

文章编号: 0253-2239(2009)11-3192-05

激光直写制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜轴向 聚焦特性分析

单明广^{1,2} 钟志¹ 郭黎利¹ 智佩¹

(¹ 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001
² 哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为确定卷积效应以及深度制作误差对小 F 数连续浮雕衍射透镜(DOE)轴向聚焦特性影响,基于瑞利-索末非衍射理论建立了激光直写制作的连续浮雕衍射透镜非旁轴近似轴向光强分布模型。该模型考虑了连续浮雕衍射透镜的轴向衍射聚焦特性与透镜结构参数、写入光斑尺寸和扫描间距以及深度制作误差的关系,克服了傍轴近似条件下传统模型的不精确性。为验证模型的正确性,用激光直写制作了设计波长为 441.6 nm, F 数为 4 以及相位匹配因子为 3 的连续浮雕衍射透镜,并测试了波长 441.6 nm 激光入射时透镜的轴向聚焦特性。实验与分析表明,该模型分析结果与实验测试结果符合,从而证实模型的有效性,为激光直写制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜的应用提供了理论依据。

关键词 小 F 数连续浮雕衍射透镜; 轴向聚焦; 瑞利-索末非衍射理论; 激光直写

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3192

Axial Focusing Characteristics of Low F -Number Diffractive Optical Elements with Continuous Relief Fabricated by Laser Direct Writing

Shan Mingguang^{1,2} Zhong Zhi¹ Guo Lili¹ Zhi Pei¹

(¹ Information and Communications Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China
² Ultra-Precision Optical and Electronic Instrument Engineering Center, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In order to study the effect of convolution effect and fabrication errors on the axial focusing characteristics of low F -number diffractive optical elements (DOE) with continuous relief fabricated by laser direct writing, a theoretical model is established using Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory to describe the influence of the structure parameters, the diameter of the writing spot, the interscan distance and the fabrication errors on the diffraction focusing characteristics of low F -number DOE with continuous relief, and continuous-relief DOE with a design wavelength of 441.6 nm, a F -number of 4 and a phase depth factor of 3 are fabricated and measured. The good agreement between theoretical and experimental results verifies the validity of the diffraction model established.

Key words low F -number diffractive optical elements with continuous relief; axial focusing; Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory; laser direct writing

1 引 言

由于具有像差小、设计自由度大、材料选择性强以及易获得大的数值孔径等突出优点,衍射透镜被

广泛的应用于共焦、加速度传感器、相关器、光纤耦合及并行激光直写等领域,尤其是连续浮雕衍射透镜因其理论上可获得 100% 的衍射效率而备受关

收稿日期: 2008-11-03; 收到修改稿日期: 2009-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(60878028, 60908026)、黑龙江省博士后资助经费(LBH-Z08214)、哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2008RFQXG024)和哈尔滨工程大学基础研究基金(HEUFT07079)资助课题。

作者简介: 单明广(1979—),男,博士,讲师,主要从事微结构光学元件设计、制作与应用以及超精密光电测量等方面研究。E-mail: smgsir@gmail.com

注^[1~7]。制作连续浮雕技术包括激光直写、电子束直写、聚焦离子束、金刚石车削等直写技术^[7~12]。相对于电子束直写、聚焦离子束直写,激光直写、金刚石车削除了技术成熟外,更适合制作大范围、深浮雕的连续浮雕衍射透镜,且成本较低;但金刚石车削不能在玻璃上直接加工,且局限于小数值孔径数、回转对称的衍射透镜的制作。因此,激光直写技术在连续浮雕衍射透镜制作领域备受关注^[9~12]。但受制作机理和工艺条件等限制,激光直写制作的连续浮雕并不理想,除了存在卷积效应,还存在制作误差,从而使制作的连续浮雕光学性能普遍下降^[7,10~12]。随着光学系统透镜集成化、阵列化程度越来越高,对透镜阵列焦平面的均匀性、最佳能量的获得以及接受面的装调误差等提出了更高的要求,使透镜聚焦轴向聚焦特性研究成为新的热点。但是目前的研究主要局限于理想条件^[13,14],或是局限于傍轴近似研究制作透镜的轴向分布特性^[10,11],而在并行激光直写等应用中,为了获得高的分辨力,常采用小 F 数的衍射透镜阵列。因此,精确评价激光直写制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜的轴向聚焦特性有着重要的理论意义和应用价值。

