

浸没式光刻照明系统的照明模式变换器

李美萱^{1,2,3}, 董连和^{3*}

- (1. 吉林工程技术师范学院 量子信息技术交叉学科研究院, 吉林 长春 130052;
2. 吉林省量子信息技术工程实验室, 吉林 长春 130052; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130000)

摘要: 研究了 NA1.35 浸没式光刻照明系统中照明模式变换模块的设计和测试。采用衍射光学元件实现包括传统照明、二极照明、四极照明的照明模式变换系统的设计和分析。给出了不同照明模式的衍射光学元件的设计结果, 并对设计结果进行了模拟分析和实验分析, 证明了设计的可行性。研究表明: 当输入光场被分割的阵列数为 20×20 单元时, 二极和四极照明模式下衍射元件台阶数为 32, 传统照明模式下台阶数为 128 的情况下, 衍射光学元件作为照明模式变换器的均匀性及衍射效率都能够满足设计要求。从原理、实验上验证衍射光学元件激光模式变换器设计的正确性及可行性。研究结果能够应用于浸没式光刻照明系统中照明模式变换结构中, 具有一定的理论价值和工程意义。

关键词: 浸没式光刻照明系统; 照明模式变换; 衍射光学元件; 光瞳整形

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0618002

Light mode converter in immersion lithography lighting system

Li Meixuan^{1,2,3}, Dong Lianhe^{3*}

- (1. Institute for Interdisciplinary of Quantum Information Technology, Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China;
2. Jilin Engineering Laboratory for Quantum Information Technology, Changchun 130052, China;
3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: The lighting mode convertor module in NA1.35 immersion lithography lighting system design has been designed and tested. The lighting mode convertor system can be realized by using diffractive optical element (DOE) in the design and analysis, including the traditional lighting mode, diode lighting mode and quadrupole lighting models. And then different lighting models of diffractive optical elements for the design results were presented. The results were simulated and the experimental results were analyzed, which proved the feasibility of the design. The research results show that when the input optical field is divided with the number of array of 20×20 units, the diode lighting and quadrupole lighting models of diffractive optical elements are with numbers of 32 steps, the traditional lighting mode of 128 steps, the uniformity of diffractive optical elements as lighting mode converters and the diffraction efficiency are able to meet the design requirements. From the basis principle, the experimental validation

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(91338116, 11474037); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20181363KJ); 2018 年度校级项目支持(可预置强度关联成像理论及实验研究)

作者简介: 李美萱(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事先进光学系统设计与制造技术、微结构光学元件与薄膜波导术、光纤通信技术等方面的研究。Email: limx@jlenu.edu.cn

通讯作者: 董连和(1953-), 男, 教授, 博士, 主要从事先进光学系统设计与制造技术、微细加工理论与工艺技术、微光学与应用等方面的研究。Email: custdong@126.com

of diffractive optical elements correctness and feasibility of the laser mode converter design can meet the requirements. The results can be applied to the immersion lithography lighting mode converters in the immersion lithography lighting system structure, which have the great certain theoretical value and engineering significance.

Key words: immersion lithography lighting system; illumination mode transformation; diffractive optical elements; pupil shaping

0 引言

随着 193 nm ArF 准分子激光光刻的快速发展和商业化生产,浸没透镜技术已成为光学光刻进一步发展的技术支撑。浸没式光刻高均匀照明系统是光刻机的核心部分之一,主要功能是为光刻投影物镜提供高均匀性照明,投影光刻机是一种大规模集成电路制造装备,其核心技术为获得各种复杂光瞳光强分布与极高光强均匀性的照明技术及接近零像差的光学成像技术。不同照明模式是浸没式光刻照明系统的主要评价标准之一^[1-4]。

目前,实现照明模式变换的技术包括传统折射元件和衍射光学元件两种。折射元件的加工简单,但对光强的控制能力弱,难以实现较高性能的二极、四极照明模式;而衍射元件能够满足高衍射效率的同时对光强分布进行精确调控。因此,主要采用衍射元件技术形成不同光束形状的照明,使光束的远场衍射角满足一定空间分布要求,实现照明模式变换。

