

基于离散抽样加密算法的衍射光学元件设计

李美萱^{1,2}, 李宏^{1,2}, 张斯淇^{1,2}, 张文颖^{1,2}, 郭明^{1,2}

(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)

摘要: 为满足浸没式光刻照明系统对掩模面高均匀性和不同照明模式的要求, 对照明系统中的照明模式变换器进行了研究。采用衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE)来产生各种照明模式, 从光栅结构出发, 经两步变换分析了光栅转变为 DOE 的过程。并提出一种离散抽样加密算法, 以抽样线宽 1~5 μm 的四极照明 DOE 为例, 揭示了 DOE 特征尺寸、衍射效率和光强分布非均匀性的实际对应关系。设计结果表明: 随着抽样线宽的减小, 整形光束的衍射效率和均匀性将得到较大提高。利用接触式光刻工艺完成了特征尺寸为 1.76 μm ×1.76 μm 的 16 台阶照明模式变换 DOE 的制作, 通过搭建光学测试平台对不同照明模式下 DOE 的光强非均匀性和衍射效率进行了测试, 结果满足设计要求, 验证了离散抽样加密算法能够有效指导照明模式变换系统 DOE 的设计。

关键词: 浸没式光刻; 照明模式变换; 衍射光学元件; 离散抽样加密算法

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0916004

Design of diffractive optical element based on discrete sampling encryption algorithm

Li Meixuan^{1,2}, Li Hong^{1,2}, Zhang Siqu^{1,2}, Zhang Wenying^{1,2}, Guo Ming^{1,2}

(1. Institute For Interdisciplinary Quantum Information Technology, Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China;

2. Jilin Engineering Laboratory for Quantum Information Technology, Changchun 130052, China)

Abstract: In order to meet the high uniformity and different illumination mode requirement of the mask plane of the immersion lithography illumination system, the illumination mode converter system was studied. Diffractive Optical Elements (DOE) were used to generate various illumination modes, started from grating structure, the process of converting the grating into DOE by two-step transformation was analyzed. And a discrete sampling encryption algorithm was proposed. By examples of quadrupole illumination DOE with sampling width 1–5 μm , the correspondence relationship between the DOE feature size, diffraction efficiency and the intensity distribution non-uniformity was disclosed. The design results show that as the sampling line width decreases, the diffraction efficiency and uniformity of the shaped

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61703056); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20181363KJ);

吉林工程技术师范学院博士科研启动基金(BSKJ201826)

作者简介: 李美萱(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事微结构光学元件与薄膜波导术、光学系统设计等方面的研究。

Email: limx@jlenu.edu.cn

beam will be greatly improved. The 16-step illumination mode conversion DOE with feature size of $1.76 \mu\text{m} \times 1.76 \mu\text{m}$ was fabricated by contact lithography. The optical non-uniformity and diffraction efficiency of DOE under different illumination modes were tested by setting up an optical test platform. The results meet the design requirements and verify that the discrete sampling encryption algorithm can effectively guide the design of the DOE for the illumination mode transformation system.

Key words: immersion lithography; illumination mode transformation; diffractive optical element; discrete sampling encryption algorithm

0 引言

浸没式光刻照明系统需要将扩束后光强分布不均匀的激光束进行变换,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模式,以增强光刻分辨力、改善焦深、提高成像对比度,从而得到更好的光刻性能^[1]。Jose Maria Herrera-Fernandez 等人使用 DOE 代替传统光学元件,大大减小了光学系统尺寸^[2-3]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所巩岩课题组建立了投影光刻用 DOE 的矢量分析模型,并对标量方法设计的 DOE 在偏振照明情况下的匀光与整形性能进行了分析^[4-5]。中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室黄惠杰课题组提出了一种光刻机光瞳整形 DOE 远场多参数检测方法^[6-8]。该方法通过对远场光强分布进行转换,可同时获得 DOE 远场衍射图样的极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角和径向光强分布等多种光学特性参数^[9]。国内外从原理上对 DOE 进行了理论设计分析和实验验证^[10-11]。但对浸没式光刻照明模式变换系统中 DOE 特征尺寸、衍射效率和光强分布非均匀性之间实际对应关系的研究还未见报道。

1 衍射光学元件的设计原理

DOE 是基于衍射和干涉原理工作的,其光路如图 1 所示。DOE 一般由若干个单元构成,这些单元组成单台阶或多台阶结构。入射光照射到 DOE 上时,各个单元会产生明显的衍射作用,经过透镜的会聚,各单元的衍射光在焦面上干涉,形成干涉图像。通过调制各个单元的位相,可以在焦面上获得需要的光强分布。

