

# 基于液晶空间光调制器的激光束整形

于晓晨 胡家升 王连宝

(大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 采用相位混合算法(PMA)与平滑修正法相结合的混合算法,对激光发出的高斯光束进行整形,得到了均方误差和顶部不均匀度均明显降低的等光强分布。利用液晶空间光调制器(LCSLM)的相位调制特性,实现了对高斯光束的光束整形,获得了光强均匀分布的圆光束和矩形光束输出。得到的输出光束顶部不均匀度和均方误差都低于5%,能量集中度在90%以上。表明此方法是一种实时、可控和高效的激光束整形方法。

**关键词** 光学设计;光束整形;液晶空间光调制器;相位混合算法-平滑修正混合算法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0514001

## Laser Beam Shaping Based on Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

Yu Xiaochen Hu Jiasheng Wang Lianbao

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology,  
Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract** A hybrid algorithm based on the phase mixture algorithm (PMA) and profile-smoothing algorithm is used for laser beam shaping, reducing mean square error and nonuniformity of output beam at the same time. Using the phase-modulation characteristics of liquid-crystal spatial light modulator (LCSLM), an experimental optical system is built up. The input Gaussian laser beam is shaped to flat top circular beam and rectangle beam respectively. The top beam nonuniformity and mean square error of the output beams received by CCD are less than 5%, and the energy concentration is higher than 90%. This method is proved to be a real-time, controllable and efficient laser beam shaping method.

**Key words** optical design; beam shaping; liquid-crystal spatial light modulator; phase mixture algorithm-profile-smoothing hybrid algorithm

**OCIS codes** 140.3300; 230.6120; 220.4830; 110.0100

## 1 引 言

随着激光技术的发展,激光的应用越来越广泛,而激光束的光强呈现高斯分布这一特性限制了它的应用范围。例如在激光投影印刷、激光雷达、表面热处理、激光核聚变及全息术等应用领域中,都要求激光光束的能量呈均匀分布<sup>[1]</sup>;因此,为了进一步拓宽激光的应用领域,需要对激光束进行整形,得到符合要求的输出光束。为了解决激光束整形问题,研究人员提出了多种整形元件。典型的整形元件有双

折射透镜<sup>[2]</sup>、非球面系统<sup>[3]</sup>、二元光学元件<sup>[4]</sup>和微透镜阵列系统<sup>[5]</sup>等。这些元件都能实现激光束整形,但各有优缺点。二元光学元件有着衍射效率高、微型化和阵列化等优点,但目前国内二元光学元件的加工还没有达到较高的水平<sup>[6]</sup>。非球面透镜组对单模激光束的整形效果较好<sup>[3]</sup>,但不适用于强度分布未知的多模激光束。微透镜阵列光学聚焦系统对多模激光束进行整形<sup>[5]</sup>,加工工艺简单,但容易产生干涉斑纹。

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2012-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(60877003)和辽宁省高校重点实验室(LS2010037)资助课题。

作者简介: 于晓晨(1986—),女,博士研究生,主要从事激光光束整形技术方面的研究。

E-mail: dorothy\_yu526@126.com

导师简介: 胡家升(1941—),男,教授,主要从事工程光学、成像科学与图象处理、光学系统设计、信息安全与防伪技术和X射线成像技术等方面的研究。E-mail: jshu@dlut.edu.cn(通信联系人)

此外,上述各种方法都存在一个共同的缺点:光学元件制成之后不能随光束的改变而改变。因此寻找一种实时、可控的光束整形新方法显得十分重要。陈怀新等<sup>[7]</sup>提出采用液晶空间光调制器实时产生软边切趾光阑,利用液晶空间光调制器的振幅调制特性,实现光束的空间整形;马浩统等<sup>[8]</sup>利用液晶空间光调制器模拟非球面镜整形系统相位实现激光束的空间整形,但这两种方法获得的输出光束顶部均匀性较低。为得到高质量的整形输出光束,利用液晶空间光调制器的相位调制特性,采用相位混合算法(PMA)-平滑修正混合算法来求解它的相位分布,使入射高斯光束经过调制后,输出了光强均匀分布的圆光束和方形光束。这种方法仅对入射光束进行相位调制,并不做振幅调整,理论上能量转换效率可以达到90%以上,顶部不均匀度和均方根误差都很小,适合应用于图像处理领域。

