

文章编号: 0258-7025(2008)08-1165-04

# 多台阶衍射光学元件的工艺优化

刘 强<sup>1</sup> 邬 融<sup>1</sup> 张晓波<sup>3</sup> 李永平<sup>1,2</sup> 田杨超<sup>3</sup>

(中国科学技术大学<sup>1</sup> 物理系,<sup>2</sup> 中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026)  
<sup>3</sup> 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230027

**摘要** 通过对多台阶衍射光学元件(MDOE)刻蚀工艺中的误差分析,提出了一个反映整体刻蚀误差的参数——误差偏度。重点研究了误差偏度的变化对多台阶衍射光学元件光束整形效果的影响,发现在误差偏度曲线中存在一个能使刻蚀误差影响减弱的平坦区间。提出了在刻蚀工艺上以控制刻蚀深度来改善多台阶衍射光学元件器件实际照明效果的一种方法。实验结果表明,经过工艺优化后的 MDOE 的光场参数峰值(PV)下降了近 30%。

**关键词** 衍射;离子束刻蚀;误差偏度;光束整形

**中图分类号** TL 632;O 436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1165

## Technical Optimization of Multi-Level Diffractive Optical Elements

Liu Qiang<sup>1</sup> Wu Rong<sup>1</sup> Zhang Xiaobo<sup>3</sup> Li Yongping<sup>1,2</sup> Tian Yangchao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup> National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

**Abstract** From the error analysis of multi-level diffractive optical elements (MDOE) in etching process, the parameter of error skewness was suggested to reflect the overall etching error. The variation of error skewness versus the beam shaping effect of diffractive optical elements is investigated, and a flat interval which can reduce the impact of etching error existed in the curve of error skewness. According to these curves, a technical method for improving the factual illumination quality of MDOE was proposed by controlling etching depth. The experimental results show that the peak value (PV) of the optical field parameter reduces about 30% after the technical optimization.

**Key words** diffraction; ion etching; error skewness; beam shaping

## 1 引 言

近年来,均匀照明在很多领域内都是一个被关注的热点研究对象<sup>[1,2]</sup>。尤其是在惯性约束核聚变(ICF)中,在目标靶场产生一个均匀能量分布的光场是一个非常重要的课题<sup>[3,4]</sup>。在解决这一问题的途径上,衍射光学器件(DOE)已被广泛地加以利用<sup>[5~8]</sup>。

在研究过程中,多台阶衍射光学元件(MDOE)具有易加工的特点,近年来已成为研究重点。在理论设计中,具有随机相位分布的 MDOE 的靶场光强

分布有比较高的均匀性和能量利用率<sup>[9]</sup>,但由于刻蚀工艺误差的影响,这些指标在实际测量中会有一些的偏差甚至失真。

本文着重分析了刻蚀误差的整体分布,提出以误差偏度参数描述整体刻蚀深度的变化。通过分析误差偏度与靶场照明参数峰值(PV)的关系,提出了以改变整体刻蚀深度来弥补刻蚀系统误差带来的影响的工艺优化方法,并且制作了两块在相同刻蚀环境下不同刻蚀深度的 MDOE 样品。

收稿日期:2007-10-11;收到修改稿日期:2007-12-17

基金项目:国家 863-804 课题资助项目。

作者简介:刘 强(1980—),男,河北人,博士研究生,主要从事衍射光学器件的设计与应用研究工作。

E-mail:qliu6@mail.ustc.edu.cn

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

## 2 理论方法

在理论上,利用改良 IO 算法和模拟退火优化算法,可以得到 MDOE 透射函数的相位分布  $T(x_i, y_i) = \exp[i\phi(x_i, y_i)]^{[10]}$ ,  $\phi(x_i, y_i)$  为相位。将具有相位分布的 MDOE 放置到 ICF 驱动光路后,通过夫琅禾费衍射理论可计算得到靶面的光场分布为<sup>[11]</sup>

$$U_0(x_0, y_0) = \frac{1}{\lambda f} \iint U_i(x_i, y_i) T(x_i, y_i) \times \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_0 x_i + y_0 y_i)\right] dx_i dy_i, \quad (1)$$