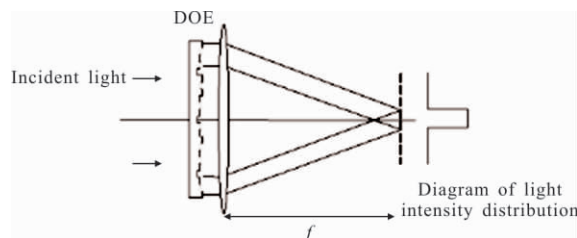


图 1 DOE 工作原理光路图

Fig.1 DOE working principle optical path

从光栅结构出发进行分析,经过两步变换可将光栅转变为 DOE。为了简化分析,假设同一块 DOE 中每个单元大小都是相同的。首先考虑一维黑白光栅,其夫琅和费衍射光路示意图如图 2 所示。光栅的周期为 d ,每条缝宽为 a ,总缝数为 N ,以平行光照明,衍射图样位于透镜后焦面上。

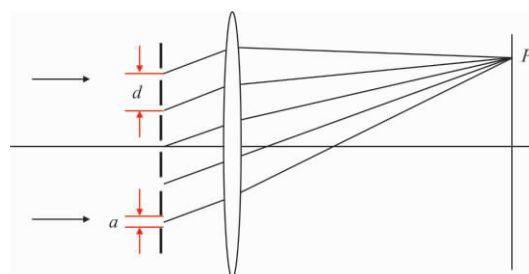


图 2 光栅的多缝夫琅和费衍射示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-slit grating Fraunhofer diffraction

根据标量衍射理论,上述光栅在透镜后焦面上衍射图样的强度分布为:

$$I = A_0^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin N\beta}{\beta} \right)^2 \quad (1)$$

式中: A_0 为单缝衍射的光振幅; $\alpha = \sin \theta \pi d / \lambda$, θ 为衍射角; $(\sin \alpha / \alpha)^2$ 为单缝衍射因子; $(\sin N\beta / \sin \beta)^2$ 为缝间干涉因子。缝间干涉因子产生各级衍射光呈周期分

布, 而单缝衍射因子调制各个衍射级的光强相当于缝间干涉因子的包络线。单缝衍射因子的零点位于 $\alpha=k\pi$ 处, 缝间干涉因子的主极大位于 $\beta=k\pi$ 处。由于缝宽 a 和周期 d 是不同的, 因此如图 3(b)所示, 单缝衍射因子的零点位置和缝间干涉因子的主极大位置并不相同。为了将光栅变为 DOE, 需要将光栅的缝宽增大, 使 a 趋近于 d , 如图 3(a)Step 1 所示。极限情况是 $a=d$, 黑白光栅将变为完全透光的孔径。由于缝宽 a 增大, 单缝衍射因子将收缩, 如图 3(c)箭头所示, 而缝间干涉因子保持不变。由前面的分析可知, $a=d$ 时有:

$$\alpha=\beta=\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (2)$$

如图 3(b)所示除了零级之外, 单缝衍射因子的零点和缝间干涉因子的主极大位置将重合, 均位于 $\alpha=\beta=k\pi$ 的位置。如图 3(c)所示除零级外的高级衍射级次由于受到单缝衍射因子的压制而消失。如图 3(c)中虚线所示的位置本应有一对缝间干涉因子的主极大, 但此处恰好是单缝衍射因子的零点, 因此在实际的光强分布中, 该点的光强为零。同样的, 更高级次的主极大位置上光强也为零, 最终将只有零级峰存在, 这和单一孔径形成的焦斑是一致的。