本文从分析激光直写制作连续浮雕的卷积效应和深度制作误差着手,通过对连续浮雕衍射透镜的非旁轴近似相位研究,建立了激光直写制作的连续浮雕透镜轴向光强分布模型,同时对分析结果和实验结果做了比较。

2 理论模型

在非旁轴近似条件下,结合费马(Fermat)原理^[7],小 F 数连续浮雕衍射透镜的相位函数可表示为

$$\varphi_0(r) = 2\pi pm + \frac{2\pi(n-1)}{\lambda_0} \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2r^2}}, r_m \leq r \leq r_{m+1}, \quad (1)$$

其各环带半径为

$$r_m = \sqrt{2mp\lambda_0 f_0 + (mp\lambda_0)^2}, 0 \leq m \leq M$$

式中 p 为相位匹配因子,它是重要的结构参数,可以优化调整衍射透镜的浮雕深度和环带宽度,满足制作工艺要求; m 为环带序号; M 为环带总数目; f_0 为

设计波长为 λ_0 时衍射透镜(DOE)的焦距, n 为透镜材料折射率; c 为曲面顶点的曲率,定义为 $c = \frac{1}{f_0(1-n) + mp\lambda_0}$, K 为二次曲面系数,定义为 $K = -n^2$ 。

虽然理想连续浮雕衍射透镜有衍射效率 100% 等诸多优点,但受制作机理及工艺的限制,理想结构并不能实现^[7,10~12]。对于激光直写,由于尺寸有限的高斯聚焦写入光斑产生卷积效应,使浮雕环带间的锐边过渡不能生成,形成卷积浮雕;同时,整个制作过程,包括机械控制过程以及曝光、显影等化学过程,都不可避免存在误差,影响浮雕制作精度,进而影响透镜的轴向光学特性。为了正确评价透镜的轴向聚焦特性,必须考虑卷积效应以及深度制作误差的影响。

假设衍射透镜特征周期远大于写入光斑的直径,则可运用标量衍射理论讨论连续浮雕透镜的卷积效应,即

$$\varphi_c(r) = \varphi_s(r) * I(r), \quad (2)$$

其中 $\varphi_c(r)$ 为考虑卷积效应的透镜相位分布函数; $\varphi_s(r)$ 为理想相位分布函数 $\varphi_0(r)$ 依据扫描间距 r_s 抽样所得相位分布函数,表示为 $\varphi_s(r) = \varphi_0(r) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(r - nr_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_0(nr_s) \delta(r - nr_s)$; $I(r)$ 为写入激光的聚焦光斑高斯光强分布,可表示为

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

其中 ω_0 为写入光斑半径,定义为光束横截面上光强下降为光束最大光强值 $1/e^2$ 时光束半径。

在激光直写中,浮雕面型的横向尺寸可以实现很高的制作精度,但因为光刻胶的不均匀性、曝光剂量控制的不精确以及后续蚀刻过程等的不理想,激光直写制作的连续浮雕垂直面型精度很难保证,通常存在深度制作误差^[10~12]。通过对文献[10,11]的研究表明,深度制作误差 E 可表示为浮雕深度的比例缩放因子 u , 即

$$\varphi_{cu} = u\varphi_c, \quad (4)$$

式中 $\varphi_{cu}(r)$ 为制作透镜的相位分布函数,比例缩放因子 $u = 1 + E$ 。根据(1)式~(4)式,可推导出制作的连续浮雕透镜相位分布为

$$\varphi_{cu}(r) = uI_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[2\pi pm + \frac{2\pi(n-1)}{\lambda_0} \frac{c(nr_s)^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2(nr_s)^2}} \right] \exp\left[-\frac{2(r - nr_s)^2}{\omega_0^2}\right], \quad (5)$$

鉴于本文讨论的条件为非傍轴近似,采用瑞利-索末菲衍射理论分析衍射透镜的轴向光场复振幅分布^[15],则

$$U_{cw}(z) = \frac{2\pi}{i\lambda_0} \int_0^{R_0} U_0(r) \exp[\tilde{\omega}_{cw}(r)] \frac{\exp(i k \sqrt{z^2 + r^2})}{z^2 + r^2} z r dr,$$

