

文章编号: 0258-7025(2010)08-1972-06

双透镜系统光束整形元件的设计制作

李珂¹ 石鹏¹ 张晓波² 王声波¹ 黄坤¹ 李永平^{1,3}

(¹中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026; ²中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230026)

³安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 提出了一种基于双透镜系统的衍射光学元件(DOE)设计方法。在双透镜系统中,光束的传输和聚焦需要用两次菲涅耳衍射来表示,为了加快计算速度,将菲涅耳公式转化为包含快速傅里叶变换的形式来使传统的迭代算法满足不同的设计环境需求。用此设计方法,在理论上得到了超过 90% 的衍射效率,并对由此方法设计出的元件进行了加工制作和实验测试,测试结果显示,达到了预期的光束整形效果,对于更加复杂系统的 DOE 设计有一定的参考价值,对高功率激光系统可能存在潜在功用。

关键词 光学制造;衍射光学元件;光束整形;双透镜系统;迭代算法

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1972

Design and Preparation of Diffraction Optical Element in Dual Lens System

Li Ke¹ Shi Peng¹ Zhang Xiaobo² Wang Shengbo¹ Huang Kun¹ Li Yongping^{1,3}

¹Department of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

²National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A design method of diffractive optical elements (DOE) based on dual-lens system is proposed. In the dual-lens system, the transmission and focusing of the beam need to be expressed by twice Fresnel diffraction, in order to accelerate the computing speed, we converted the Fresnel formula to the form of which contains fast Fourier transform so that the traditional iterative algorithm can meet the different design environments. By using this design method, we get the diffraction efficiency more than 90% in theory, and processes the element and make the experimental test, the effect of beam shaping that we expected is achieved. It is worthwhile, for more complex system of DOE design there, and there may be potential function for the high-power laser systems.

Key words optical fabrication; diffractive optical element; beam shaping; dual lens; iterative algorithm

1 引 言

衍射光学元件(DOE)通常是在光学材料基片表面上刻蚀出特定的深浅不一的浮雕结构,当光束投射到 DOE 上时,振幅或相位受到调制,从而实现各种不同的光学功能。由于在实现光波变换上具有许多传统的光学元件难以具备的功能,且有利于促进光学系统实现微型化、阵列化和集成化,因此,近十几年来逐渐成为研究热点,并且应用广泛^[1~8]。

在光束整形方面,由于 DOE 具有高衍射效率和束匀滑等优点,常常被用于激光加工设备,如激光直写设备等。由于所设计的 DOE 是纯相位元件,只对光学信号的相位进行调制,而对实振幅并没有影响,因此这里只考虑元件对相位的影响,影响相位的因素可以是介质的折射率,也可以是传播距离。从工艺的角度来说,利用传播方向上的距离差异产生相位改变是比较容易实现的,借助表面微细加工工艺,可以很

收稿日期: 2009-08-24; 收到修改稿日期: 2009-12-04

作者简介: 李珂(1983—),女,博士研究生,主要从事衍射光学元件的计算设计方面的研究。

E-mail: like06@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李永平(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事衍射光学器件方面的研究。E-mail: liyp@ustc.edu.cn

方便地在材料基片表面制造浮雕结构的深度台阶分布,可用的加工方法很多,如化学反应法、离子束刻蚀法、激光束直写法等。这里用的是离子束刻蚀的方法,通过 N 次套刻,在基片表面产生 2^N 个深度的台阶,来实现光信号相位的调制。

在不同的光学设备中光束整形的前端环境会有不同,有时是单透镜,有时是透镜组^[9]。本文提出一种基于双透镜系统的设计方法并进行了加工制作和实验测试,较单透镜而言,双透镜有较高的设计自由度,同时光束在双透镜系统中传输的计算要复杂一些,迭代算法要进行相应的改进,测试结果表明达到了预期的效果,能够满足一定的工程需求。