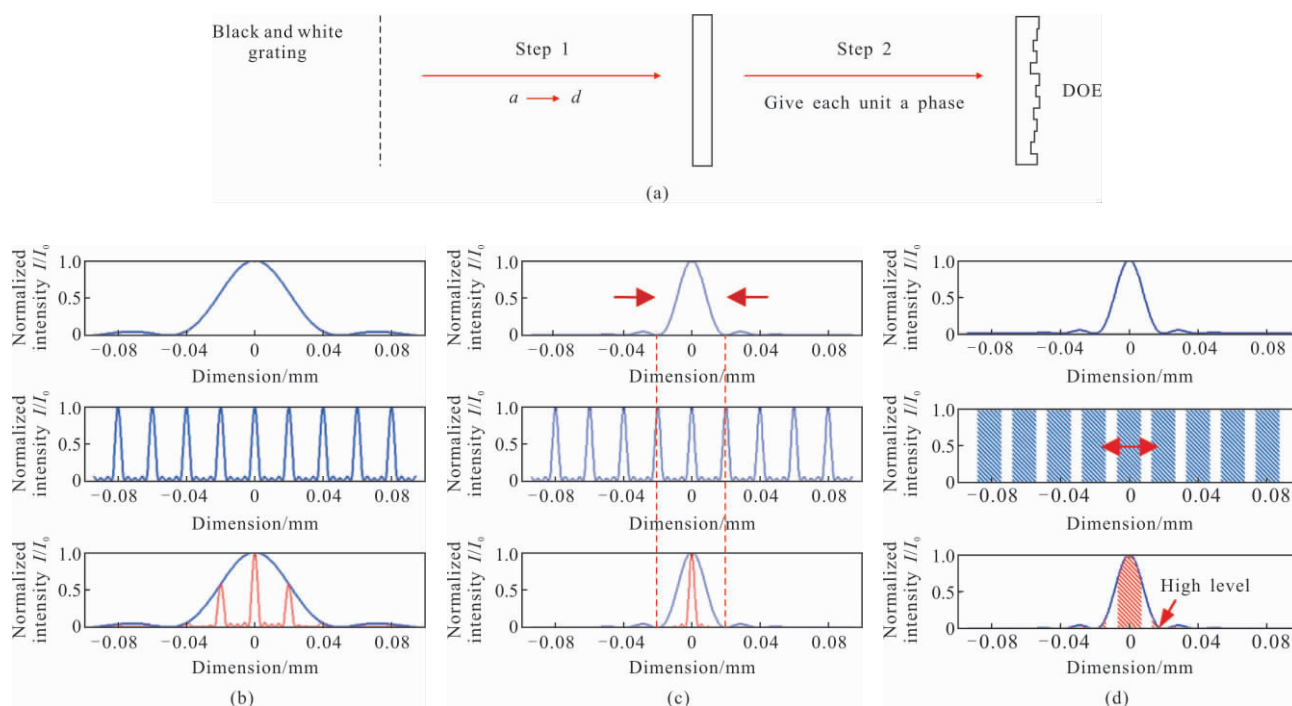


图 3 光栅转变为 DOE 特性分析图

Fig.3 Grating transition to DOE characterization analyzing chart

给 N 个宽度为 d 的透光单元赋予不同的位相值, 光栅结构就变为典型的 DOE 结构。DOE 单元位相的改变将引起各单元衍射光所形成的干涉条纹移动。因此不同于光栅的缝间干涉因子 DOE 各单元衍射光的干涉会形成较宽的衍射级, 但这些衍射级依然是周期性分布的并且周期不变。如图 3(d)所示, 双向箭头示意衍射级的展宽。通过适当的改变各单元的位相值, 可以在透镜的焦面上获得所需要的光强分布。另外, 由于衍射级的展宽, 单缝衍射因子的零点不能完全将高衍射级次 (>1 级) 压制到 0, 所以仍

然有高级次存在, 如图 3(d)箭头所示。

在光束变换 DOE 性能评价指标中, 衍射效率和均匀性是工程应用中的重要参数。因此重点是如何提高能量利用率及均匀性, 为此需要明确给出关于效率的定义。

若不考虑 DOE 对入射激光的吸收, 那么输入平面内所有抽样点光强之和等于输出平面内所有抽样点光强之和。这样能量利用率可定义为输出平面内目标范围内的光强值之和与整个输出平面内所有抽样点光强值之和的比值, 如公式(3)所示:

$$\eta_{\text{diff}} = \sum_{i,j \in U_{\text{goal}}} I_{ij} / \sum_{k=-\infty, l=-\infty}^{k=\infty, l=\infty} I_{k,l} \quad (3)$$

式中： η_{diff} 为衍射效率； I_{ij} 为单缝的入射光光强； U_{goal} 为整个周期单元个数； $I_{k,l}$ 干涉迭加后的总光强。光强分布非均匀性 M_{ms} 如公式(4)所示：

$$M_{\text{ms}} = \frac{\left[\frac{1}{N} \sum_{i,j \in U_{\text{goal}}} (I_{ij} - I_{\text{mean}})^2 \right]^{1/2}}{I_{\text{mean}}} \quad (4)$$

上文的分析中提到,DOE 单元衍射形成的光强分布形成一个包络,调制各个衍射级的光强。那么显然较小的单元所形成的包络更宽更平缓,包络的零点及其附近区域覆盖的范围会更大。对实际 DOE 器件的光斑大小或最大衍射角有明确的要求,并且这个要求与单元大小无关。于是在包络展宽时,DOE 光斑尺寸或最大衍射角相对于包络尺寸或衍射角所占的比例减小,但其能量所占的比例却会增加。具体情况如图 4 所示。图 4(a)、(b)分别为较大光场参数峰值 (PV) 和较小 PV 的 DOE 形成的光强分布示意图,虚线为包络,阴影为各衍射级的光强分布。可以看到,小单元产生的包络衍射角较大,而要求的光斑衍射角是固定的,所以高衍射级次受到的调制更明显,所占总能量的百分比下降,因而 1 级衍射的比例会上升,即衍射效率提高。同时,包络的展宽使得 1 级衍射的光强分布更加均匀,即均匀性提高。

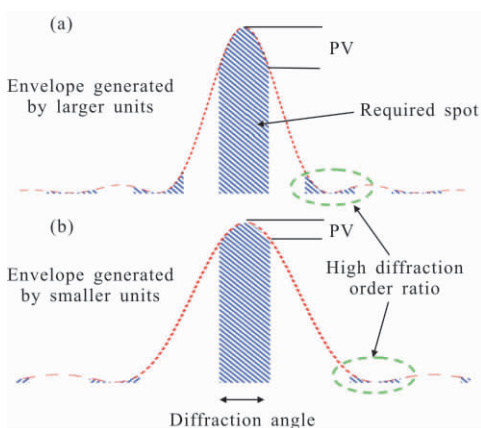


图 4 不同 PV 值 DOE 衍射场分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of DOE diffraction field distribution with different PV values

