

文章编号 1004-924X(2001)01-00014-05

激光直写系统焦斑整形的研究

李凤友, 李红军, 卢振武, 廖江红

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对激光直写光刻系统设计整形衍射光学元件(DOE), 对写入焦斑的整形进行了研究。提出对不同焦距写入物镜下的焦斑, 利用同一个DOE加以整形的方法。模拟表明: 整形后焦斑的面形和边缘显著改善, 衍射效率高于实用指标, 提供一种改善系统分辨能力的有效途径。

关键词: 激光直写; 光束整形; DOE

中图分类号: TN 305.7 **文献标识码:** A

1 引言

激光直写是新兴的制作微光学元件和超大规模集成电路掩模的工艺, 既可以在光刻胶上直接刻出连续的三维浮雕结构^[1], 也可以用于加工掩模^[2]。激光直接写入系统因其具有性能稳定, 造价便宜, 结构简单, 使用方便的特点而得到特别关注。但由于激光直写系统分辨率比电子束直写低, 应用受到限制。激光直写系统分辨能力提高, 可以扩大其应用范围, 增强其在衍射光学器件制作方面的优势。

在亚微米光刻中, 邻近效应是制约激光直写系统分辨能力的一个重要因素, 激光直写光学邻近效应的校正有几种方法^[3], 1) 缩小激光束的焦斑尺寸和改善焦斑的光强分布; 2) 控制直写过程中的曝光量; 3) 抗蚀剂配套技术。其中缩小激光束的焦斑尺寸和改善焦斑的光强分布是减少邻近畸变的最直接方法。

激光直接光刻和离子刻蚀技术结合制作多台阶衍射光学元件中^[4], 由于焦斑光强一般类似高斯分布, 所以在基片上的光刻胶经激光直接写入光刻、显影后, 常常存在侧壁角, 刻蚀出的台阶也就会出现斜坡。经过多次套刻(包括激光直写光刻)后, 由光刻引起的积累误差加大, 降低了元件的衍射效率。要解决上述问题, 较理想的激光直写焦斑应是陡边、极小的平顶。如何获得极小陡边的平顶激光焦斑是非常重要的课题。

本文针对中科院长春光机所自行研制的四轴激光直接写入设备光学系统, 利用衍射光学元件

(DOE)对写入激光焦斑进行整形研究, 提出在不同相对孔径物镜下仅用一块DOE对写入焦斑的整形情况, 获得较理想的焦斑。

2 基本原理

光束整形的光学系统一般需要两个纯位相型的衍射光学元件, 一个放在入射面调制光束位相以得到均匀的光强分布, 另一个元件置于输出面以获得预期的位相分布。激光直写设备中光束整形是为了获得远场衍射强度均匀的微小焦斑, 只对输出光束的光强分布有要求, 故不再需要第二个DOE。整形的光学系统, 它由一个衍射光学元件和傅立叶变换透镜组成, DOE置于输入面, 通过调制入射光束的位相, 在其傅立叶频谱面得到预期的光斑分布。

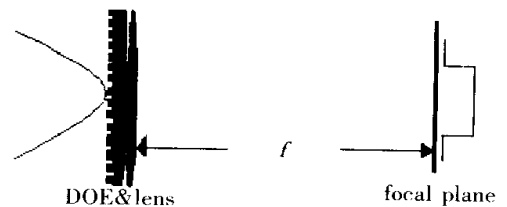


Fig 1 Beam shaping optical system

激光一般为圆对称高斯光束, 等相面曲率半径相对光斑孔径很大, 可视为平面波, 激光高斯光束振幅分布为:

$$A(r) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

位相型衍射光学元件 DOE 置于透镜前, 位相分布为 $\mathcal{Q}(r)$, 则物面复振幅为:

$$g(r) = A(r) \exp[i\mathcal{Q}(r)] = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right) \exp[i\mathcal{Q}(r)] \quad (2)$$

设 $G(\rho)$ 为焦面振幅分布, 由旋转对称的傅立叶变换(汉克尔变换)可推得:

$$G(\rho) = \frac{\exp[i\pi\rho^2/\lambda f]}{i\lambda f} \int_0^\infty g(r) \cdot 2\pi r J_0(2\pi r \rho/\lambda f) dr \quad (3)$$

$$g(r) = \frac{1}{i\lambda f} \exp[i\pi\rho^2/\lambda f] G(\rho) \cdot 2\pi\rho J_0(2\pi r \rho/\lambda f) d\rho \quad (4)$$