1985年,美国林肯实验室提出了基于光学光刻的二元光学(Binary Optics),理论上能够通过入射光束强度和位相分布的调制实现任意光束的整形变换,因此被广泛地应用于激光聚焦、激光准直、光束均匀化等激光光束整形变换中。主要通过设计能产生不同照明模式的光瞳整形元件来实现^[5-8]。由光瞳整形元件产生的照明模式经过匀化等处理之后作为新的光源照射在掩模面上。采用衍射光学元件作为光瞳整形元件的主要优点能够使设计灵活多样,通过相位分布的设计实现任意的光瞳花样设计。

2008年,美国林肯实验室设计了一种基于微反射镜阵列(MMA)的可编程照明装置,实现一片MMA满足特定照明模式的变化。对于45 nm及以下节点的近模式光刻照明系统,为提高分辨率应进

行不同照明模式变换的设计。关于45 nm浸没式光照模式变换器的研究目前还没有相关报道。

文中采用阵列型衍射光学元件实现新型照明模式的变换,其中照明模式变换包括四极照明、二极照明和传统照明,给出了不同照明模式的设计结果,对结果进行了分析,并利用632.8 nm可见光进行了实验,验证其可行性。总之,文中从原理上对应用于浸没式光刻照明系统中的衍射光学元件激光模式变换器进行了理论设计分析,并从实验上对该器件完成了实验验证,结果证明衍射光学元件激光模式变换器的设计正确性及应用可行性。

1 基本原理

阵列型衍射光学元件将输入光波进行分割,不管输入光场的分布如何,相对于阵列单元来说其输入都可以近似为均匀平面波,因此这种结构对输入变化不敏感,同时每个阵列单元对其输入光进行相位调制,在靶面上生成所需光场分布。每个阵列单元都具有相同的相位分布和近似相同的输入光场分布,根据傅里叶变换位移定理可知,每个阵列单元在靶面上产生的衍射图样位置和形状不变,所有单元的输出在靶面上进行叠加,因此理论上阵列化不会影响光场分布。设计阵列型衍射光学元件主要有两个方面:一个是对阵列单元相位分布进行设计;另一个是阵列单元个数的选取。其中,阵列型衍射光学元件的位相分布会影响衍射光学元件衍射效率和制作误差,从而会影响其均匀性;单元个数的设计也会受到实际应用情况和加工设备的影响。

采用衍射元件作为光瞳整形元件的主要优点是整形灵活。首先通过衍射元件上相位分布的设计实现任意的光瞳花样,包括二极、四极以及自由照明等。其次,衍射元件能实现输出数值孔径的可控调节。图1所示为一个阵列型衍射元件的傅里叶变换系统的实现原理图^[10-11]。

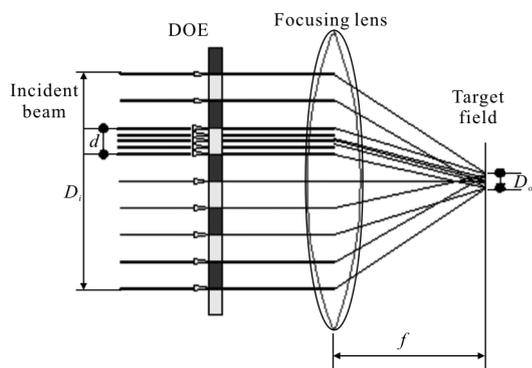


图 1 阵列型衍射光学元件激光光束整形变换原理图

Fig.1 Principle of array type diffractive optics for laser beam shaping transformation

图 1 中, D_i 和 D_o 分别为输入和输出光束的口径; f 为聚焦透镜的焦距; 下标 i 和 o 分别为入射和出射平面; $I_{i,a}(x_i, y_i)$ 和 $I_{o,d}(x_o, y_o)$ 分别为入射和理想出射光束的光强分布。阵列中每个小单元都是一个 DOE, DOE 在设计中被简化为没有厚度仅有相位分布的纯相位光学元件, 对入射光的相位进行调制, 其相位分布为 $\phi_i(x_i, y_i)$ 。入射光经过 DOE 后由透镜实现傅里叶变换, 在像面上即可得到所需光场分布。