DOE 的各种迭代算法及优化算法均是建立在离散数据处理之上的。为了实现离散化,需对 DOE 表面轮廓连续函数进行抽样。根据抽样定理,离散抽样须满足抽样定理。因此建立在抽样定理基础上的

傅里叶变换与一般连续函数的变换就多了一个抽样函数,DOE 的相位函数 $\phi(x)$ 变为:

$$\phi(x) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \exp(i\varphi_{kj}) \text{rect} \left[\frac{x - \left(k - \frac{N}{2} - \frac{1}{2} \right) l}{l} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{y - \left(j - \frac{N}{2} - \frac{1}{2} \right) l}{l} \right] \quad (5)$$

式中： φ_{kj} 为衍射光学元件的位相； N 为阵列单元内的抽样点数； l 为抽样周期。

2 照明模式变换 DOE 的设计

193 nm 光刻机照明系统由光束传输单元、光束准直单元、照明模式变换单元和耦合光组等部件组成。衍射光学元件、变焦光组与锥镜棱镜组构成照明模式变换单元。从掩模面的要求出发,分析和计算耦合光组、匀场照明光学组件及扩束整形各部分之间的相互关系,最终给出照明模式变换 DOE 的设计要求(表 1)。

表 1 ArF 激光照明模式变换 DOE 性能参数

Tab.1 ArF laser illumination mode conversion DOE performance parameters

Item	Requirement
Wavelength/nm	193.368
Incident beam diameter/mm	30×30
Incident beam divergence angle/mrad	2×3
Maximum far field diffraction angle/(°)	±1.06(<i>r</i>)
Polar angle/(°)	30±1(four-pole) 35±1(two-pole)
Intensity homogeneity	≤ 6%
Energy efficiency	≥ 80%

以抽样线宽为 5 μm 的四极照明衍射光学元件为例,分别采用常规设计方法和基于离散抽样加密设计方法对照明模式变换 DOE 进行设计分析,揭示衍射效率和光强分布非均匀性的实际对应关系。

2.1 照明模式变换 DOE 常规设计

当抽样单元线宽 $\Delta=5 \mu\text{m}$ 时,照明模式变换 DOE 常规设计结果如图 5 所示,图 5(a)、(b)为未加密时 XY 平面和三维光强分布图,未加密时衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=89.3\%$,非均匀性为 $M_{\text{ms}}<4.8\%$ 。

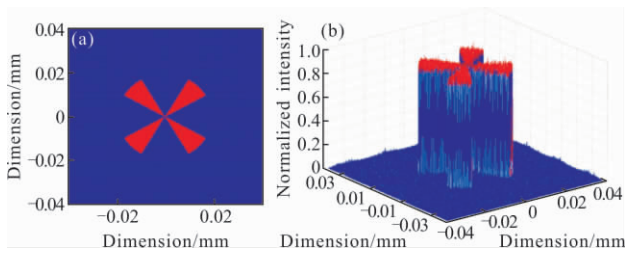


图 5 抽样线宽 $D=5\ \mu\text{m}$ 时常规设计结果

Fig.5 Traditional design results with sampling line width of $D=5\ \mu\text{m}$

2.2 基于离散抽样加密算法的 DOE 设计

采用 G-S 迭代算法和自适应迭代算法得到不同加密情况下, 抽样线宽为 $D=5\ \mu\text{m}$ 时的设计优化结果如图 6 所示。图 6(a)、(b)为 4 点加密时 XY 平面和三维光强分布图, 此时输出光场区域扩大为原来的 4 倍, 高级衍射级次出现, 实际衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=74.8\%$, 非均匀性 M_{ms} 值约为 5%~6%。图 6(c)、(d)为 9 点加密时 XY 平面和三维光强分布图, 此时输出场扩大为原来的 9 倍, 更多高级衍射级次出现, 实际衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=71\%$, 非均匀性 M_{ms} 值约为 10%。图 6(e)、(f)为 16 点加密时 XY 平面和三维光强分布图, 此时输出场扩大为原来的 16 倍, 更多高级衍射级次出现, 二级衍射光斑出现。实际衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=69.1\%$, 非均匀性 M_{ms} 值约为 15%~16%。由于大于三级的高级衍射级所占能量很小, 继续增加插值点数, 衍射效率将趋于稳定。图 6(g)、(h)为 25 点加密时 XY 平面和三维光强分布图, 实际衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=69\%$, 非均匀性 M_{ms} 值约为 17%~18%。图 6(i)、(j)为 36 点加密时 XY 平面和三维光强分布图。实际衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=68.8\%$, 非均匀性 M_{ms} 值约为 18%。