2 设计原理

与单透镜相比,双透镜的优点体现在以下两个方面:从几何光学的角度来说,根据理想光具组的理论,这是一个成像系统,光具组的总焦距 $f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta}$,所以,通过改变透镜间的距离可以改变整个透镜系统的总焦距。由于焦点光斑的大小与总的焦距成正比关系,所以可以通过调整透镜间的距离来改变焦点光斑的大小,从而使系统具有更多的设计自由度。从衍射光学的角度来讲,相关的设计参数对衍射效率的影响的研究测试表明,如果设计中减小焦斑主瓣占输出计算窗口的比例,那么由衍射造成的 sinc^2 包络的零点可以更好地压制高级次衍射斑,从而减小由于高级次衍射斑所导致的能量损失^[10]。而在双透镜系统中,焦斑主瓣占输出计算窗口的比例,可以通过调节透镜间的距离和透镜与目标面的距离来轻松地实现。在计算中,设 $\delta_{\text{in}}, \delta_{\text{mid}}, \delta_{\text{out}}$ 为双透镜系统所要考察的 3 个面的采样间隔, $R_{\text{in}}, R_{\text{mid}}, R_{\text{out}}$ 为 3 个面上的计算输出窗口的大小, z_1 为两透镜间的距离, z_2 为后一个透镜距目标面的距离, N 为各个面上的采样点数。根据抽样定理,输出采样间隔 $\delta_{\text{mid}} = \frac{\lambda z_1}{R_{\text{in}}}$, $\delta_{\text{out}} = \frac{\lambda z_2}{R_{\text{mid}}}$, $R_{\text{mid}} = \delta_{\text{mid}} \cdot N$, $R_{\text{out}} = \delta_{\text{out}} \cdot N$, 推出 $R_{\text{out}} = \frac{z_2}{z_1} R_{\text{in}}$, 所以能够通过调节 z_1, z_2 来调节输出窗口 R_{out} 的大小,从而减小焦斑占输出窗口的比例,达到压制高级次衍射斑的目的,用以提高衍射效率。

2.1 算法原理

对于此类光束整形问题,目标是要找到一个合适的透射率函数 $T(x_i, y_i) = \exp[j\phi(x_i, y_i)]$ 来对入射光的波阵面进行调制以达到整形的目的,是一个相位恢复过程, Gerchberg-Saxton(G-S)算法是解决这一问题的传统方法以及由它改进而来的 Input-Output Algorithm(I-O)算法^[11], Phase Mixture Algorithm(PMA)算法^[12]等也都是常用的算法^[13], 由于 I-O 算法在迭代中具有较强的稳定性和收敛性,可用来完成整个迭代过程。

与单透镜系统不同,光束在双透镜系统中的传输不是一个可以直接用傅里叶变换来表示的夫琅禾费衍射过程,而是可以分为两次菲涅耳衍射来描述的,如图 1 所示, L_1, L_2 表示相距距离为 z_1 的两个透镜,焦距分别为 f_1 与 f_2 , DOE 位于 L_1 的前表面,目标面距 L_2 的距离为 z_2 ,入射光由左侧入射。由菲涅耳衍射理论可知,第一次菲涅耳衍射是由透镜 L_1 的前表面(记为入射面)到透镜 L_2 的前表面(记为中间面),第二次是由中间面到目标面,设 3 个面上的复振幅分别为 $u_i(x_i, y_i), u_m(x_m, y_m), u_o(x_o, y_o)$,两个透镜的二次相位因子分别为 ϕ_1, ϕ_2 ,则由入射面传播到中间面的过程中复振幅的变化由菲涅耳衍射公式表示为

$$u(x_m, y_m) = \frac{\exp(jkz_1)}{j\lambda z_1} \iint u(x_i, y_i) \exp(j\phi_1) \times \exp\left\{\frac{jk}{2z_1} [(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2]\right\} dx_i dy_i. \quad (1)$$