对于一个阵列单元, 假设入射光束的复振幅分布 $U_i(x_i, y_i)$ 为 1, 出射光束的复振幅分布为 $U_o(x_o, y_o)$, 则出射场分布用傅里叶公式表示为:

$$I_o(x_o, y_o) = |c \times F\{\sqrt{I_i(x_i, y_i)} \times \exp(i\phi_i(x_i, y_i))\}|^2 \quad (1)$$

式中: F 为傅里叶变换; c 为与光学系统相关的函数。

一般在 DOE 的设计中, 已知输入和输出光场的强度分布 $I_i(x_i, y_i)$ 和 $I_o(x_o, y_o)$, 因此设计中 DOE 就是寻找满足上述表达式的相位分布 $\phi_i(x_i, y_i)$ 并使上述表达式成立。

入射光束经过衍射光学元件后, 会产生多个衍射级次, 除主衍射级次, 即 1 级衍射级次以外, 其他衍射级次光线在主衍射级次像面上形成杂散光, 会降低像面对比度, 进而影响最终像面清晰度。衍射效率是指主衍射级次能量 E_1 与像面位置总能量 E_0 的比值, 即

$$\eta = \frac{E_1}{E_0} \quad (2)$$

在文中的设计过程中, 采用 G-S 算法^[12], 加线性叠代加速算法, 大大加速了优化速度。阵列型衍

射光学元件中单元个数 m 的选择非常重要, 会直接影响设计结果。在设计整个元件时, 根据采样定理可知, 整个输入面上的采样间隔不变即输入面上的采样点数确定为 N , 如果单元个数 m 比较多, 对于单个单元 DOE 设计中采样点数 $Nm = N/m$ 就会比较少, 即频谱面上采样点也少。对于频谱面上的采样来说, 采样间隔变小, 采样点数增多, 设计时所用采样点 Nm 相对于所有采样点 N 比例较小, 会使设计结果与实际结果像差较远。单元个数 m 较少, 单元面积就相对比较大, 其输入可能就不再是均匀平面波, 对于以平面波为理想输入设计的 DOE, 实际输出与设计输出之间的误差就会增大, 就有可能不满足设计要求。

2 激光模式变换器的设计

照明模式变换元件要实现的主要功能是: 将扩束后的光强分布不均匀的横截面接近正方形的光束进行变换, 使光束的远场衍射角满足一定空间分布要求, 最终实现各种离轴照明方式, 即要求输出的光束远场具备二极、四极或者传统照明模式的光强分布。根据浸没式光刻照明系统的整体设计要求, 应用于照明模式变换作用的衍射元件设计指标要求如表 1 所示。

表 1 衍射光学元件设计指标

Tab.1 DOE design index

Properties parameters	Value
Wavelength/nm	193.368
Diameter aperture of incident beam/mm	30×30
Divergence angle of incident beam/mrad	2×3
Diffraction angle/(°)	±1.06
Intensity homogeneity	>95%

在整个设计过程中, 针对激光输出模式的不确定、随时间的不稳定及装配过程中误差, 提出了阵列衍射光学元件实现激光光束的整形变换, 并仔细分析讨论由此带来的很多相关特性。为此采用该优化思想, 分别设计了四极、二极以及传统照明模式要求下的衍射光学激光光束整形器, 并分析了在不同输入分布激光和不同偏移输入情况下的光强分

布均匀性及衍射效率。

通过优化 ArF 准分子激光光束模式变换衍射光学元件,考虑到实际应用情况和加工能力,阵列数为 20×20,衍射光学元件的加工台阶数为 32 时,该衍射元件能够满足设计和使用要求。同时还可看出,对于一般的输入激光光束,其整形效果是可以满足均匀性大于 5% 的要求,设计理论衍射效率接近 90% 左右,基本满足设计和使用要求。对应不同平移量的四极照明模式变换器的特性进行分析,如表 2 所示。

