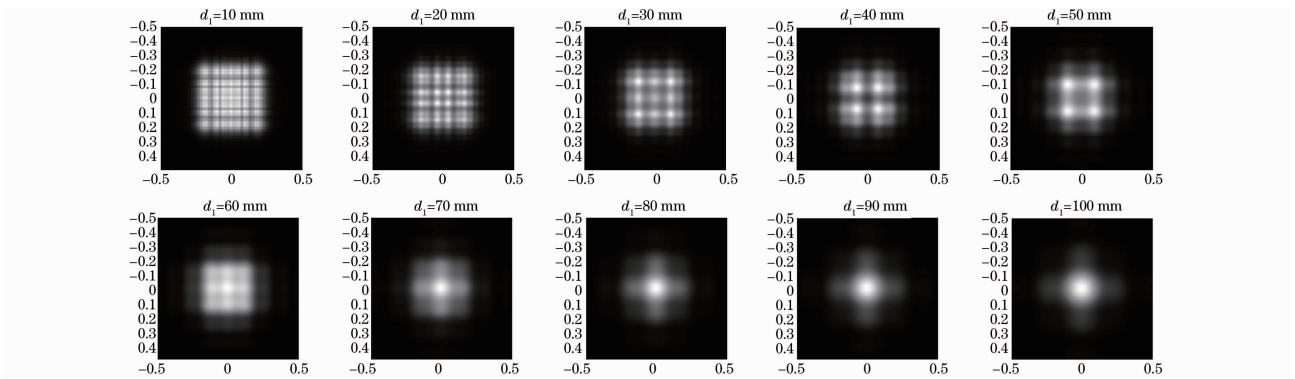


图 2 等效衍射距离在 10~100 mm 之间的光斑衍射图样

Fig. 2 Spot diffraction patterns observed when the distance is in the 10~100 mm equivalent range

### 4.2 实验结果

通过上述的理论模拟, 搭建了相应的实验装置, 在实际衍射距离  $d_1 = 160 \text{ mm}$  进行取样。实际距离和数值模拟的等效距离相差一个焦距 ( $f = 100 \text{ mm}$ )。

图 4 为实验中所用的基模光斑。光束质量  $M^2 = 1.31$ , 所用的激光器腔长为  $400 \text{ mm}$ , 光斑尺寸

图 2 为衍射面 D 处于不同位置时的衍射图样。从图中可以看出, 衍射距离从  $10 \text{ mm}$  变化到  $100 \text{ mm}$  的过程中, 衍射光斑从复杂逐渐变成简单, 矩形光束逐渐恢复成近高斯光束。此外发现, 在  $d_1 = 60 \text{ mm}$  左右的时候, 光斑图样能量分布较均匀, 形状较好。为了找到最佳的衍射图样, 对  $d_1 = 60 \text{ mm}$  周围内的衍射图样进行了仔细研究, 发现衍射距离在  $56.0 \sim 58.5 \text{ mm}$  之间的一个狭小区域内能够获得需要的光斑图样。同时, 改变聚焦镜 C 的焦距、小孔的宽度、激光束的腰斑半径, 发现具有同样的规律。

图 3 为等效衍射距离为  $57.4 \text{ mm}$  时的光斑图样和三维强度分布图。从图中可以看出, 光斑由 9 个微微凸起的部分组成, 但是总体上矩形形状好, 能量相对比较均匀, 在尖峰处, 能量起伏程度不超过总能量的 5%, 是比较理想的平化衍射光斑。要想进一步提高光束的平化效果, 除了减小计算步长外, 还要综合考虑等效光斑直径、等效衍射长度和等效方孔宽度三者之间的综合作用效果。由于在等效衍射距离为  $57.4 \text{ mm}$  时的衍射面性能优越, 因而选择这个位置的衍射面作为后续  $4f$  系统的物面, 为下一步实验提供参考。

为  $1.0765 \text{ mm} \times 0.946 \text{ mm}$ , 与理论模拟采用的等效腰斑  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  比较接近(等效值为实际值的一半)。从图中可以看出, 所选择的光斑为典型的基模光斑。