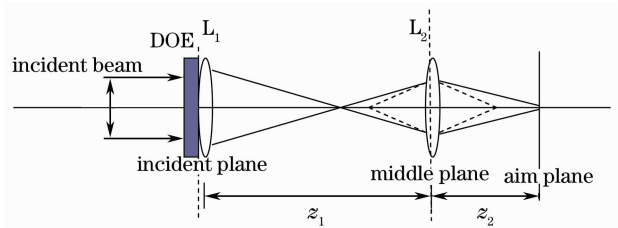


图 1 双透镜系统光束整形光路示意图

Fig. 1 Sketch of light path of beam shaping in dual lens system

将(1)式展开可以转化为由复振幅和一个二次相位因子乘积的快速傅里叶变换来表示,将积分号内展开可得

$$u(x_m, y_m) = \frac{\exp(jkz_1)}{j\lambda z_1} \exp\left[\frac{jk}{2z_1} (x_m^2 + y_m^2)\right] \iint u(x_i, y_i) \exp(j\phi_1) \exp\left[\frac{jk}{2z_1} (x_i^2 + y_i^2)\right] \times \exp\left[-\frac{2j\pi}{\lambda z_1} (x_i x_m + y_i y_m)\right] dx_i dy_i. \quad (2)$$

由于积分号前是常数,故(2)式复振幅可表示为

$$u(x_m, y_m) = \exp\left[\frac{jk}{2z_1}(x_m^2 + y_m^2)\right] \mathcal{F}_F \left\{ u(x_i, y_i) \exp(j\phi_1) \exp\left[\frac{jk}{2z_1}(x_i^2 + y_i^2)\right] \right\}, \quad (3)$$

式中 \mathcal{F}_F 表示快速傅里叶变换。同理,输出面上的复振幅可表示为

$$u(x_o, y_o) = \exp\left[\frac{jk}{2z_2}(x_o^2 + y_o^2)\right] \mathcal{F}_F \left\{ u(x_m, y_m) \exp(j\phi_2) \exp\left[\frac{jk}{2z_2}(x_m^2 + y_m^2)\right] \right\}. \quad (4)$$

由系统的光路传输过程,可得迭代过程为:入射光的复振幅经过两次菲涅耳传输,在输出面上将计算所得光强与理想输出光强按一定比例混合进行替换,然后经过两次菲涅耳衍射的逆变换,在输入面上提取相位,然后与入射光的振幅组合成复振幅进入下一次迭代,每次迭代过程中每个面上的复振幅依次为

$$\begin{aligned} u^{(k)}(x_m, y_m) &= \exp\left[\frac{jk}{2z_1}(x_m^2 + y_m^2)\right] \mathcal{F}_F \left\{ \sqrt{I_i} \cdot T^{(k)} \exp(j\phi_1) \exp\left[\frac{jk}{2z_1}(x_i^2 + y_i^2)\right] \right\}, \\ u^{(k)}(x_o, y_o) &= \exp\left[\frac{jk}{2z_2}(x_o^2 + y_o^2)\right] \mathcal{F}_F \left\{ u(x_m, y_m) \exp(j\phi_2) \exp\left[\frac{jk}{2z_2}(x_m^2 + y_m^2)\right] \right\}, \\ u'^{(k)}(x_o, y_o) &= \left[\sqrt{I_d} + \alpha \left| \sqrt{I_d} - |u^{(k)}(x_o, y_o)| \right| \right] \exp\{j\text{Arg}[u^{(k)}(x_o, y_o)]\}, \\ u^{\text{inverse}}(x_m, y_m) &= \mathcal{F}_F^{-1} \left\{ u'^{(k)}(x_o, y_o) \exp\left[-\frac{jk}{2z_2}(x_o^2 + y_o^2)\right] \right\} \exp(-j\phi_2) \exp\left[-\frac{jk}{2z_2}(x_m^2 + y_m^2)\right], \\ u^{\text{inverse}}(x_i, y_i) &= \mathcal{F}_F^{-1} \left\{ u^{\text{inverse}}(x_m, y_m) \exp\left[-\frac{jk}{2z_1}(x_m^2 + y_m^2)\right] \right\} \exp(-j\phi_1) \exp\left[-\frac{jk}{2z_1}(x_i^2 + y_i^2)\right], \\ T^{(k+1)} &= \exp\{j\text{Arg}[u^{(k+1)}(x_i, y_i)]\}, \\ k &= k + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 k 是迭代次数的标号, $\sqrt{I_i}$ 为入射光的振幅, $\sqrt{I_d}$ 为理想输出光强的振幅, α 为输出振幅反馈因子, Arg 表示取复振幅相位的操作。循环迭代流程如图 2 所示。