## 2 系统原理

### 2.1 液晶空间光调制器的相位调制特性

液晶空间光调制器(LCSLM)以液晶的电控向列扭曲效应和电控双折射效应为主要工作原理,采用电寻址方式,以电压的变化改变空间上光分布的强度、相位、偏振态和波长等,广泛应用于模式识别、图像处理、数字全息、空间滤波和二元光学等领域<sup>[9]</sup>。

利用液晶空间光调制器的相位调制特性,通过马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪<sup>[10]</sup>测得它的调制特性曲线(包括相位与灰度的关系以及强度与灰度的关系),采用的液晶空间光调制器 LC2002 调制特性曲线如图 1 所示<sup>[9]</sup>。这样就可以利用计算机向液晶空间光调制器输入相位编码来驱动它对入射光

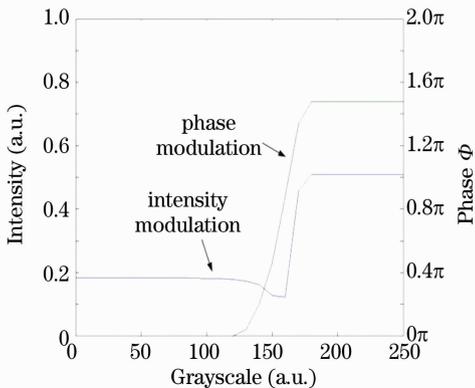


图 1 LC2002 调制特性曲线

Fig. 1 Modulation characteristic curve of LC2002

束进行相位调制。虽然希望获得纯相位调制,但从图 1 可以看出,LC2002 本身对相位和幅值的调制具有一定的局限性,它无法达到  $2\pi$  区间的完全相位调制。另外,LC2002 在相位调制时无法避免地带有一些幅度调制,会产生一定误差,并使效率有所降低。综合考虑,本文采用 8 阶相位编码,需要一定的近似处理。

### 2.2 相位函数设计原理

利用液晶空间光调制器进行光束整形的关键在于其相位函数的设计,这实质上是一个相位恢复问题:已知输入、输出平面上光场的振幅分布,求取液晶空间光调制器的最优相位分布,使入射光场经过调制后,输出的振幅分布逼近理想的振幅分布。

入射光束经输入平面上的液晶空间光调制器调制后,在空间中发生衍射,根据衍射距离不同分为菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射<sup>[11]</sup>。本文研究的是激光束近场整形,即采用菲涅耳衍射,其表达式为<sup>[12]</sup>

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_0(x_0, y_0) \times \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0, \quad (1)$$

式中  $U_0(x_0, y_0)$  为入射光场,  $U(x, y)$  为出射光场,  $d$  为衍射距离,  $\lambda$  为光波长,  $k = 2\pi/\lambda$ 。

采用顶部不均匀度  $\delta$ 、均方根误差  $e$  和能量集中度  $\eta$  来对输出光束的质量进行评价<sup>[13]</sup>。它们的定义为

$$\delta = \sqrt{\sum_{(x,y) \in W} \left[ \frac{|I(x,y) - \bar{I}|^2}{\bar{I}} \right]} / (n-1), \quad (2)$$

$$\bar{I} = \sum_{(x,y) \in W} |I(x,y)| / n, \quad (3)$$

$$e = \frac{\sum_{x,y} |I(x,y) - I'(x,y)|^2}{\sum_{x,y} |I'(x,y)|^2}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\sum_{(x,y) \in W} I(x,y)}{\sum_{x,y} I(x,y)}, \quad (5)$$

式中  $I(x, y)$  为实际输出的光强分布,  $I'(x, y)$  为理想的光强分布,  $W$  为输出平面上平顶光束区域,即信号窗区域,  $n$  为  $W$  内的采样点数。顶部不均匀度  $\delta$  反映了实际输出光束顶部各点光强相对于平均光强的起伏,  $\delta$  越小光束顶部越均匀;均方根误差  $e$  表征了实际输出光束与理想输出光束的近似程度;能量集中度  $\eta$  则反映了实际输出光束能量在需要范围内的集中程度。