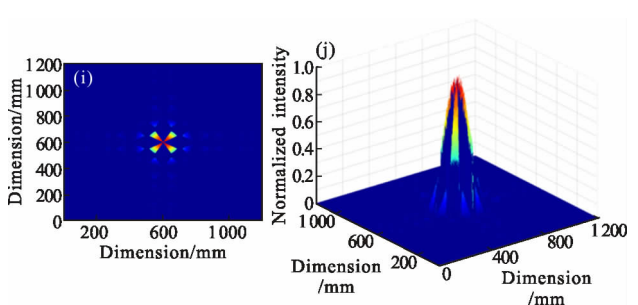
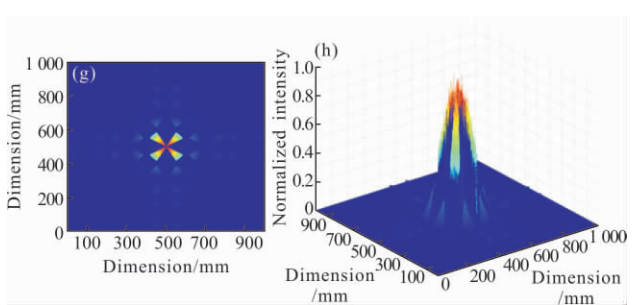
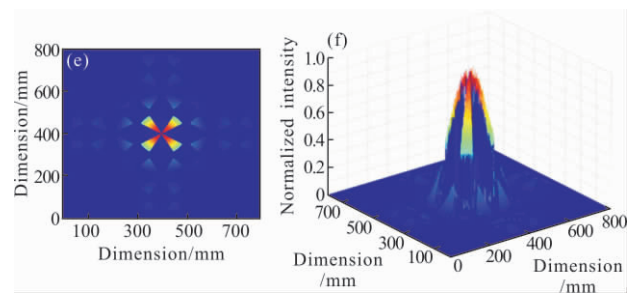
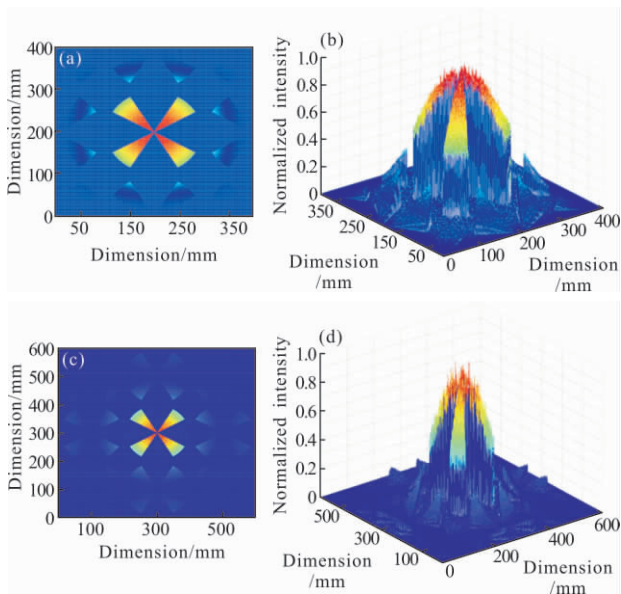


图 6 抽样线宽 $D=5\ \mu\text{m}$ 时设计优化结果

Fig.6 Design optimization results with sampling line width of $D=5\ \mu\text{m}$

研究表明: 照明模式变换 DOE 采用的是傅里叶变换而傅里叶变换为么正变换, 那么一旦输入平面内的抽样尺寸确定, 则输出平面内的计算区域也就确定。DOE 实际使用时的衍射效率为目标光斑内所有抽样点光强之和与整个输出面光强之和的比值, 但仅仅采用常规设计方法不能计算出整个输出面光强之和, 因此不能有效指导照明模式变换系统 DOE 的设计。文中提出的基于离散抽样加密算法旨在对输入场进行精细化处理, 减小采样间隔, 对迭代优化设计的 DOE 相位函数进行加密, 获取更多的高级次衍射及输出光场范围。明确 DOE 特征尺寸、衍射效率和光强分布非均匀性的实际对应关系, 使加工器件在不考虑加工误差的情况下能够与设计要求吻合。

加密后的衍射效率是指主衍射级次能量 E_2 与像面位置总能量 E_1 的比值如公式(6)所示, 离散抽样加密算法的主要步骤如图 7 所示。

$$\eta = \frac{E_2}{E_1} \quad (6)$$

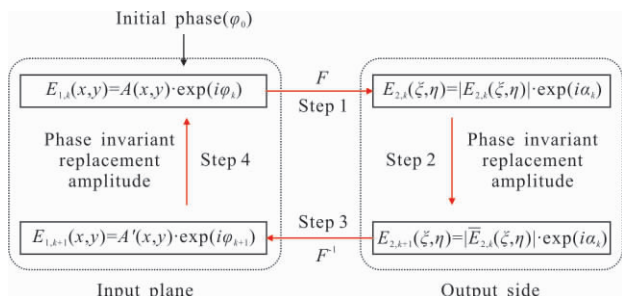


图 7 离散抽样加密算法迭代循环的主要步骤示意图

Fig.7 Schematic diagram of the main steps in the iterative loop of the discrete sampling encryption algorithm