式中 I_{real} 代表实际输出光强, \bar{I} 代表焦斑光强的平均强度, f_{RMS} 表示焦斑的光强均匀性, 值越小说明均匀性越好;

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (7)$$

式中 I_{max} 与 I_{min} 分别为焦斑光强的极大、极小值, V 表示输出光斑强度峰谷值的悬殊程度;

$$D = \frac{\sum_{\text{top}} I_{\text{real}}}{\sum_{\text{total}} I_{\text{real}}}, \quad (8)$$

式中 D 表示输出光束中焦斑的能量占输出计算窗口全部能量的百分比。

3 设计结果

两透镜焦距分别为 $f_1 = 100 \text{ mm}$, $f_2 = 50 \text{ mm}$, 二者之间的距离为 $z_1 = 200 \text{ mm}$, 目标面距离第二个透镜的距离为 $z_2 = 100 \text{ mm}$, 入射光束波长是 1064 nm , 为直径 10 mm 的基模高斯光, 可以通过扩束后加光阑得到, 设计目标是得到 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的方形焦斑, 如图 3 所示。设计的 DOE 采样点数为 532×532 , 直径为 10 mm , 子单元的大小为 $20 \text{ }\mu\text{m}$, 纵向台阶数为 16, 迭代循环次数为 1000 次。

图 2 迭代算法流程图

Fig. 2 Flow chart of iterative algorithm

2.2 评价函数

为了对理论设计的结果以及制作出的 DOE 样品效果进行评定, 主要采用 3 个评价函数对输出光场的光束质量进行定量评价, 它们分别是: 焦斑光强均方差系数 f_{RMS} , 焦斑光强峰谷比系数 V 和衍射效率 D , 可以描述为

$$f_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{\text{top}} |I_{\text{real}} - \bar{I}|^2 / \bar{I}^2}{N - 1}}, \quad (6)$$

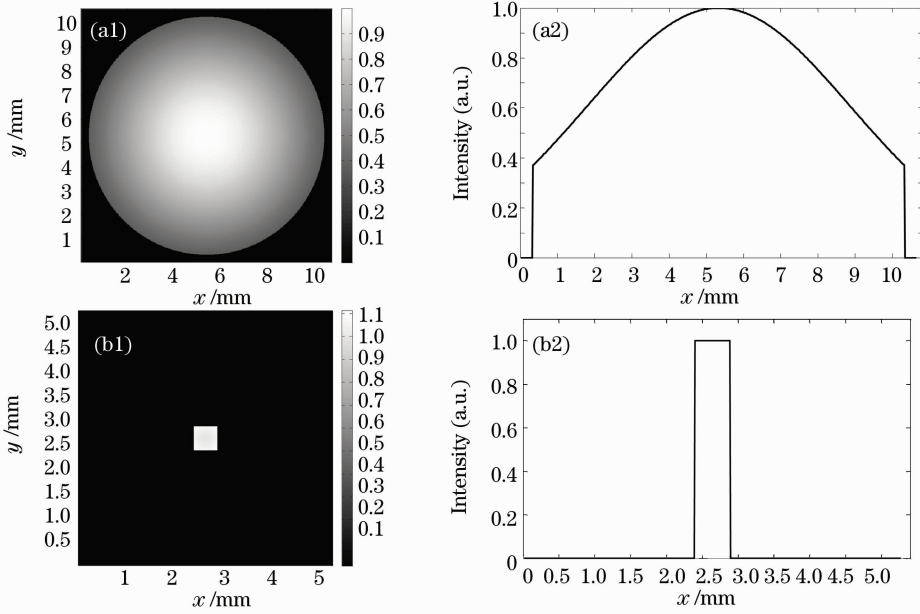


图 3 入射光和理想目标光斑示意图。(a1),(a2):入射光强分布图;(b1),(b2):理想目标光斑光强分布图

Fig. 3 Incident beam and ideal target light spot. (a1), (a2): intensity distribution of incidence beam;