### 3 算法描述与分析

#### 3.1 PMA 算法

盖尔贝格-萨克斯通(GS)算法<sup>[13]</sup>反复利用正、逆菲涅耳变换对输入、输出光场进行迭代,最终得到使输出光场最接近理想输出光场的相位函数,简单快速。但GS算法本身局部收敛,易陷入局部最优解。为了有效解决GS算法局部最优问题,同时抑制Gibbs振荡,有人提出了PMA<sup>[14]</sup>。它利用本次迭代的相位和上一次相位的加权和作为下一次迭代的相位值,即

$$\phi_{k+1}(x_0, y_0) = a\phi_k(x_0, y_0) + \text{barg}\{\mathcal{F}^{-1}\{U_{\text{ideal}}(x, y)\exp[i\psi_k(x, y)]\}\}, \quad (6)$$

式中 $a, b$ 为非负的常数,且有 $a + b = 1$ 。PMA算法减小了迭代过程中相位的突变,从而有利于改善输出光束的均方根误差。

#### 3.2 平滑修正法

采用GS算法整形得到的输出光束顶部均匀性较差,为改进输出光束的顶部均匀度,林勇等<sup>[15]</sup>提出用平滑修正法。平滑修正法与GS算法的思想基本相同,区别在于在输出面上的约束条件不同。GS算法输出面所有点都用理想输出代替,而平滑修正

法仅对光强均匀分布范围内的点进行修正,只有与平均光强差值大于阈值 $k$ 的点用理想输出 $B$ 代替,其余点保持不变,大幅减小了顶部不均匀度,但输出光束的均方误差增大,能量集中度降低:

$$\bar{F} = \begin{cases} B\exp(i\phi), & ||F_{\text{in}}| - |F_{\text{in}}|| > k \\ |F| \exp(i\phi), & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

#### 3.3 混合算法

虽然PMA算法和平滑修正算法在很大程度上改善了输出光束的质量,但是它们仍存在着一定的缺陷。如PMA算法虽然降低了输出光束的均方根误差,但所得光束的顶部不均匀度并不理想;平滑修正法极大地改善了输出光束的顶部不均匀度,但这是以增大均方根误差为代价的。为了有效地利用两种算法的优点,将两种算法结合起来,提出了PMA-平滑修正混合算法(以下简称混合算法),即将PMA算法求解得到的液晶空间光调制器的相位作为初始相位,再进行平滑修正法的迭代过程。

为了进行比较,分别利用PMA算法、平滑修正法和混合算法来求解液晶空间光调制器的相位函数。输入高斯光束,理想输出为均匀圆光束时,三种算法所得输出光束的光强分布如图2所示。

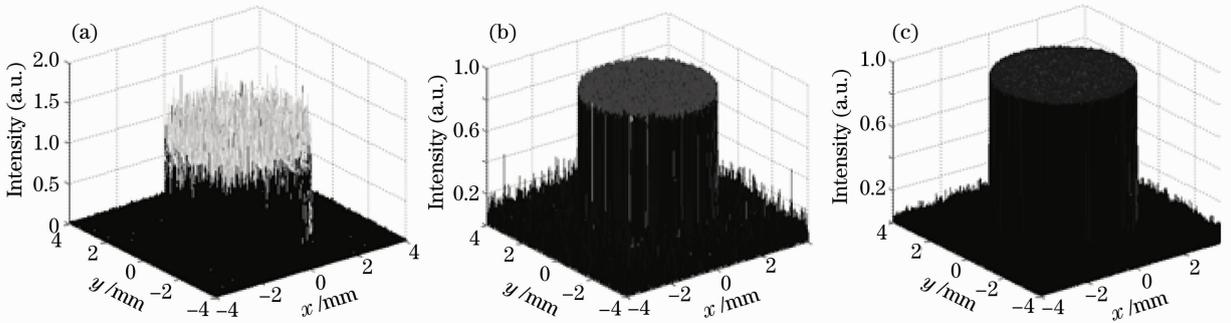


图2 圆光束输出。(a) PMA算法输出圆光束;(b)平滑修正法输出圆光束;(c)混合算法输出圆光束

Fig. 2 Circular output beam. (a) Output beam using PMA algorithm; (b) output beam using profile-smoothing algorithm; (c) output beam using hybrid algorithm