式中 $U_0(r_0)$ 为入射波场复振幅分布; k 为波数, 定义为 $k = 2\pi/\lambda_0$ 。

由于光波强度正比于复振幅的模平方, 故得制作的连续浮雕衍射透镜轴向光强分布为

$$I_{cw}(z) = |U_{cw}(z)|^2. \quad (6)$$

根据文献[13,14], 定义焦深(DOF)为光强是轴向光强最大值 80% 的轴向区域; 由于透镜的实际焦平面位置往往偏离预定焦平面, 定义轴向光强最大值点到透镜的距离 f_{max} 相对透镜几何设计焦距 f_0 的偏移为焦移(Δf)为, 即

$$\Delta f = f_{max} - f_0.$$

如果 Δf 为负, 表示实际光强最大值处靠近透镜, 反之远离透镜。

3 连续浮雕衍射透镜轴向光强分布分析

为了抑制卷积效应的影响, 提高透镜的聚焦性能, 很多学者提出了优化制作方法^[11,12]。研究表明, 对于可以接受的深度制作误差, 连续浮雕衍射透镜相位匹配因子选为 2 或 3 是最优的, 并可获得最佳的聚焦性能。基于该分析, 设定如下初始参量分析激光直写制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜轴向聚焦特性: 入射平面波垂直入射, 波长为 441.6 nm; 衍射透镜半径 $R_0 = 64.0 \mu\text{m}$, 焦距 $f_0 = 512.0 \mu\text{m}$, 相位匹配因子 $p=3$, 材料为熔融石英, $n=1.466$; 写入光斑半径 $w_0 = 1.4 \mu\text{m}$, 扫描间距 $r_s = 0.4 \mu\text{m}$; 考

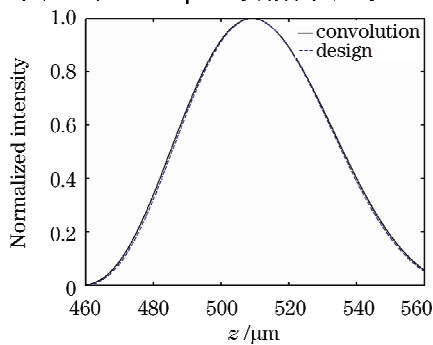


图 1 卷积浮雕衍射透镜和设计衍射透镜轴向光强分布曲线

Fig. 1 Comparison of intensity distribution along axial direction of convoluted and designed DOE

虑目前典型的深度制作误差可控制在 $\pm 10\%$ 区间内, 以及代表更高工艺水平的深度制作误差 $\pm 5\%$ 以及 $\pm 2\%$, u 分别取为 0.90, 0.95, 0.98, 1.00, 1.02, 1.05 和 1.10。

首先分析卷积效应对透镜的轴向聚焦特性影响。从图 1 以及表 1 可知, 相对于设计透镜, 卷积浮雕透镜显示出更快的聚焦特性, 焦深也略有增大, 从而说明衍射透镜的轴向聚焦特性与因写入激光高斯特征产生的卷积效应密切相关。

表 1 卷积浮雕衍射透镜和设计衍射透镜的焦深和焦移

Table 1 Comparison of focal depth and focal shift of convoluted and designed DOE

$f_0/\mu\text{m}$	DOF / μm		$\Delta f / \mu\text{m}$	
	Design	Convolution	Design	Convolution
512.0	29.1	29.7	-2.7	-2.9

在此基础上, 分析深度制作误差对制作透镜轴向聚焦特性影响。从图 2 和表 2 中可以看出, 在浮雕深度的比例缩放因子 u 从 0.90 到 1.10 的变化过程中, 制作透镜的焦移值变大, 说明制作透镜随着 u 值的增大聚焦变快; 当 $u \leq 1$ 时, 焦深变化很小, 而当 $u > 1$ 时, 焦深随着 u 的增大而减小; 同时因为深度制作误差的影响, 制作透镜的轴向光强分布和轴向光强最大值均发生了变化, 这些都不可避免影响影响制作透镜阵列聚焦光斑的均匀性, 但对于相同的深度制作误差值, 放大的深度制作误差 ($u > 1$) 对光强最大值的影响明显小于缩小的深度制作误差 ($u < 1$) 的影响, 这与通过线性放大曝光数据提高制