表 2 四极照明模式变换器特性分析
Tab.2 Analysis of quadrupole lighting mode converter features

Translation /mm	Super-Gaussian distribution	Gaussian distribution	Diffraction efficiency
0	4.63%	4.51%	
0.5	5.31%	4.52%	
0.75	5.21%	4.54%	
1.0	5.11%	4.58%	89.35%
1.5	5.54%	4.60%	
2.0	5.26%	4.61%	

此外,该类型衍射光学元件作为照明模式变换器时的四级照明激光光强分布如图 2 所示。

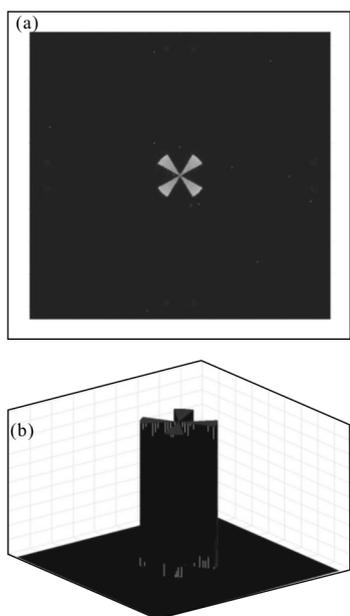


图 2 四极照明模式激光光强分布

Fig.2 Laser intensity distribution of quadrupole lighting mode

经过设计优化可知,当阵列数为 20×20 时设计结果的均匀性基本都在 4%~5% 之间。针对超高斯分布及高斯分布而言,为了平衡制作误差及均匀性,衍射元件设计为 32 台阶量化,对应的均匀性为 4.20%,理论衍射效率基本大于 92%,满足设计和使用要求。对应不同平移量的二极照明模式变换器的特性进行分析,如表 3 所示。

表 3 二极照明模式变换器设计特性分析
Tab.3 Analysis of diode lighting mode converter design features

Translation /mm	Super-Gaussian distribution	Gaussian distribution	Diffraction efficiency
0	4.20%	4.03%	
0.25	4.56%	4.03%	
0.50	4.90%	4.03%	
1.0	4.69%	4.06%	92.73%
1.25	5.04%	4.08%	
1.5	5.24%	4.10%	
2.0	4.84%	4.16%	

此外,该类型衍射光学元件作为照明模式变换器时的二级照明激光光强分布如图 3 所示。然后对传统照明模式特性进行分析。当阵列数为 20×20 时设计结果的均匀性基本都在 4%~5% 之间。针对超高斯分布及高斯分布而言,为了平衡制作误差及均匀性,衍射元件设计为 128 台阶量化,对应的均

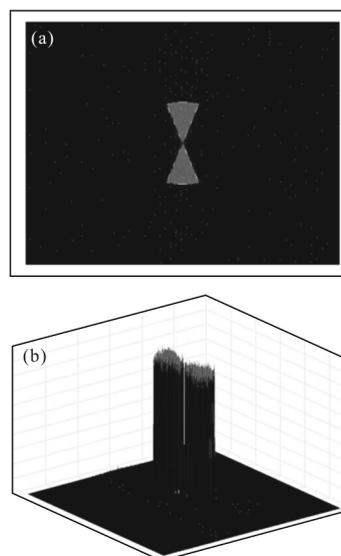


图 3 二极照明模式激光光强分布

Fig.3 Laser intensity distribution of diode lighting mode

匀性为 4.03%，理论衍射效率基本大于 97%，才能满足设计和使用要求。对应不同平移量的传统照明模式变换器的特性进行分析，如表 4 所示。

表 4 传统照明模式特性分析

Tab.4 Analysis on traditional lighting mode features

Translation /mm	Super-Gaussian distribution	Gaussian distribution	Diffraction efficiency
0	4.39%	8.60%	
0.25	4.78%	4.03%	
0.50	5.13%	4.03%	
1.0	4.95%	4.06%	97%
1.25	5.42%	4.08%	
1.5	5.67%	4.10%	
2.0	5.12%	4.16%	