(b1), (b2): intensity distribution of ideal target light spot

由第 2 节所述迭代方法和所选定的参数,经检验,迭代过程收敛,所得相位数据结果由图 4 所示,整个灰度范围包含了能够对入射光产生 0 到 2π 相位差的等距 16 个台阶。

这就是设计所得的 DOE 表面台阶结构的分布图,整个灰度范围包含了能够对入射光产生 $-\pi$ 到 π 相位差的等距 16 个台阶。

由此相位数据代入原来的光路,传输所得的目标光斑的光强分布如图 5 所示,理论整形结果及评价函数为:衍射效率 D 为 91.7%,顶部均方差 f_{RMS} 为 0.14691,峰谷对比度 V 为 0.45321,归一化后

的光强最大最小值分别为 1.5664 和 0.58937。

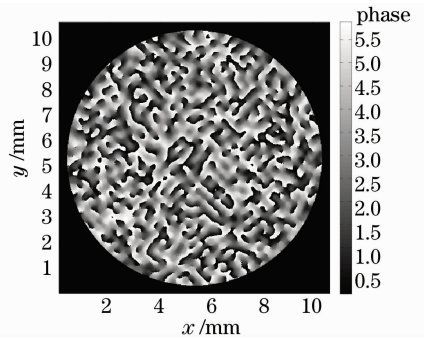


图 4 设计所得相位结构示意图

Fig. 4 Distribution of phase

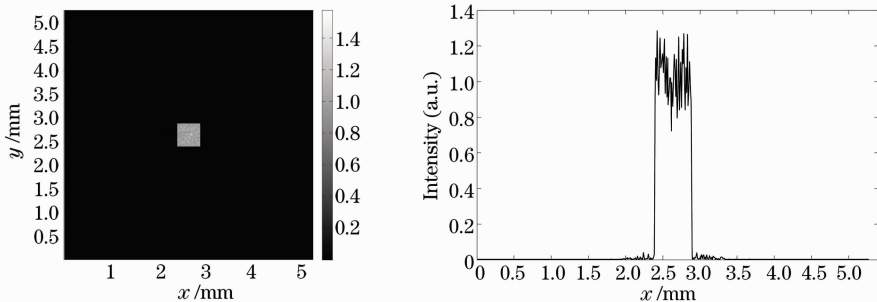


图 5 目标光斑的光强分布图

Fig. 5 Intensity distribution of actual target light spot

4 制作和测试分析

采用离子束掩膜套刻技术来实现其台阶相位结

构。经过掩模图形转移、离子束溅射刻蚀、去保护层 3 道工艺后,在材料基片表面形成了一套深度台阶分

布。在同一块基片上进行多次工艺重复可以制作出具有多台阶分布的衍射光学器件。由于 DOE 的制作在精度上要求较高,离子束的面型误差、离子束发散角等都会影响精确度^[14,15],相关的工艺改进可以克服这些不利因素^[15,16]。