为了更好地说明混合算法的优越性,分别计算PMA算法、平滑修正法和混合算法所得输出光束的 $\delta, e$ 和 $\eta$ 值,具体结果如表1所示,可以看出混合算法较其他两种算法得到的输出光束质量有很大提高。

在高密度全息存储应用中,为有效利用存储空

表1 输出圆光束算法评价

Table 1 Evaluation index of algorithms with circular output beam

Parameter	$\delta$	$e$	$\eta$
PMA algorithm / %	16.70	2.70	97.8
Profile smoothing algorithm / %	2.20	4.10	90.4

Hybrid algorithm / %	0.92	0.34	95.8
----------------------	------	------	------

间,需要均匀分布的矩形激光束<sup>[12]</sup>。同样利用PMA算法、平滑修正法及混合算法分别对输入高斯光束进行整形,得到的矩形输出光束如图3所示。分别计算三种算法输出矩形光束的 $\delta, e$ 和 $\eta$ 值,结果见表2,同样,混合算法得到的输出光束质量最高。

表2 输出矩形光束算法评价

Table 2 Evaluation index of algorithms with rectangle output beam

Parameter	$\delta$	$e$	$\eta$
PMA algorithm / %	15.60	2.40	98.6

Profile smoothing algorithm / %	2.30	4.80	90.8
Hybrid algorithm / %	0.21	0.71	96.9

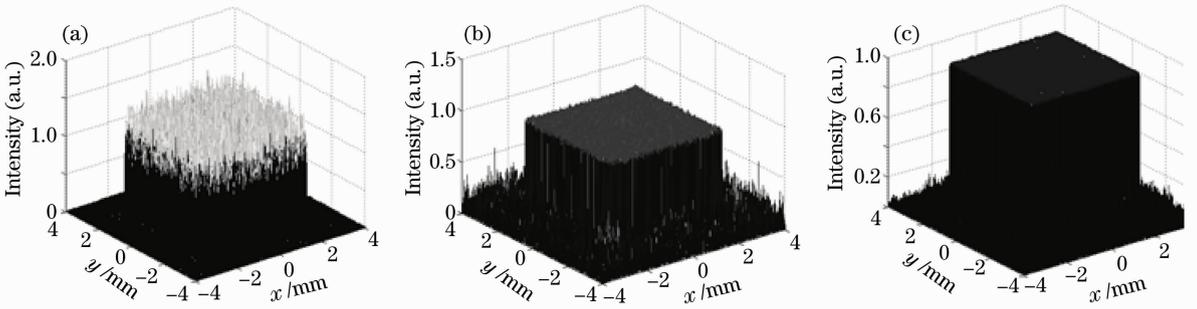


图3 矩形光束输出。(a) PMA 算法输出矩形光束;(b)平滑修正法输出矩形光束;(c)混合算法输出矩形光束  
Fig.3 Rectrangle output beam. (a) Output beam using PMA algorithm; (b) output beam using profile-smoothing algorithm; (c) output beam using hybrid algorithm

### 4 实验研究与结果分析

基于上述理论分析,我们采用图4所示的实验装置来进行光束整形实验。入射光束来自波长632.8 nm的He-Ne激光器;L1和L2构成扩束系统;液晶空间光调制器LC2002为德国HoloEye公司生产,液晶窗的尺寸为26.2 mm × 22.0 mm,分辨率为800 pixel × 600 pixel;L3、F1和L4构成空间滤波系统,L3、L4焦距比为5:3起缩束作用;F2为光阑,挡住除零级外的其他级衍射光斑;CCD为OK-AM1310,分辨率为1300 pixel × 1024 pixel,像素尺寸为4.65 μm × 4.65 μm;计算机用于控制液晶空间光调制器及接收CCD采集的输出光束。

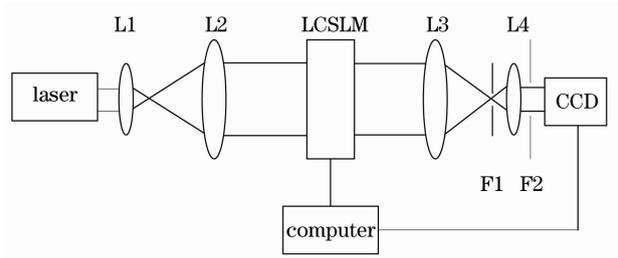


图4 光束整形实验装置图

Fig.4 Experimental setup for laser beam shaping

依图4搭建实验系统,先令液晶空间光调制器处于非调制状态,CCD接收到的输入高斯光束如图5所示,光束束腰半径1.3 mm,则设理想输出光束分别为半径为1.3 mm的圆光束和矩形光束。