此外，该类型衍射光学元件作为照明模式变换器时的传统照明激光光强分布如图 4 所示。

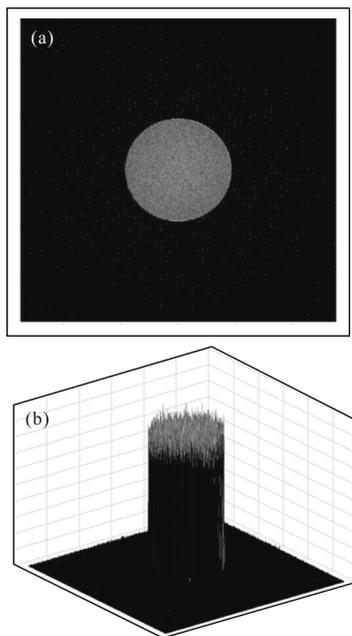


图 4 传统照明模式激光光强分布

Fig.4 Laser intensity distribution of traditional lighting mode

3 激光模式变换器模式变换功能的验证

采用多次套刻技术，掩模版制作—曝光—刻蚀步骤对上述衍射光学元件进行加工，然后对可见光波段（633 nm）阵列激光模式变换衍射光学元件

(@633 nm)的优化设计、制作及检测，从实验上验证了目前的 DOE 模式变换器不仅可以实现各种光束的整形变换，而且对输入激光有较大的宽容度。所有参数除了波长不同以外，其余参数的设置与 ArF 浸没式光刻照明系统的设计要求完全相同。波长：632.8 nm；发散角：0.1 mrad×0.1 mrad；最大远场衍射角： $\pm 1.06^\circ$ 。

此外，笔者制作了该器件，并完成了相关性能测试。采用 He-Ne 初步完成 32 台阶衍射光学元件的性能测试与分析：初步搭建了测试分析实验系统，如图 5 所示，此外笔者还在输入光束中插入一渐变衰减器，使输入光束不再是高斯光束分布，输出光束基本不发生改变，基本达到预期的目的，即光束分布未知或随时间改变对整形激光输出分布影响较小。

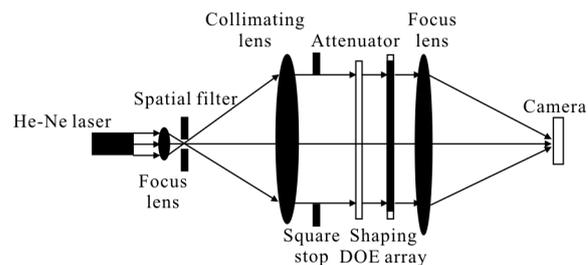
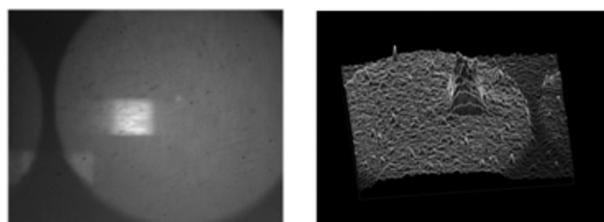


图 5 光束整形 DOE 元件测试光路

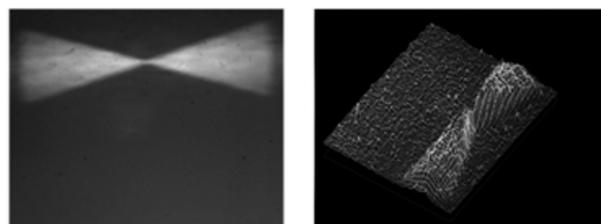
Fig.5 Light path for DOE element testing of beam shaping