式中 $J_0(2\pi r \rho/\lambda f)$ 为第一类零阶贝塞尔函数, λ 为激光波长. 由式(2)和(3)可知, 要想获得焦面光斑均匀平顶分布即 $|G(\rho)| = G_0$, 就需要求得 DOE 的位相分布 $\mathcal{Q}(r)$, G_0 可由帕塞瓦尔(Parseval)定理^[5]求得. 求解 $\mathcal{Q}(r)$ 的问题也就是位相恢复问题, 需要利用式(3)和式(4)的迭代关系求出 $\mathcal{Q}(r)$.

常见的相位恢复算法(Gerchberg-Saxton 简称 GS 算法)是采用多次迭代求解, 每一次循环均由下列四个基本步骤组成^[6]:

- (1) 对已知实振幅的物面波函数的位相赋予初值, 然后进行傅立叶变换.
- (2) 用所要求的实振幅取代傅立叶变换后的谱面波函数的振幅, 与其位相组成新的谱面波函数.
- (3) 对新谱面波函数进行傅立叶逆变换, 得到新物面波函数.
- (4) 用已知的实振幅取代新物面波函数的振幅, 位相保持不变, 组成物面波函数带入下一次循环.

我们对 ST 算法^[7]加以修改, 使之收敛速度和稳定性得到改善, 用于 DOE 的位相恢复. 把 ST 算法中第二步的 $G_k^{(i)}$ 改变为:

$$G_k^{(i)} = \begin{cases} |G_k^{(i)}| \left[\frac{p_k^{(i)}}{p_k^{(i)}}\right]^\beta \exp[i\mathcal{Q}_k^{(i)}] & \text{for } p_k^{(i)} \neq 0 \\ 0 & \text{for } p_k^{(i)} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 β 为经验常数 ($0 < \beta < 1$), 通过调整 β 的大小可以控制迭代过程的振荡幅度, 通过引入 β 可以更好地控制下一次迭代的面形. 可见当 $\beta = 0$ 时, 该算法变为 GS 算法; $\beta = 1$ 时, 该算法变为

ST 算法. 采用迭代算法恢复 DOE 的位相 $\mathcal{Q}(r)$, 恰当选择初始位相可以节省运算时间. 由几何光学法求解 DOE 的初始位相 $\mathcal{Q}(r)$ 为:

$$\mathcal{Q}(r) = \frac{2\pi}{\lambda f} \left\{ \frac{\omega_0}{\sqrt{2G}} [1 - \exp(-2r^2/\omega_0^2)]^{1/2} - r \right\} dr \quad (6)$$

由于本系统透镜引起的附加位相为 $\mathcal{Q} = -\pi r^2/\lambda f$, 应从(6)式中减去, 则有:

$$\mathcal{Q}(r) = \frac{2\pi\omega_0}{\sqrt{2G\lambda f_0}} \left[1 - \exp(-2r^2/\omega_0^2) \right]^{1/2} dr \quad (7)$$

上式为 DOE 的初始位相分布, 把(7)、(2)式带入(3)式, 利用(4)式按下面程序流程优化设计 DOE.

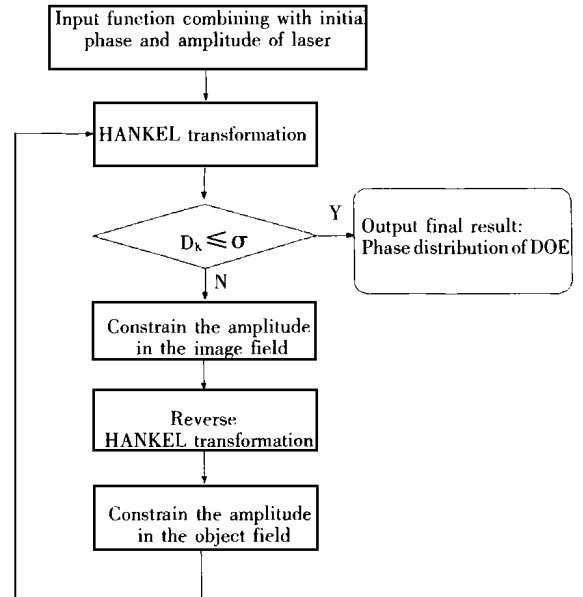


Fig 2 Flow chart for designing DOE

3 模拟结果分析与讨论

衍射效率是衡量二元光学元件性能的重要指标. 引入衍射效率:

$$\eta = \frac{\Delta s_\rho \cdot \int |G(\rho_i)|^2}{\Delta s_r \cdot \int |g(r_i)|^2} \quad (8)$$