根据以上分析可知，当抽样线宽为 $4.0 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \mu\text{m}$ 时通过 25 点加密后的设计优化结果如图 8(a) 和(b)所示,实际衍射效率 η_{diff} 分别为 73.3%和 87.27%, 抽样线宽为 $4.0 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \mu\text{m}$ 时通过 25 点加密后 M_{RMS} 值分别为 13.4%和 4.9%。

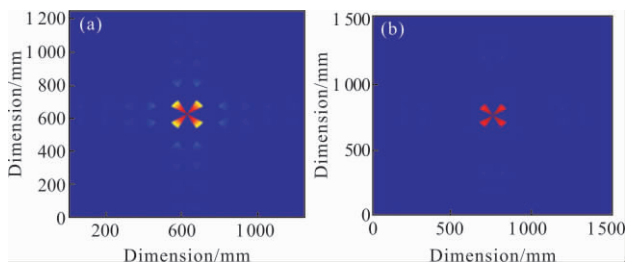


图 8 抽样线宽为 $4 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 时设计优化结果

Fig.8 Design optimization results with sample line width of $4 \mu\text{m}$ and $2 \mu\text{m}$

当抽样线宽为 $1 \mu\text{m}$ 的设计优化结果如图 9 所示。图 9(a)为未加密时 XY 平面光强分布,衍射效率 $\eta_{\text{diff}}=89.3\%$, 非均匀性为 $M_{\text{rms}}=1.1\% \sim 1.2\%$, 通过 25 点加密后 XY 平面光强分布图 9(b)所示,衍射效率 η_{diff} 为 89.3% , 非均匀性为 $M_{\text{rms}}=1.4\%$ 。随着抽样线宽的减小,

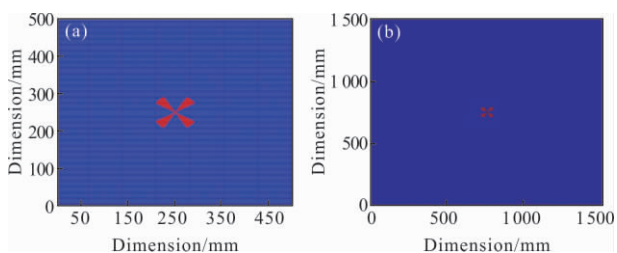


图 9 抽样线宽为 $1 \mu\text{m}$ 的设计优化结果

Fig.9 Design optimization results with sampling line width of $1 \mu\text{m}$

整形光束的衍射效率和均匀性将得到较大提高。

综合以上研究分析，不同特征尺寸下四极照明衍射光学元件能量利用率如表 2 所示。实际衍射效率、光强非均匀性与抽样单元的关系如图 10 所示。

表 2 不同特征尺寸下四极照明 DOE 的能量利用率

Tab.2 Energy utilization efficiency of four-pole lighting DOE under different feature sizes

Minimum feature size/ μm	Diffraction efficiency
5	68.6%
4	73.3%
3	79.7%
2.5	83.5%
2	85%–87%
1.76	86.6%
1	88.3%

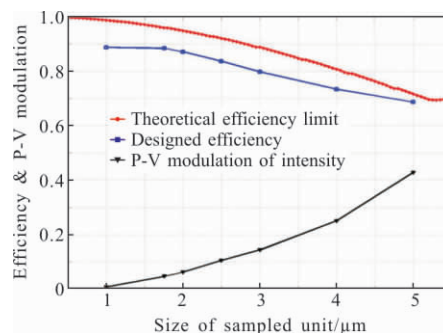


图 10 实际设计衍射效率、光强非均匀性与抽样单元关系

Fig.10 Actual design diffraction efficiency, intensity non-uniformity and sampling unit

当设计线宽小于 $2 \mu\text{m}$ 时，衍射效率均大于 85%，并且变化比较平缓，非均匀性也满足小于 5% 的设计要求。此时衍射效率与极限值之差将增大，主要原因是非目标区域所占的角度空间比例增大所致。进一步减小线宽对提高衍射效率作用不明显。且此时对加工工艺提出了很高的要求，所以应综合考虑到制作成品率及制作难度，故最终设计图形区域 $30 \text{mm} \times 30 \text{mm}$ ，阵列数为 20×20 ，阵列单元内的抽样点数为 850×850 ，抽样单元线宽 $D=1/3D_{\text{max}}$ ，即 $D=1.76 \mu\text{m}$ 。通过 4 点加密后，不同照明模式下 $D=1.76 \mu\text{m}$ 的变换 DOE 整形光强二维和三维分布如图 11 所示。其衍射效率与光强分布非均匀性如表 3 所示，满足设计要求。