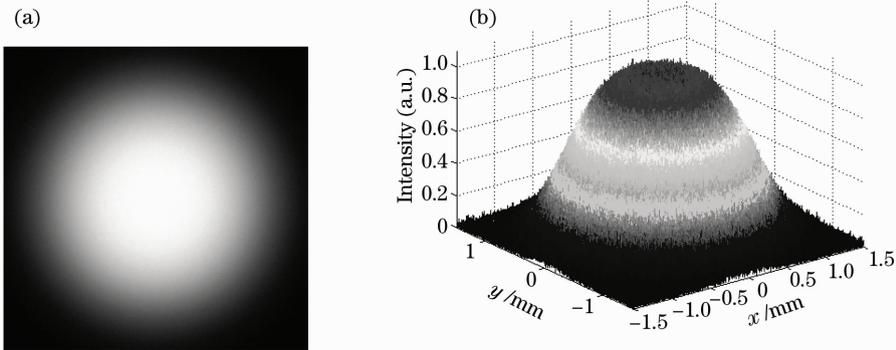


图5 输入高斯光束。(a) CCD接收到的输入光束;(b)输入光束光强分布

Fig.5 Input Gaussian beam in experiment. (a) Input beam received by CCD; (b) intensity distribution of the input beam

针对输入光束和理想输出光束,利用混合算法求解相位函数,根据图1所示相位调制曲线,将相位函数转化为8阶相位编码控制液晶空间光调制器;最终CCD采集到的输出光束分别如图6、7所示。

利用(2)~(5)式计算输出光束的 $\delta$ 、 $e$ 和 $\eta$ 值。上述的实验结果表明,该方法能够很好地实现对高斯光束的光强整形,获得等强度的圆光束和矩形光束,两种输出光束90%以上的能量集中在顶部不均

匀度和均方根误差小于 3% 和 5% 的范围内。但由于液晶空间光调制器 LC2002 自身透射率为 23%，使得输出等强度光束的能量有所降低。若忽略液晶空间光调制器的透射率降低，直接测量 LC2002 输

出光束能量和 CCD 接收光束能量，计算可得整形系统能量转换效率可以分别达到 94.3% 和 92.2%，是可以满足整形要求的（见表 3）。

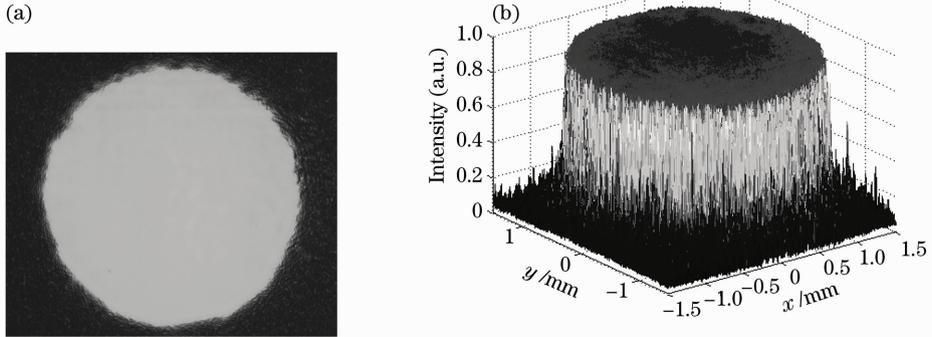


图 6 实验得到的圆光束。(a) CCD 接收到的输出圆光束；(b) 输出圆光束光强分布

Fig. 6 Circular output beam in experiment. (a) Output beam received by CCD; (b) intensity distribution