图 5 为实际测得的整形光斑及其强度分布。通过调节狭缝的宽度, 使小孔成近似方形, 边长在

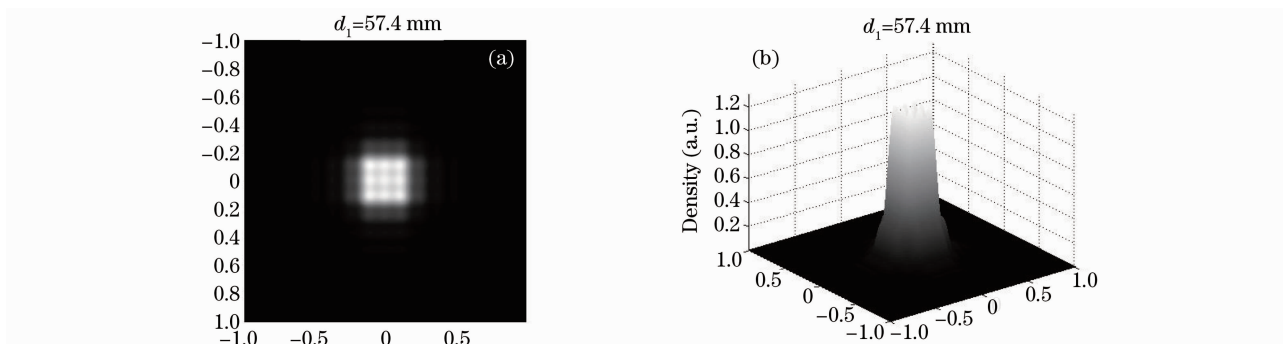


图 3 衍射距离  $d_1 = 57.4$  mm 时获得的衍射光斑(a)和三维强度分布图(b)

Fig. 3 Spot diffraction pattern (a) and 3D intensity distribution (b) observed when  $d_1 = 57.4$  mm

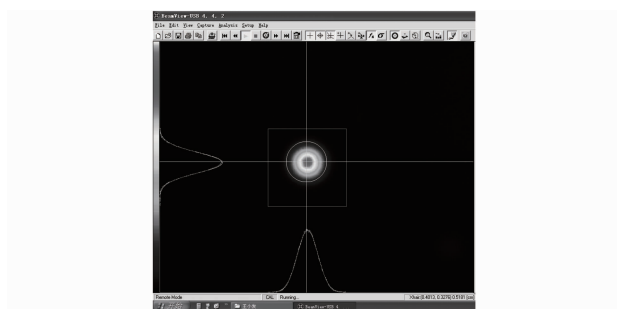


图 4 进行整形所用基模光束的腰斑

Fig. 4 Waist spot of  $TEM_{00}$  Gaussian beam used in beam shaping

1.1 mm左右(与模拟所用的等效距离 0.55 mm 相对应),从图 5(a)可以看出,所获得的矩形光斑形状较好,能量比较平化。从图 5(b)强度曲线上也可以

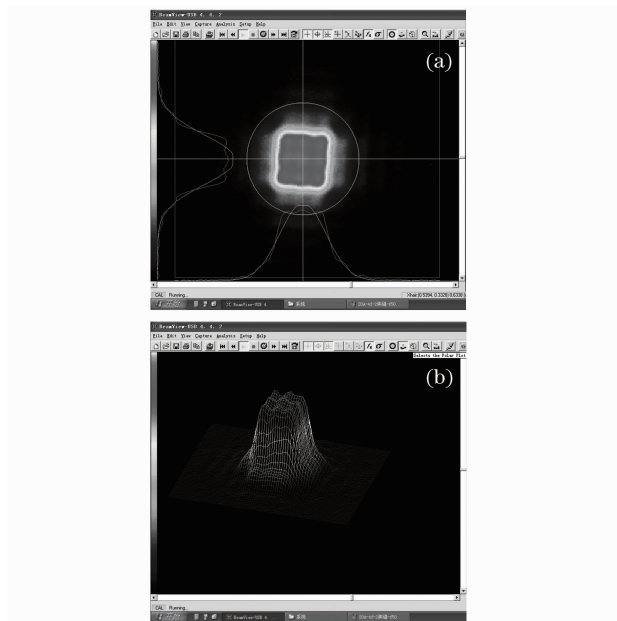


图 5 实测距离为 160 mm 处的整形光斑(a)及三维强度分布图(b)

Fig. 5 Shaping spot (a) and 3D intensity distribution (b) observed when the actual distance is 160 mm

看出,能量距离平顶形状只有较小的差别,三维图形清楚地显示了这种现象。

利用上面选择的矩形光斑,把它作为  $4f$  系统的物面,通过  $4f$  系统对它进行传递(焦距可按实际加工要求变化),通过 4 倍的扩束镜进行扩束,再经过聚焦透镜( $f=50$  mm)进行聚焦,获得所需要尺寸的矩形光斑。图 6 为经过整个系统后获得的光斑。从图中可以看出,在  $x$  轴上光斑强度起伏小于 5%,而在  $y$  轴上,光斑强度起伏要接近 10%。导致  $y$  方向光束平化效果变差的原因可能来自 3 个方面:1)用于衰减光强的楔形镜上有污渍,造成了局部调制;2)CCD 本身所带的衰减器也有污渍,进一步发生调制;3)来自系统不完美的像传递。通过优化系统精度,理论上可以把  $y$  方向能量波动也降到 5% 以下。此外,经过整个系统后,功率从最初的 10.2 W 减少到 8.1 W,能量利用率为 80% 左右,远远高于传统的方法。