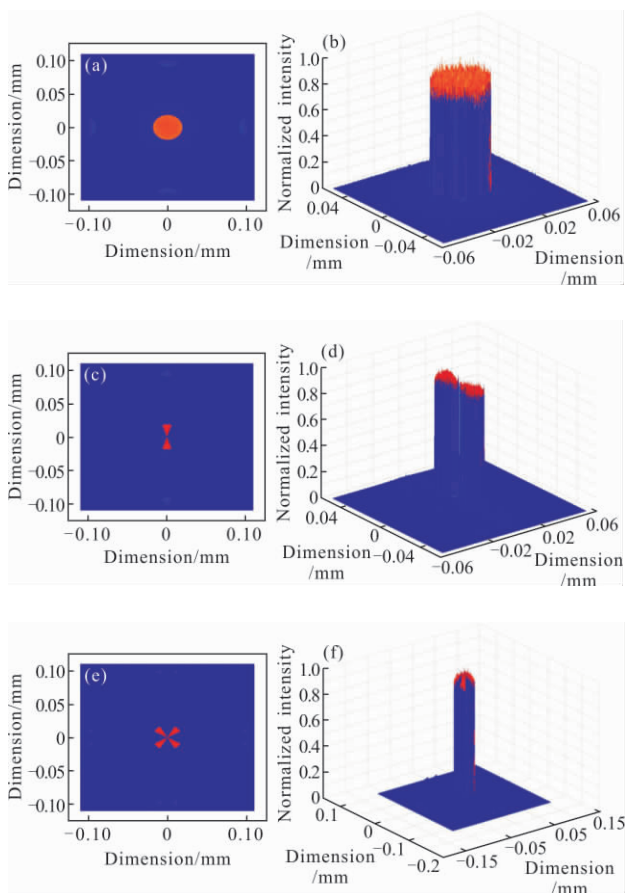


图 11 $D=1.76 \mu\text{m}$ 照明模式变换 DOE 设计光强分布
Fig.11 $D=1.76 \mu\text{m}$ illumination mode transform DOE design intensity distribution

表 3 抽样线宽 $1.76 \mu\text{m}$ 的照明模式变换 DOE 的设计优化结果

Tab.3 Design optimization results of illumination mode conversion DOE with $1.76 \mu\text{m}$ sampling line width

	Traditional model	Diode model	Quadrupole model
Diffraction efficiency	89.2%	90.2%	88.6%
Intensity homogeneity	5.1%	2.8%	1.4%

3 照明模式变换 DOE 的制备

根据仿真实验参数,采用接近接触式曝光机完成了抽样线宽 $1.76 \mu\text{m}$ 的照明模式变换器元件成品的制作,除开关键单元技术和工艺稳定性控制技术

需要单独攻克之外,一次完整的工艺流程需要 55 个步骤。其中,因衍射光学元件的台阶数为 16,该 16 个台阶需要通过四次光刻,四次刻蚀获得,具体工艺实现过程如图 12 所示,所制备的 DOE 样品和衍射区显微图如图 13(a)和图 13(b)所示。对于照明模式变换 DOE 的研制,需要控制的几个重要参数包括:套刻误差、刻蚀深度误差和图形畸变,DOE 加工误差参数分析如表 4 所示。

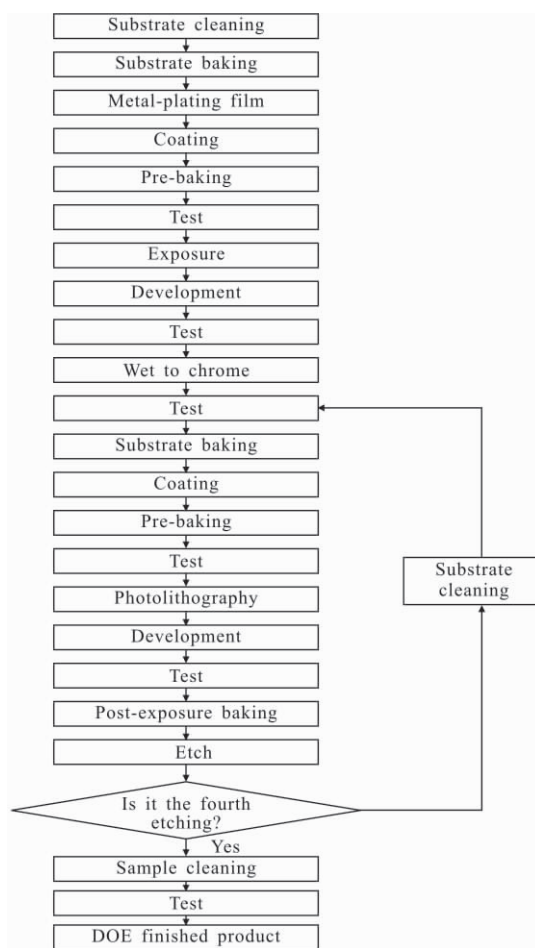


图 12 照明模式变换 DOE 的研制工艺流程

Fig.12 Illumination mode transformation DOE development process

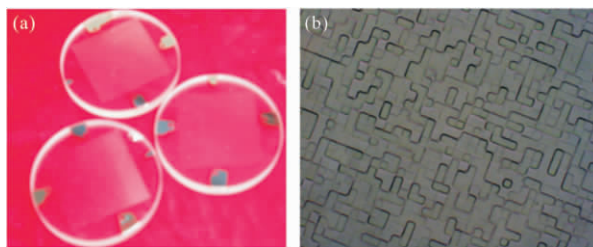


图 13 照明模式变换 DOE

Fig.13 Illumination mode transform DOE

表 4 DOE 加工误差参数

Tab.4 DOE machining error parameters

Parameters	Numerical
Unit size/ μm	1.76
Etch depth error/nm	± 5
Set time error/ μm	± 0.1
Rounded corners of the unit/ μm	0.3
Line width/ μm	0.08