4.1 整形测试结果

为了观察光斑整形效果,根据设计时的光路和参数对制作出的 DOE 进行粗略测试,采用的光源

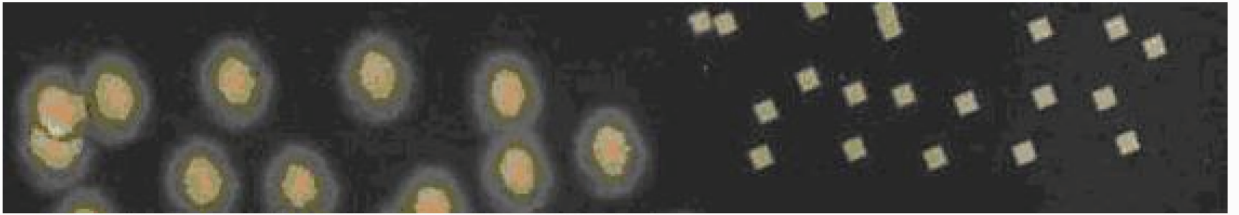


图 6 入射光和目标焦斑打在相纸上的效果

Fig. 6 Image of incident beam and target light spot

为了更加精确地观察焦斑形态以及光强分布,用 CCD 来接收光斑的成像,为了满足 CCD 对感光强度的限制,可采用功率很小的半导体激光器,而且还要加入若干衰减片来减小光强,半导体激光器的输出波长为 1064 nm 的连续光。图 7 为 CCD 采集到的焦斑图像。可以看出整形后的焦斑是很规则的

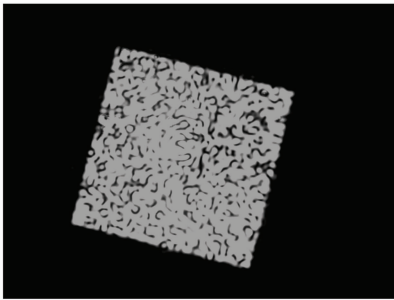


图 7 CCD 感光器接收到的整形后的光斑图像

Fig. 7 CCD image of target light spot after beam shaping

为调 Q YAG 激光器,脉宽为 10 ns,输出光波长为 1064 nm。使用的透镜与设计参数略有不同,不过透镜焦距会影响到光斑大小,不影响光强分布。考虑到 YAG 激光器功率较大,可用黑色烧蚀相纸来接收光斑,之后用扫描仪将相纸进行扫描,如图 6 所示。左边的光斑为直接由激光器发出的基模高斯光斑,右边的光斑为整形后的焦斑打在相纸上的结果,可以明显地看出正方形的轮廓。

正方形,边缘部分也比较明锐,基本达到预期的设计。

4.2 能量利用率测试结果

衍射效率是 DOE 设计中一个很重要的评价函数,通常都会要求在设计中达到比较高的衍射效率。衍射效率是焦斑的能量占输出计算窗口全部能量的百分比,计算中的输出窗口内不包含次级衍射斑,而这里所测量的能量利用率是焦斑能量占总入射光能量的比值,所以一定会比计算所得的衍射效率要小一些,接收装置为能量仪。受实验室条件所限,测试参数与结果如下:光源为 YAG 调 Q 激光器,波长 1064 nm,脉宽 10 ns,抽运电压 650 V。以 E_0 表示方形目标光斑能量值, E_1 表示撤除 DOE 时激光束直接聚焦的能量值,则能量利用率就是二者的比值,如表 1 所示。根据表中数据实验测得的能量利用率约为 78.18%。

表 1 光斑能量测试数据

Table 1 Data of energy of light spot

Energy	1	2	3	4	5	Average	$(E_0/E_1)/\%$
E_0	0.3144	0.3154	0.3134	0.3124	0.319	0.31492	78.18
E_1	0.402	0.404	0.4	0.402	0.406	0.4028	

根据以往的 DOE 制作经验,这个结果属于正常范围。能量损失大致由以下几个方面造成:1)衍射本身造成的能量损失,这是不可避免的;2)元件自身的吸收和反射也会损失一部分能量;3)系统误差造成,有光路调整的不够精确或仪器本身的灵敏度和精确度等;4)实验环境限制,比如室内杂散光等。如果要改善能量利用率,可以考虑将元件表面镀膜

做增透处理,以减少反射的损失,是有效提高能量利用率的途径之一。

5 结 论

由于衍射光学元件的应用非常广泛,对于不同的应用环境和设计要求要采取相应的设计方法,本文是在标量衍射范围内,针对双透镜系统的衍射光

学元件的设计制作。将菲涅耳衍射公式转化为包含快速傅里叶变换的表达式,就能够比较快捷地完成迭代过程,从理论设计结果和实验测试结果来看,都基本符合工程需要,对于其他形式的透镜组系统乃至更加复杂系统的 DOE 设计也有一定的参考价值。由于双透镜系统具有较高的设计自由度,对压制旁瓣、提高衍射效率能够起到一定的作用,故此方案对高功率激光系统可能存在潜在功用。