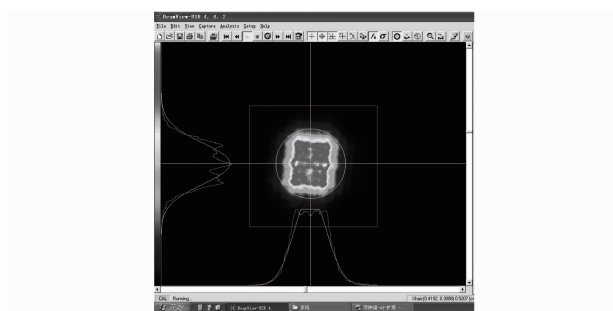


图 6 经过整个系统后获得的光斑

Fig. 6 Spot observed after the entire system

## 5 结 论

对基模高斯光束经过矩形光阑后衍射效应进行了数值模拟,构建了一个新的光束整形系统。研究发现,通过对衍射光斑的仔细提取,能够获得在液晶修复中所需要的矩形光束,引入的  $4f$  像传递系统

能够把选择的衍射面直接投影到所需要的位置,避免了衍射距离对光斑的变形,最终获得了所需要的加工光束,对比发现,理论和实验结果符合很好。样品的加工实验将在随后的研究中进行。此外,还对去掉  $4f$  系统的简单结构进行了相关研究,发现聚焦后很难获得矩形光斑,其具体原因还在进一步研究中。

### 参 考 文 献

- 1 Ning Jiping, Li Jiaqiang, Lu Xiaochun *et al.*. Study for application of laser to repairing ITO film on LCD board[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(2): 15~20  
宁继平, 李嘉强, 鲁笑春等. 激光用于 LCD 板 ITO 膜修复的研究[J]. *光电工程*, 2003, **30**(2): 15~20
- 2 Wang Yongqing, Sun Rongxia, Zong Xiaoping *et al.*. Laser annealing and repair processes of active matrix liquid crystal displays(AMLCD)[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(4): 1~2  
王永青, 孙荣霞, 宗晓萍等. 液晶显示器生产中的激光退火和缺陷修复[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(4): 1~2
- 3 Chen Xiaoxi, Huang Ziqiang, Yang Wenjun. Controllable system and design algorithm for laser beam shaping using optical addressing liquid crystal spatial light modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 47~50  
陈晓西, 黄子强, 杨文君. 光寻址液晶空间光调制器用于激光光束整形的可控系统和设计算法[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(1): 47~50
- 4 Ding Lei, Zhao Runchang, Li Mingzhong *et al.*. Feasibility study of liquid crystal light valve on beam shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 849~852  
丁磊, 赵润昌, 李明中等. 反射式液晶光阀用于激光束空间整形可行性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 849~852
- 5 Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036  
马浩统, 周朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2032~2036
- 6 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
- 7 Darwin Palima, Jesper Glückstad. Gaussian to uniform intensity shaper based on generalized phase contrast[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1507~1516
- 8 Li Junchang, Zheng Qiguang, Ling Dongxiong *et al.*. Optical capability and relative heat action of a high-power integrating mirror[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(8): 767~772  
李俊昌, 郑启光, 凌东雄等. 强激光积分变换镜的光学性能及相关热作用[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(8): 767~772
- 9 Lin Yong, Hu Jiasheng, Wu Kenan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682~1686  
林勇, 胡家升, 吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1682~1686
- 10 Zhang Yan, Zhang Jingjuan, Situ Guohai. Investigation on diffractive optical elements for converting Gaussian beam into square uniform focused spot[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1183~1187  
张艳, 张静娟, 司徒国海. 高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1183~1187
- 11 Jun Changli, Rogerio Lopes, Christine Vialle *et al.*. Study of an optical device for energy homogenization of a high power laser[J]. *J. Laser Appl.*, 1999, **11**(6): 279~283
- 12 V. Ilya, Shadrivov, A. Andrey *et al.*. Beam shaping by a periodic structure with negative refraction[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(22): 3020~3822
- 13 Yang Xiangtong, Fan Wei. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1698~1704  
杨向通, 范薇. 利用双折射透镜组实现激光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1698~1704
- 14 Li Junchang, Li Congguang, A. Delmas. Calculation of diffraction patterns in spatial surface[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(7): 1950~1954
- 15 Li Junchang, Peng Zujie, Fu Yunchang. Diffraction transfer function and its calculation of classic diffraction formula[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **280**(2): 243~248