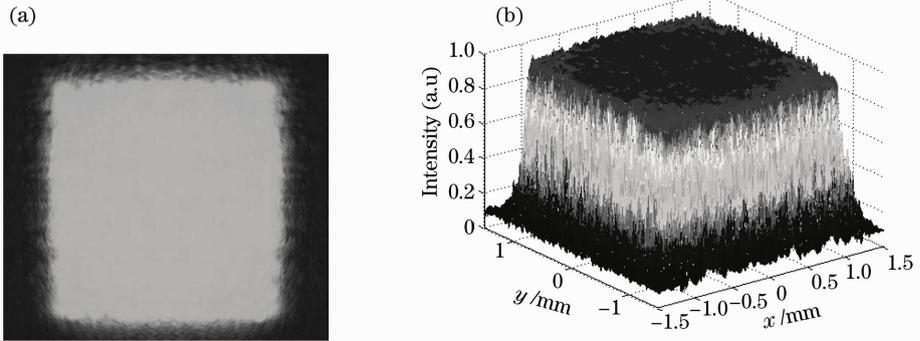


图 7 实验得到的矩形输出光束。(a) CCD 接收到的输出矩形光束；(b) 输出矩形光束光强分布

Fig. 7 Rectangle output beam in experiment. (a) Output beam received by CCD; (b) intensity distribution

表 3 利用 LC2002 光束整形结果

Table 3 Results of laser beam shaping using LC2002

Parameter	$\delta$	$e$	$\eta$	Energy conversion efficiency
Circular beam /%	2.8	2.3	92.8	94.3
Rectangle beam /%	4.3	4.6	90.4	92.2

## 5 结 论

利用计算机模拟混合算法得到高质量的平顶圆光束和矩形光束输出，根据 LC2002 相位调制曲线，将混合算法得到的相位函数量化为 8 阶相位编码，输入液晶空间光调制器对输入高斯光束进行整形，CCD 接收到光强均匀分布的圆光束和矩形光束。此方法明显降低了输出光束顶部的不均匀度，适用于对光束均匀性要求高的场合。缺点是受到液晶空间光调制器透射率较低的限制，使得输出光束的能量降低，采用高透射率的液晶空间光调制器即可提

高能量转换效率，与整形方法本身无关。所以，利用液晶空间光调制器的相位调制特性来实现激光束整形，实时可控、输出光束质量高是一种有效的激光束整形方法。

## 参 考 文 献

- Xin Tan, Benyuan Gu, Guozhen Yang *et al.*. Diffractive phase elements for beam shaping: a new design method [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(8): 1314 ~ 1320
- Li Ke, Shi Peng, Zhao Xiaobo *et al.*. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1972 ~ 1977  
李珂, 石鹏, 张晓波等. 双透镜系统光束整形元件的设计制作[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1972 ~ 1977
- Chen Kai, Li Pingxue, Chen Meng *et al.*. Design and analysis of surface parameters of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flattop beam [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 032201  
陈凯, 李平雪, 陈檬等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面镜系统设计和面形参数分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 032201
- Jin Guofan, Yang Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optics[M].

- Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 89 ~ 95  
 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 89 ~ 95
- 5 Huang Dajie, Fan Wei, Lin Zunqi. Spatial laser beam shaping using digital micromirror device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502008  
 黄大杰, 范薇, 林尊琪. 数字微镜器件用于光束空间整形[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502008
- 6 Li Sitao, Ye Jiaxiong. Fabrication and error analysis of binary optical elements[J]. *Optoelectronics Technology & Information*, 2000, **13**(5): 364 ~ 369  
 李思涛, 叶嘉雄. 二元光学元件的制作及其误差分析[J]. 光电技术与信息, 2000, **13**(5): 364 ~ 369
- 7 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatical 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
- 8 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
- 9 Li Bing. Research of Phase Only Liquid Crystal Spatial Light Modulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007  
 李冰. 纯相位液晶空间光调制器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007
- 10 A. Marquez, M. Yamauchi, J. A. Davis *et al.*. Phase measurements of a twisted nematic liquid crystal spatial light modulator with a common-path interferometer[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **190**(1-6): 129 ~ 133
- 11 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics[M]. Beijing: Peking University Press, 1984  
 赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984
- 12 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation of Hear Interaction [M]. Beijing: Science Press, 2002  
 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- 13 Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. New methods for improving the quality of laser beam shaping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0116002  
 于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(1): 0116002
- 14 Deng Xuegong, Li Yongping, Qiu Yue *et al.*. Phase-mixture algorithm applied to design of pure phase elements[J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **B4**(5): 1665 ~ 1668
- 15 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

栏目编辑: 谢婧