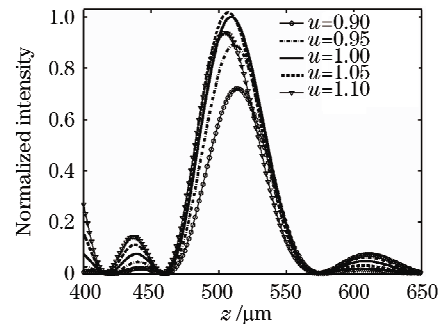


图 2 不同深度制作误差的衍射透镜轴向光强归一化分布曲线图

Fig. 2 Normalized intensity distribution along axial direction of DOE versus different fabrication depth error

作透镜聚焦性能相符^[11,12]。由于深度制作误差的非均匀性和不确定性,在并行激光直写等系统应用中,为了提高写入质量,除了需提高制作精度外,还需对阵列中的每个透镜的聚焦光斑进行标定,以在写入过程预先修正每个透镜的曝光剂量。另外,需要注意

的是,在透镜衍射聚焦过程,对于 $u > 1$, 衍射透镜的高级次衍射能量增强而低级次衍射减弱; 对于 $u < 1$, 衍射透镜的低级次衍射能量增强而高级次衍射减弱,这些能量的重新分布,均会改变阵列聚焦过程的背景噪声分布,在系统设计时必须加以注意。

表 2 制作透镜轴向光强分布的焦移和焦深值

Table 2 Focal shift and focal depth of the fabricated DOE

u	0.90	0.95	0.98	1.00	1.02	1.05	1.10
$f_{\max}/\mu\text{m}$	513.8	511.4	510	509.1	508.2	506.9	504.7
$\Delta f/\mu\text{m}$	1.8	-0.6	-2.0	-2.9	-3.8	-5.1	-7.3
DOF/ μm	29.8	29.8	29.8	29.7	29.6	29.4	28.9

4 实验验证及讨论

为了证实上述模型和结论的正确性,基于(1)式设计了如下参数的连续浮雕衍射透镜阵列:设计波长 $\lambda_0 = 441.6 \text{ nm}$, 衍射透镜半径 $R_0 = 64.0 \mu\text{m}$, 焦距 $f_0 = 512 \mu\text{m}$, 相位深度因子 $p = 3$, 材料为熔融石英, $n = 1.466$; 同时,与俄罗斯科学院自动化和电工所合作,利用激光直写技术制作了该阵列,在制作过程采用如下参数:写入光斑半径 $\omega_0 = 1.4 \mu\text{m}$, 扫描间距 $r_s = 0.4 \mu\text{m}$ 。阵列中任一透镜经原子力显微镜(AFM)扫描的测量结果如图 3 所示。

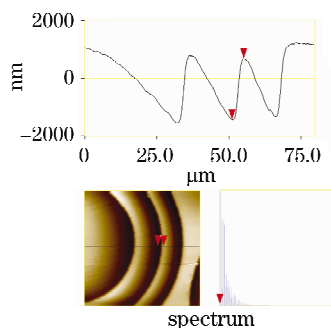


图 3 连续浮雕衍射透镜原子力显微镜扫描图

Fig. 3 AFM image of the DOE with continuous relief

为了评价所制作透镜的轴向聚焦特性,如下实验过程被采用:HeCd 激光器发出波长 441.6 nm 激光,依次经过衰减器的光强衰减、准直扩束器的准直扩束后,垂直入射到制作透镜,在其焦点处形成聚焦光点,然后经过放大物镜的放大入射到 CCD 探测器,并形成图像信号;同时,沿光轴方向调整制作透镜,实现透镜的轴向光强分布测量。为了更好的比较实验结果和理论分析结果,同时考虑透镜深度制作误差的难确定性,只考虑卷积效应的影响,运用所建立的模型分析制作透镜的轴向光强响应,并任取阵列中 3 个透镜,得到制作透镜的轴向光强响应特性分布曲线如图 4 以及焦深特性表 3。从图 4 和表 3 可以明显看出,

尽管因为制作误差、测量误差等因素的影响,实验得到的焦深与理论分析得到的焦深略有差别,但实验曲线和理论仿真曲线仍吻合得非常好,从而证明所建激光直写制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜轴向衍射聚焦模型和分析结论的正确性。