式中  $U_i(x_i, y_i)$  为入射光束的复振幅,  $\lambda$  为波长,  $f$  为系统主透镜焦距。

在工艺中实现 MDOE 相位台阶是由离子束溅射刻蚀工艺来完成的。通过  $N$  次套刻,在光学介质的表面产生高低不一的  $2^N$  个深度的台阶  $h$ ,当 ICF 中所使用的激光波长为  $\lambda$  时,由于光学介质的介质常数  $n$  与空气不同,在这些深度台阶之间就会产生相位差

$$\Delta\phi = 2\pi(n-1)h/\lambda. \quad (2)$$

所有这些  $\Delta\phi$  组合在一起就成为 MDOE 的相位分布函数  $T(x_i, y_i)$ 。在本文的研究以及工艺中,主要使用的是 K9 玻璃材料 ( $n \approx 1.53$ ),  $\lambda = 1053 \text{ nm}$ 。

在工艺上,刻蚀误差是不可避免的,在研究过程中,把误差主要分成两个部分进行考虑。正态随机误差主要来自刻蚀环境的随机扰动,如真空室气体浓度、阴极电流强度等。通常情况下这部分的扰动非常小,且符合正态分布的规律,并不会对 MDOE 的衍射光场结果产生明显的影响。系统刻蚀误差主要来源于离子源强度在径向分布的不均匀。如图 1 所示,在刻蚀工艺中,样品随承载台绕离子束中轴匀速旋转,这样就会带来一种环状分布的系统刻蚀误差。当系统误差呈现类球面分布时,其产生的附加相位差使聚焦光束在靶场中心形成一个较明显的毛刺亮点,严重地破坏了靶场照明的均匀性。

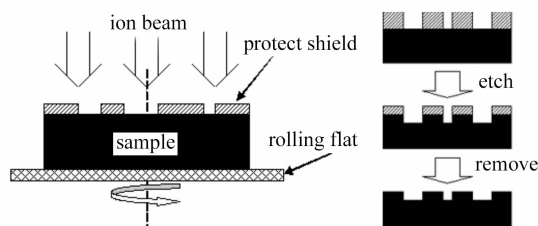


图 1 离子束刻蚀工艺示意图

Fig. 1 Schematic of ion etching process

借助于误差分析中的误差偏度,提出了一个用以反映整体误差分布的参量

$$g = 100 \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{h_0 - h_i}{h_0} \right)^3 \right]^{1/3}, \quad (3)$$

式中  $h_0$  为套刻台阶的标准刻蚀深度,第一台阶为  $1040 \text{ nm}$ ,随后每台阶逐次减半;  $h_i$  为设计单元在套刻时的实际刻蚀深度;  $m$  为刻蚀单元数量。此外,用 PV 值衡量衍射场的整体均匀性

$$PV = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (4)$$

式中  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  分别为有效照明区域内的光强极大与极小值。

在工艺上,离子束刻蚀的平均速率对于相同的刻蚀环境和样品可以近似认为是一样的,通过对总刻蚀时间的控制,可以改变实际刻蚀的整体深度,从而改变  $g$  值。通过对不同误差分布的多次模拟计算发现,当误差偏度系数随着刻蚀时间变化到  $\pm 3\%$  时,靶面光场的 PV 值都具有一个比较平坦的谷底,这时均匀照明效果比较好。以此为根据,可以总结出一个对 MDOE 的工艺优化方法。

首先,根据离子源强度分布拟合一个最接近真实情况的刻蚀误差分布模型,在此模型下利用(3)式计算刻蚀深度与误差偏度的关系曲线;然后利用这个关系曲线获得一个使误差偏度系数在  $\pm 3\%$  的最优刻蚀深度区间;最后通过调整刻蚀时间达到工艺优化的目的。