式中 Δs_ρ , Δs_r 分别是谱、物面上的采样面元, (8)式的物理意义为: 整形后的光斑能量占入射到 DOE 内总能量的比例, 比例越大, 说明 DOE 的衍射效率越高, 光能利用率越高. 为了评价后焦面上的光斑整形效果引入另一个参数边缘陡度 S , 用以表征光束边缘强度的变化率:

$$S = \omega_0/\omega \quad (9)$$

式中 ω_k 为光强降至 $I_{\alpha} = I_{ave}/2$ 的位置离开中心的距离; ω 为光束半径, 即光强降至边缘强度 $I_R = I_{ave}/e^2$ 的位置离开中心的距离, I_{ave} 为均匀区平均强度。

激光直接写入设备选用美国 Liconix 公司的 He-Cd 激光器, 主要技术参数如下: 输出功率 150mW, 模式 TEM₀₀, 波长 442.0nm, 束腰直径 1.5mm, 光束发散角 < 0.5mrad。激光束经准直扩束后直径为 15mm, 可近似为平面波。按照写入焦斑半径为 10 μ m、5 μ m、2 μ m、1 μ m 的要求, 光刻头的写入物镜可调换, 写入物镜焦距为 100mm、50mm、20mm、10mm, 要求整形后衍射效率 60% 以上, 面形偏差在 6% 以内。具体设计数据为: DOE 半径 $r_0 = 7.5$ mm, 输入光束半径 $w_0 = 7.5$ mm, $\lambda = 442.0$ nm, 经验常数 $\beta = 0.5$ 。

首先讨论写入物镜不变, 输出焦斑变化的情况, 进行计算模拟(以 100mm 为例), 模拟结果如表 1 所示, 图 3 为整形后焦斑强度分布, 为了探讨整形效果与位相的关系, 图 4 为有代表性的 DOE 位相分布。