图 6 为三种照明模式变换器 DOE 整形测试结果。



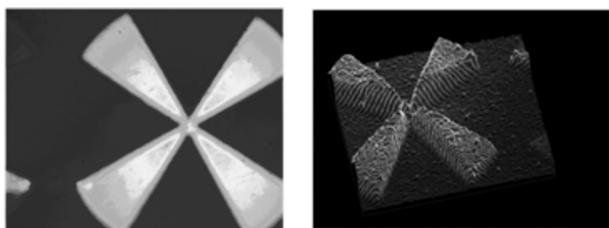
(a) 传统照明

(a) Traditional lighting



(b) 二极管照明

(b) Diode lighting



(c) 四极照明

(c) Quadrupole lighting

图 6 三种照明模式变换器衍射元件整形测试结果

Fig.6 Test results of DOE for three lighting mode converters

根据测试结果,三种照明模式下的照明变换器的性能测试结果如表 5 所示。

表 5 照明模式变换器的性能测试结果

Tab.5 Test results of lighting mode converter performance

Parameters	Polar angle /($^{\circ}$)	Polar radius /($^{\circ}$)	Intensity homogeneity	Diffraction efficiency
Design value	30 ± 1	1.06	5%	90%
Real value			3.0%	89.3%
Quadrupole	30.1	1.07	5.6%	78%
Diode model	30.1	1.07	7.6%	76%
Traditional model	30.1	1.07	7.2%	82%

从测试结果可以看出,三种照明模式变换器衍射元件整形特性基本满足设计要求。

4 结 论

文中设计了一种应用于浸没式光刻照明系统中的照明模式变换系统。基于衍射光学理论,该照明模式变换系统采用衍射光学元件。设计分析了该衍射光学元件用于不同照明模式变化情况下的不同设计结果,并对设计结果进行了模拟分析和实验分析,证明了设计的可行性。研究表明,当输入光场被分割的阵列数为 20×20 单元时,对二极和四极照明情况下台阶数为 32 台阶,对传统照明模式情况下台阶数为 128 时,衍射光学元件作为照明模式变换器的均匀性及衍射效率也分别控制在 4% 及 90% 左右,都能够满足设计要求。此外,采用实验办法对衍射光学元件作为照明模式变换器的性能进行了测试和分析。总之,文中从原理、实验上验证衍射光学元件激光模式变换器设计的正确性及可行性,结果表明,该原理、方法、技术上都是可行的。

参考文献:

- [1] Dorodnyy A, Shklover V, Braginsky L, et al. High-efficiency spectrum splitting for solar photovoltaic [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 136(10): 120-126.
- [2] Zhang L, Liu D, Shi T, et al. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-null interferometer testing [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (35): 8501-8511.
- [3] Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(11): 2081-2086. (in Chinese)
- [4] Song Qiang, Zhu Jing, Wang Jian. A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off axis lithography illumination system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122005. (in Chinese)
- [5] Zhang Wei, Liang Chuanyang, Li Jin, et al. Design of optical elements for beam shaping and uniform illumination in laser digital projection display system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0805001. (in Chinese)
- [6] Zhao Yang, Gong Yan. Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(1): 29-34. (in Chinese)
- [7] Bao Haiting, Ouyang Mingzhao, Wang Zhiyong, et al. Design of light field shaping system based on DOE identification [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2017, 40(2): 27-32. (in Chinese)
- [8] Uzu H, Ichikawa M, Hino M, et al. High efficiency solar cells combining a perovskite and a silicon heterojunction solar cells via an optical splitting system [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 106(1): 013506.
- [9] Zhang Jian, Li Mengjuan, Yin Ganghua, et al. Large-diameter membrane Fresnel diffraction elements for space telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (6): 1289-1296. (in Chinese)
- [10] Zhang Wei, Gong Yan. Vector analysis of diffractive optical elements for off axis illumination of projection lithographic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005002. (in Chinese)
- [11] Cui Qingfeng, Gao Shiping, Kuang Yuguang. Design, fabrication and experiment of a hybrid diffractive refractive binary optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 17-20. (in Chinese)
- [12] Yan Shuhua. Design of Diffractive Micro-optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 66-76. (in Chinese)