## 3 模拟分析

在口径为  $70 \text{ mm}$  的 16 台阶 MDOE 工艺中,通过区间采样和拟合获得了离子源的强度分布情况如图 2 所示。

图 2(a)为离子源强度分别在  $x$  和  $y$  方向的拟合。由于刻蚀中样品是以离子源中心为轴旋转的,离子源强度分布的情况可以用径向分布来描述,如图 2(b)。其径向分布曲线可以看作是各方向分布曲线的平均值。可以预见,制作出来的 MDOE 的刻蚀误差分布与离子源强度分布类似,也是具有这种类球面分布形式的。

利用台阶扫描仪,对刻蚀后的 MDOE 进行了表面采样测量,将随机误差减除后,用球面模型对 MDOE 的误差分布进行了拟合,得到了一维径向分布如图 3 所示。

刻蚀误差的影响主要来源于第一个台阶的刻蚀情况<sup>[12]</sup>。由于采用的是球面模型,相同的离子源强度分布下,球面的曲率是不变的,每个单元的实际刻蚀深度可以表示为

$$h_i = h_{\max} - (\sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - r_0^2}), \quad (5)$$

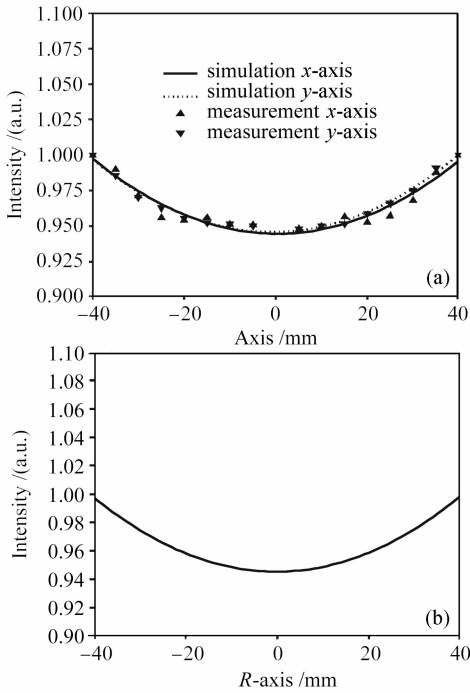


图 2 离子源强度分布图

Fig. 2 Intensity distribution of ion source

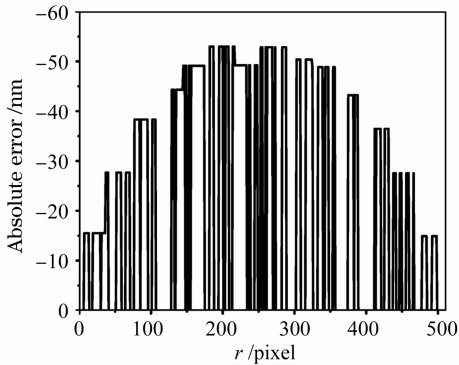


图 3 刻蚀误差一维径向分布图

Fig. 3 Distribution of etching error in radial direction

式中  $h_{\max}$  为第一台阶的最大刻蚀深度;  $R$  为第一台阶误差分布的球面曲率;  $r$  为单元所处的位置;  $r_0$  为 MDOE 的半径。根据(3), (5)式, 可以得到误差偏度与最大刻蚀深度的关系曲线如图 4(a), 根据(1), (4)式, 可以得到 PV 与误差偏度的关系曲线如图 4(b)。

从图 4(a)可见, 随着最大刻蚀深度的加大, 误差偏度呈线性下降。当  $h_{\max}$  在 1090~1110 nm 时, 偏度系数处在  $\pm 3\%$  内, 这时 PV 与标准刻蚀深度 1040 nm ( $g = 19.63\%$ ) 时相比, 下降了将近 20% (图 4(b))。图 5 是  $h_{\max}$  分别为 1040 nm 与 1095 nm 时靶场光强分布的一维图, 可见, 在加大刻蚀深度后 (图 5(b)), 靶场中心的毛刺亮点被很好地压制了。