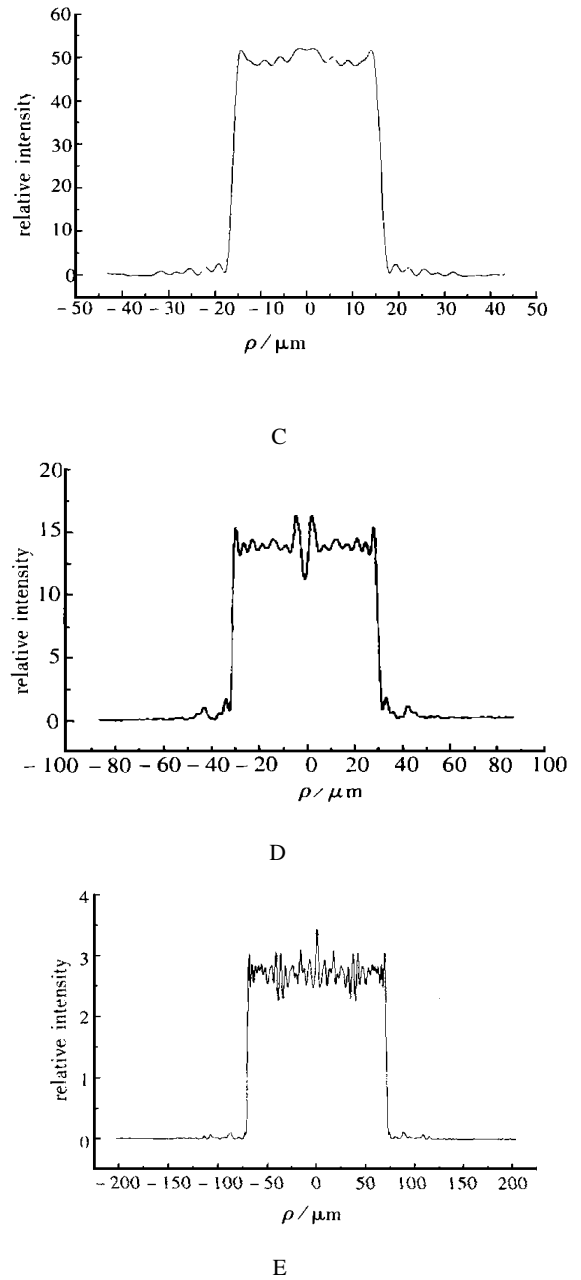
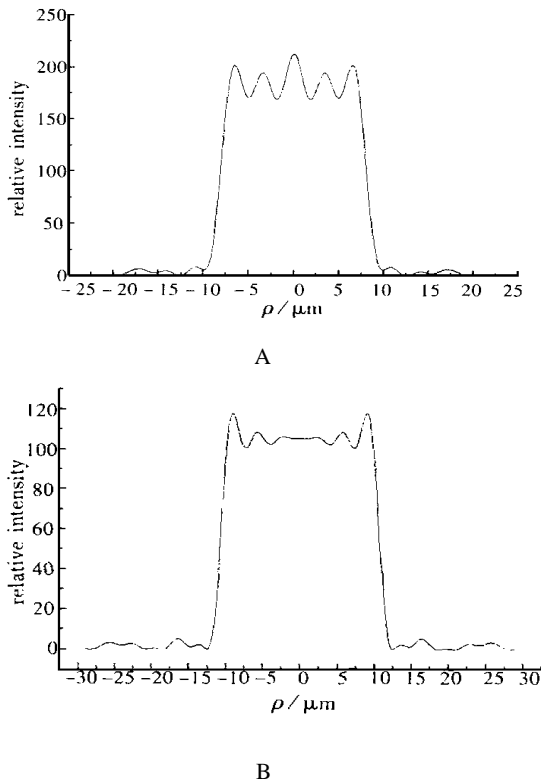
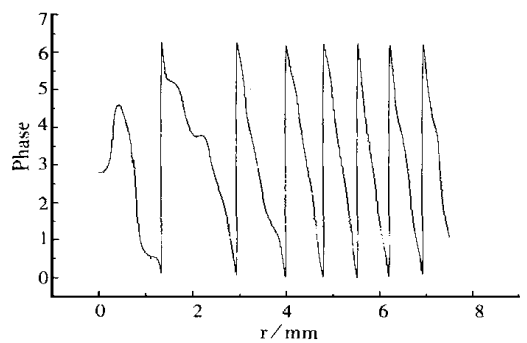


Fig. 3 Intensity distribution of the shaped spot(A, B, C, D, E correspond to the diameter of 15, 20, 30, 60, 140 μ m)



A

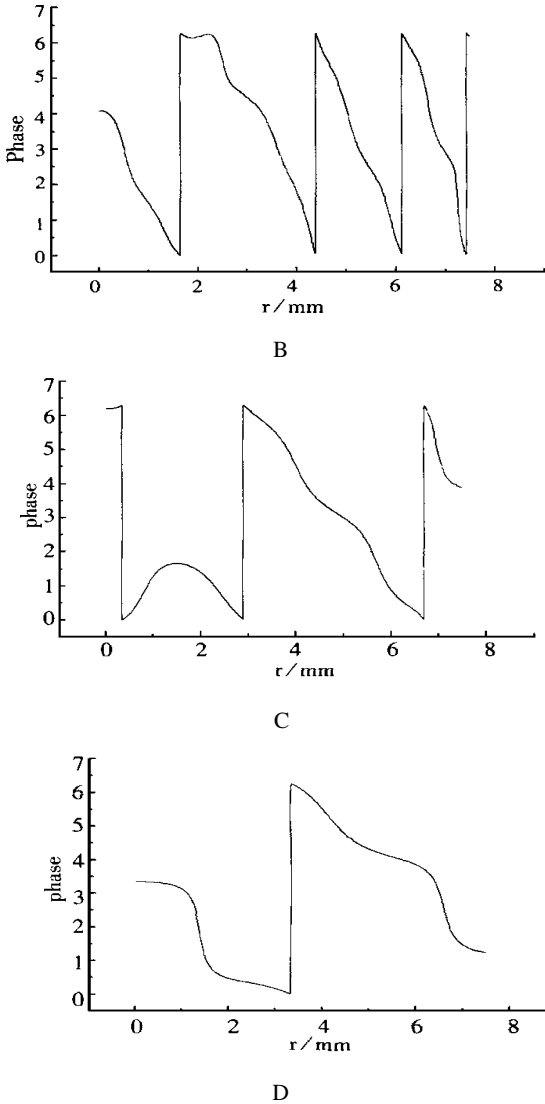


Fig. 4 Phase distribution of DOE (A, B, C, D correspond to the spot diameter of 140, 60, 30, 20 μ m)