表 3 衍射透镜的焦深值

Table 3 Focal depth of the DOE

Convolution model	DOE 1/ μm	DOE 2/ μm	DOE 3/ μm
29.7	31.7	29.6	30.4

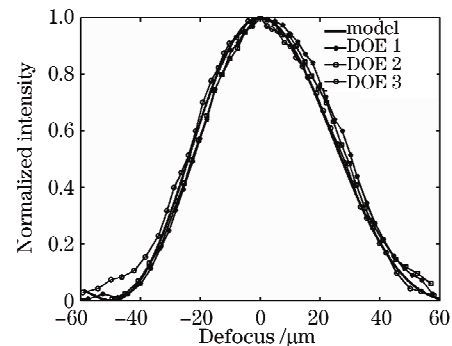


图 4 制作透镜轴向光强分布特性理论与实验曲线

Fig. 4 Comparison of intensity distribution along axial direction of theoretical results with experimental results

5 结 论

基于瑞利-索末菲衍射理论,考虑激光直写制作连续浮雕的卷积效应和深度制作误差,建立了制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜轴向光强分布模型,并与制作的 F 数为 4 连续浮雕衍射透镜的测试结果作了比较。分析结果与测试结果的良好吻合性,证明了所建轴向聚焦模型的正确性,为制作的小 F 数连续浮雕衍射透镜的应用奠定了理论基础和实验基础。

致谢 感谢瑞士纳沙泰尔大学 H. P. 赫尔齐克教授、Heptagon Oy 公司 Markus Rossi 博士的热情帮助;感谢俄罗斯科学院 Victor P. Korolkov 工程师的有益讨论。

参 考 文 献

- Zhao Weiqian, Chen Shanshan, Feng Zhengde. A confocal measurement method based on superresolution image restoration and shaped annular beam[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(7): 3363~3367
赵维谦, 陈珊珊, 冯政德. 图像复原式整形环形光横向超分辨共焦显微测量新方法[J]. *物理学报*, 2006, **55**(7): 3363~3367
- Jia Shuhai, Kong Weijun, Yang Jia. Design of optical acceleration sensor based on diffractive micro lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1494~1497
贾书海, 孔维军, 杨 佳. 基于衍射微透镜的光学加速度传感器设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1494~1497
- Liu Jiayong, Xu Ping, Xu Haidong *et al.*. Design and analysis of novel planar integrated optical correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1735~1739
刘加勇, 徐 平, 徐海东 等. 新型平面集成光学相关器设计与分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1735~1739
- R. Magnusson, M. T. Gale. Diffractive optics and micro-optics; introduction to the feature Issue[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(32): 5817~5818
- F. Yong-Qi, N. Kok Ann Bryan, O. Shing. Diffractive optical elements with continuous relief fabricated by focused Ion beam for monomode fiber coupling [J]. *Opt. Express.*, 2000, **7**(3): 141~147
- J. B. Tan, M. G. Shan, J. Liu *et al.*. Model analysis of effect of diffraction focus characteristics of microlens arrays on parallel laser direct writing quality [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**: 237~240
- J. B. Tan, M. G. Shan, C. G. Zhao *et al.*. Design and fabrication of diffractive microlens arrays with continuous relief for parallel laser direct writing[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1430~1433
- M. Okano, H. Kikuta, Y. Hirai *et al.*. Optimization of diffraction grating profiles in fabrication by electron-beam lithography[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**: 5137~5142
- H. P. Herzog. *Micro-Optics-Elements, Systems, and Applications* [M]. Zhou Haixuan Transl.. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 107~147
H. P. 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 周海宪译. 北京:国防工业出版社, 2002. 107~147
- M. Rossi, R. E. Kunz, H. P. Herzog. Refractive and diffractive properties of planar micro-optical elements[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26): 5996~6007
- T. Hessler, M. Rossi, R. E. Kunz *et al.*. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4069~4079
- P. Korolkov, R. K. Nasyrov, R. V. Shimansky. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(1): 53~62
- U. Vokinger, R. Dandliker, P. Blattner *et al.*. Unconventional treatment of focal shift [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **157**: 218~224
- Feng Di, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Rigorous vector analysis of diffractive micro-cylindrical lenses characteristics of focal depth and focal shift[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1045~1049
冯 迪, 严瑛白, 金国藩 等. 衍射微柱透镜轴向光强分布特性的严格电磁分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1045~1049
- Li Junchang. *Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 144~145
李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京:科学出版社, 2003. 144~145