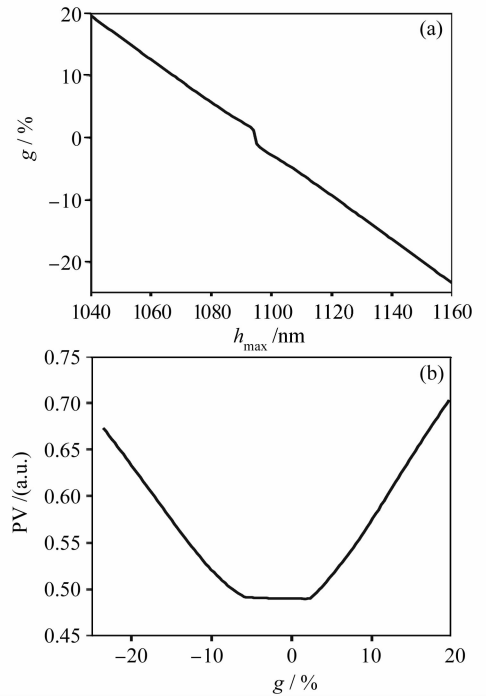


图 4 误差偏度与最大刻蚀深度(a), PV 值(b)的变化曲线

Fig. 4 Curve of error skewness versus maximal etching depth (a) and PV (b)

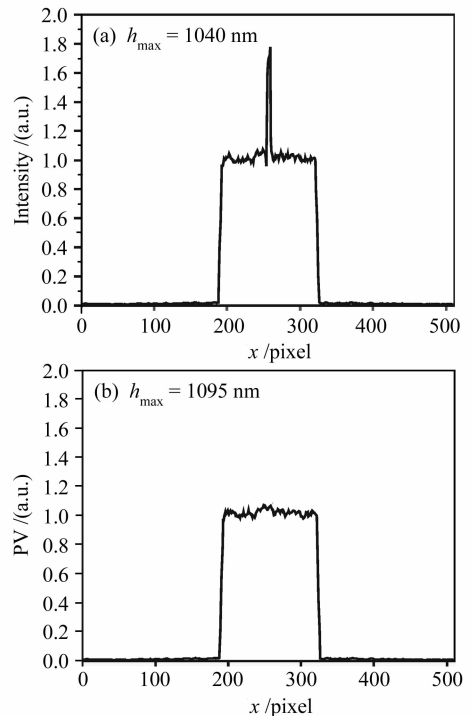


图 5 工艺优化效果模拟图

Fig. 5 Simulation results of technical optimization

## 4 测试结果

以相同的离子束刻蚀工艺制作了两块 MDOE

元件,其最大刻蚀深度约为1040 nm与1090 nm,并分别进行了波长1053 nm的半导体激光照明测试实验。测试光路如图6所示(主透镜的焦距为450 mm,直径为100 mm),其靶场测试结果如图7所示。