Table 1 Simulated results of data

Radius of spot ρ (μ m)	focus f (mm)	error D	efficiency η	edge steep S	figure (3)
7.5	100	5.61%	73.88%	80.2%	A
10	100	2.71%	76.06%	85.8%	B
15	100	2.16%	79.29%	89.7%	C
30	100	3.17%	88.32%	95.4%	D
70	100	5.01%	94.89%	97.7%	E

从上述模拟结果可以看到, 对于同一个写入物镜而言, 随着整形后输出焦斑尺寸减小时, 边缘陡度变差, 旁瓣变大, 衍射效率降低, 均匀区强度增大。焦斑面形越差, 旁瓣越小, 衍射效率增高; 反之, 面形越好, 旁瓣越大, 衍射效率降低。当输出焦斑很小时, 焦斑都比设计值大一些, 这是在设计 DOE 中假设焦斑边缘陡度为 100% 的缘故。

由图 4 中 DOE 位相分布和表 1 中数据比较可知, 随着输出焦斑的减小, DOE 的环带周期数也减少, 面形和边缘只与每个环带内位相分布有关, 衍射效率与环带数和环带内位相分布都有关。

需要说明的是图中 DOE 的位相分布是以 2π 为周期进行模除后的结果, 这是为了利用标准二元光学工艺制作元件。若用激光直接写入设备制作, 可以不用 2π 模除, 获得连续位相, 但是基片上浮雕的深度明显增加, 这需要采用离子束深刻蚀技术。

其次, 只改变光刻写入物镜的焦距, 其它条件不变, 进行光斑整形研究, 模拟结果如表 2 所示。

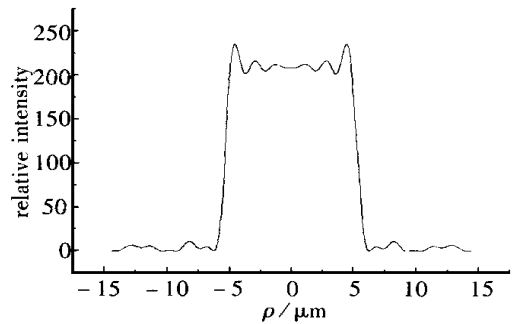
Table 2 Simulated results of data

Radius of spot ρ (μ m)	focus f (mm)	error D	efficiency η	edge steep S	figure
10	100	2.71%	76.06%	85.8%	fig3 B
5	50	2.70%	76.03%	85.4%	fig5 A
2	20	2.72%	76.01%	85.6%	fig5 B
1	10	2.94%	76.08%	85.4%	fig5 C

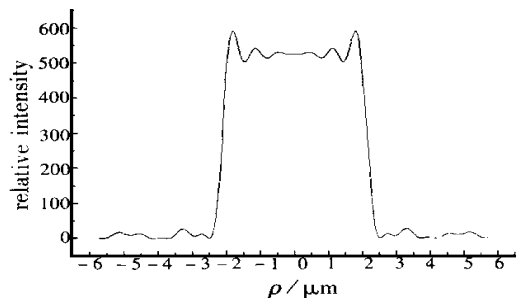
从表 2 数据结果和图 5, 6 比较中可以得出以下结论:

(1) 当 DOE 和写入物镜的孔径不变, 只改变物镜焦距, 整形后焦斑大小也以相同比例改变时, 除了 $f = 10\text{mm}$ 的面形相差稍大一些 (0.2%) 之外, 整形效果 (衍射效率, 面形偏差, 边缘陡度) 几乎相同, 只是随着写入物镜焦距和输出焦斑减小, 均匀区的强度随之增大。

(2) 由图 6 可以看到, 四种焦距写入物镜下整形所用的 DOE 位相分布完全一致。所以在整个光学系统不需任何修改的情况下, 调换不同焦距的写入物镜, 用同一个 DOE 对光斑整形, 相应得到所要求的焦斑, 且整形效果较理想。若需要更小的写入焦斑, 可更换相应焦距的写入物镜。