参 考 文 献

- Josip Vukusic, Jrgen Bengtsson, Marco Ghisoni *et al.*. Fabrication and characterization of diffractive optical elements in InP for monolithic integration with surface-emitting components [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(3): 398~401
- Yutaka Kuroiwa, Nobuhito Takeshima, Yoshihiro Narita *et al.*. Arbitrary micropatterning method in femtosecond laser microprocessing using diffractive optical elements [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(9): 1908~1915
- Mikael Karlsson, F. Nikolajeff. Fabrication and evaluation of a diamond diffractive fan-out element for high power lasers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(3): 191~198
- X. G. Deng, Y. P. Li, D. Y. Fan *et al.*. Pure-phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profile generations of extremely high order [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 1963~1965
- C. Sun, C. Liu. Ultrasmall focusing spot with a long depth of focus based on polarization and phase modulation [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2): 99~101
- Fu Yongqi, Ngoi Kok Ann Bryan, Ong Shing. Diffractive optical elements with continuous relief fabricated by focused ion beam for monomode fiber coupling [J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(3): 141~148
- Liu Yuling, Sui Chenghua, Li Bo. Vector analysis of focusing performance of multilevel circular diffractive microlens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1124~1130
刘玉玲,隋成华,李 博.多台阶圆形衍射微透镜聚焦性能的矢量分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1124~1130
- Jin Zhanlei, Tan Jiubin, Zhang Shan *et al.*. Research of linewidth stabilizing method during defocusing laser direct writing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1730~1734
金占雷,谭久彬,张 山等.离焦激光直写的线宽稳定方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1730~1734
- Wang Duoshu, Luo Chongtai, Chen Tao *et al.*. Micro-structure fabrication with circular laser writing technology [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(7): 525~528
王多书,罗崇泰,陈 涛等.极坐标激光直写技术制作微结构 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(7): 525~528
- Cao Guowei, Liu Qiang, Shi Peng *et al.*. Influence of design parameters of diffractive optical elements on diffraction efficiency in beam shaping [J]. *High Power Laser and Patical Beams*, 2010, **22**(2): 369~373
曹国威,刘 强,石 鹏等.衍射光学元件设计参数对束匀滑衍射效率的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(2): 369~373
- Li Tao, Fu Shaojun, Wang Wei *et al.*. A hybrid algorithm applied to the design of diffractive optical elements used in uniform illumination [J]. *Chinese J. Computational Physics*, 2002, **19**(1): 76~80
李 涛,付绍军,王 炜等.一种用于均匀照明的衍射光学元件设计的混合算法 [J]. *计算物理*, 2002, **19**(1): 76~80
- J. R. Fienup. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms [J]. *Opt. Eng.*, 1980, **19**(3): 297~305
- Guo Chengshan, Li Chuantao, Hong Zhengping *et al.*. Suitability of different sampling methods for digital simulations of the optical diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 442~446
国承山,李传涛,洪正平等.光衍射数值模拟中不同抽样方法的适用性分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 442~446
- Liu Qiang, Zhang Xiaobo, Wu Rong *et al.*. Influence of fabrication error in ion beam etching on diffractive optical element [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 50~54
刘 强,张晓波,邬 融等.离子束刻蚀工艺误差对 DOE 器件的影响 [J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 50~54
- Meng Xiangfeng, Li Lifeng. Methods for increasing sidewall steepness of reactive ion-beam etched, sub-micrometer-period gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 189~193
孟祥峰,李立峰.提高离子束刻蚀亚微米光栅侧壁陡直度的方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 189~193
- Liu Qiang, Wu Rong, Zhang Xiaobo *et al.*. Technical optimization of multi-level diffractive optical elements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1165~1168
刘 强,邬 融,张晓波等.多台阶衍射光学元件的工艺优化 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1165~1168