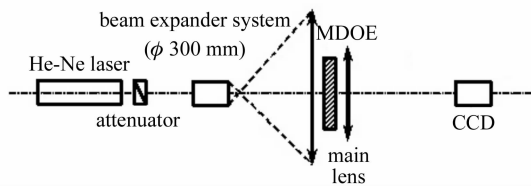


图6 测试光路示意图

Fig. 6 Sketch of testing light path

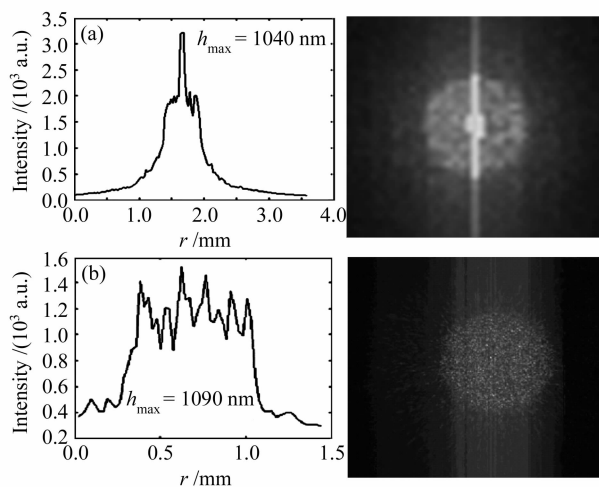


图7 MDOE靶场光强分布图及焦斑图样

Fig. 7 Intensity distribution of MDOE and

focal spot pattern

图7中的亮线为CCD纵向的连带效应所致,由于中心亮点强度较大,会引起CCD纵向相邻光敏元的探测光强增大,形成在中心亮点位置纵向的一条畸变亮线,故一维强度分布曲线选择水平方向为基准。

比较图7(a),(b)可见,经过工艺优化的(图7(b))MDOE元件的靶面光斑比原来更均匀,顶部的毛刺亮点被比较好地压制了下来,照明效果相对于图7(a)1040 nm台阶深度时有比较明显的改善。

## 5 结 论

对MDOE元件的刻蚀工艺的系统误差进行了分析,提出以误差偏度系数来描述整体误差的方法,并在实际工艺环境下对误差偏度与PV值的关系进行了模拟计算和研究。提出了利用偏度曲线来调整刻蚀深度的优化方法,以不同的刻蚀深度在相同的刻蚀环境下分别制作了两块MDOE样品。测试结

果表明,考虑热电子匀滑效果后,通过加大刻蚀深度,PV值由73.6%下降至42.64%,结果很好地支持了工艺优化方法。在工艺可行性上,此方法具有简单易行、成本低的优点,而且在现有工艺条件下能较好地改善MDOE的照明效果,对MDOE的工艺固化也有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 M. A. Kutay, H. W. Ozoktas, Levent Onural. Optical filtering in fractional Fourier domains [J]. *IEEE Trans. Sign. Proces.*, 1997, **45**(5):1129~1143
- 2 Zhang Wei, Shu Fangjie, Zhang Xiaobo *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive elements in uniform illumination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1388~1492
- 3 张巍,舒方杰,张晓波等. 均匀照明用衍射光学器件的空间频域优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1388~1492
- 4 S. N. Dixit, J. K. Lawson, K. R. Manes *et al.*. Kinoform phase plates for local plane irradiance profile central [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(6):417~419
- 5 T. H. Bett, R. M. Stevenson, M. R. Taghizadeh *et al.*. Diffractive optics development for application on high-power solid state lasers [C]. *SPIE*, 1995, **2633**:129~140
- 6 Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan. Optimization of diffractive optical element used with smoothing by spectral dispersion technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):781~785
- 7 谭峭峰,严瑛白,金国藩. 与光谱色散匀滑技术连用的衍射光学器件的优化设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):781~785
- 8 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal plane irradiance profiles [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):764~771
- 9 Wang Wei, Pei Min, Li Yongping *et al.*. Analysis of application properties of diffractive optical elements fabricated by continuous technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):41~46
- 10 王伟,裴珉,李永平等. 连续工艺衍射光学元件的应用特性分析[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1):41~46
- 11 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
- 12 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
- 13 Wang Wei, Li Tao, Liu Li *et al.*. Design of large-caliber phase elements used in ICF [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(5):395~399
- 14 王伟,李涛,刘力等. 用于ICF的大尺寸位相元件的设计[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(5):395~399
- 15 Yongping Li, Wei Zhang, Xiaobo Zhang *et al.*. Development of large aperture DOE for beam smoothing [C]. *SPIE*, 2005, **5876**:587600
- 16 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: McGraw-Hill, 1968
- 17 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):50~55
- 18 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):50~55