A



B

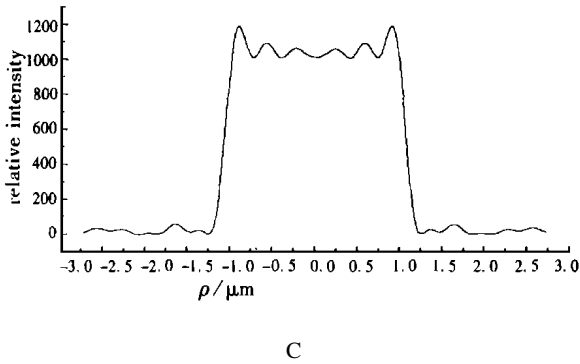


Fig 5 Intensity distribution of the shaped spot with the various objectives (A, B, C correspond to $f = 50\text{mm}$, 20mm and 10mm , with the focused spot of about $10\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$ and $2\mu\text{m}$ diameter in turn)

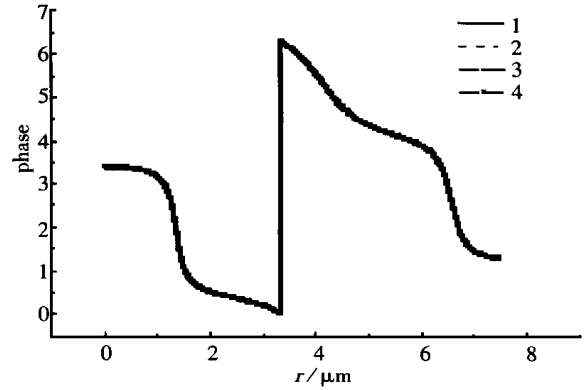


Fig 6 Phase distribution of DOE (1, 2, 3, 4 correspond to $f = 100\text{mm}$, 50mm , 20mm , 10mm)

4 结 论

本文利用修改后的 ST 算法优化设计了 DOE, 对激光直写光刻系统的写入焦斑整形进行了模拟, 讨论了整形后焦斑面形、边缘和衍射效率与 DOE 位相分布的关系。从两方面计算模拟中

可以得出: 若想得到整形后边缘很陡且又非常小的焦斑, 在入射焦斑孔径不变的情况下, 可通过减小写入物镜焦距途径来实现, 并且不用更换 DOE。写入焦斑的改善, 能够提高激光直写光刻系统的分辨率, 增强其应用优势。计算模拟表明, 利用 DOE 对焦斑整形, 是提高直写系统分辨能力一种有效的方法。

参考文献:

- [1] Gale Michael T, Rossi Markus, Pedersen Jorn et al Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists[J]. Opt Eng 1994, 33(11): 3556- 3566
- [2] Salgueiro José Ramón, Román Juan Félix, Moreno Vicente System for laser writing to lithograph mask for integrated optics[J]. Opt Eng 1998, 37(4): 1115- 1123
- [3] 杜惊雷, 黄奇忠, 姚军, 等 激光直写邻近效应的校正[J]. 光学学报, 1999, 19(7): 953- 957
- [4] 杜春雷, 林大键, 冯伯儒, 等 激光直接光刻制作微透镜列阵的方法研究[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1194- 1196
- [5] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. McGraw-Hill, San Francisco, CA. : McGraw-Hill, 1968
- [6] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik 1972, 35(2): 237- 246
- [7] Tao Sang, Liao Jianghong, Lu Zhenwu et al A new Fourier iterative algorithm for the design of phase-only diffractive optical element used in laser beam shaping[J]. Chinese Journal of Lasers, 1996, B5(5): 451- 460

Focused spot shaping in laser writing system

LI Feng-you, LI Hong-jun, LU Zhen-wu, LIAO Jiang-hong

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: The diffractive optical elements (DOE) with shaping the focused spot for laser writing system are designed, while discussing their performances for shaping laser writing spot. An efficient way of using a DOE to shape the laser writing spot under the objectives with various focal lengths is presented. The simulating results indicate that the spot-shaped sizes is only more twice than the diffraction limited spot sizes under this system, its diffraction efficiency is about 71.38% and the edges of the uniform area become dramatically sharper than the result without DOE.

Key words: laser writing; beam shaping; DOE

作者简介: 李凤友(1968-), 男, 吉林人, 应用光学国家重点实验室在职博士生, 硕士论文获宝钢教育基金奖。主要研究方向为二元光学、衍射光学元件设计与制作、非球面检测、微细加工技术。