4 照明模式变换DOE 的性能测试

搭建了照明模式变换 DOE 的测试平台如图 14 所示, 采用 193.368 nm 准分子激光器, 光束发散角 $0.1\text{ mrad}\times 0.1\text{ mrad}$, 最大远场衍射角 $\pm 1.06^\circ$ 。得到 16 台阶的不同照明模式 DOE 整形光斑分布如图 15 所示, 图中的方形亮斑为 CCD 滤波片损伤所致非 DOE 的实际光斑。

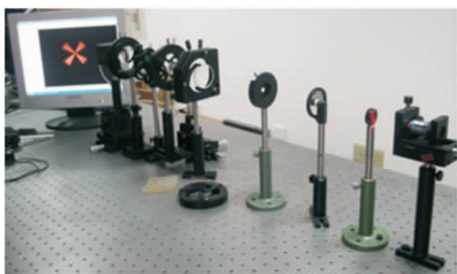


图 14 衍射元件测试平台

Fig.14 Diffraction element test platform

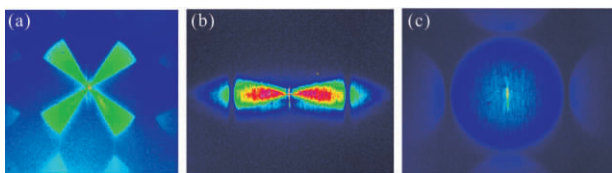


图 15 衍射元件的光学实验测试结果

Fig.15 Optical test results of diffraction elements

根据测试结果, 三种照明模式下的照明变换器的衍射效率与光强分布非均匀性如表 5 所示。

表 5 照明模式变换器的性能测试结果

Tab.5 Results of illumination mode converter performance

Parameters	Intensity homogeneity	Diffraction efficiency
Quadrupole model	5.6%	80.1%
Diode model	4.8%	81.3%
Traditional model	5.2%	82.9%

5 结论

文中为明确浸没式光刻照明模式变换 DOE 特征尺寸、衍射效率和光强分布非均匀性之间的实际对应关系, 提出离散抽样加密算法, 设计了图形区域 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, 阵列数为 20×20 , 抽样单元线宽为 $1.76\ \mu\text{m}$ 的照明模式变换 DOE。并通过实验验证了设计的正确性及可行性。研究结果表明, 由于受到加工误差的限制, 该 DOE 实测值略低于设计值, 但利用离散抽样加密算法设计的 DOE 仍能满足浸没式光刻照明系统对照明模式的需求, 并具有较高的衍射效率和照明均匀性, 在 DOE 设计加工、工程化领域具有一定应用价值。

参考文献:

- [1] Hu Zhonghua, Zhu Jing, Yang Baoxi, et al. Far-field multi-parameter measurement of diffractive optical element for pupilshaping in lithography system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0908001. (in Chinese)
胡中华, 朱菁, 杨宝喜, 等. 光刻机光瞳整形衍射光学元件远场多参数检测方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0908001.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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)
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2081-2086.
- [5] 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)
宋强, 朱菁, 王健. 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0122005.
- [6] Zhang Wei, Liang Chuanyang, Li Jin, et al. Design of optical elements for beam shaping and unigorm illumination in laser digital projection display system [J]. *Acta Optica Sinica*,

- 2015, 35(1): 0805001. (in Chinese)
- 张巍, 梁传祥, 李金, 等. 用于激光数字投影显示系统的匀光整形元件设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0805001.
- [7] Li Meixuan, Dong Lianhe. Light mode converter design in immersion lithography lighting system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0618002. (in Chinese)
- 李美萱, 董连和. 浸没式光刻照明系统的照明模式变换器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0618002.
- [8] 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)
- 包海廷, 欧阳名钊, 王志勇, 等. 基于 DOE 的标识光场整形系统设计[J]. 长春理工大学学报, 2017, 40(2): 27–32.
- [9] 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): 013506–013510.
- [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)
- 张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件的矢量分析[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005002.
- [11] Xing Shasha, Ran Yinghua, Jiang Haibo, et al. Illumination mode conversion system design based on micromirror array in lithography design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 102–111. (in Chinese)
- 邢莎莎, 冉英华, 江海波, 等. 基于微反射镜阵列的光刻照明模式变换系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 102–111.