



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103676498 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 26

(21) 申请号 201310576235. 0

G02B 27/00 (2006. 01)

(22) 申请日 2013. 11. 18

(71) 申请人 中国科学院上海光学精密机械研究所

地址 201800 上海市嘉定区 800 — 211 邮政信箱

(72) 发明人 司徒国海 蔡燕民 黄惠杰
王向朝

(74) 专利代理机构 上海新天专利代理有限公司
31213

代理人 张泽纯

(51) Int. Cl.

G03F 7/20 (2006. 01)

G02B 27/09 (2006. 01)

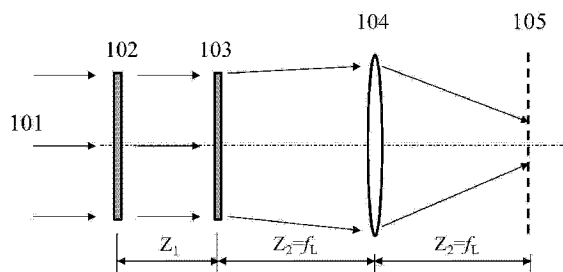
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

光刻机光瞳整形单元结构及其衍射光学元件设计方法

(57) 摘要

一种光刻机光瞳整形单元结构及其衍射光学元件的设计方法, 光瞳整形单元包括级联衍射光学元件和变焦距准直透镜组。级联衍射光学元件包括第一衍射光学元件和第二衍射光学元件, 这两片衍射光学元件的通光表面均垂直于照明系统光轴, 这两片衍射光学元件均为纯位相元件。所述的级联衍射光学元件的设计方法, 包括以下步骤: 相位单元周期的计算; 入射光束和确定所需光束的光强分布并进行离散化处理; 对第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的初始位相矩阵进行赋值; 采用迭代算法, 并进行量化处理, 得到第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的量化位相矩阵; 评估设计结果。



1. 一种光刻机光瞳整形单元结构,包括级联衍射光学元件和变焦距准直透镜组,其特征在于,所述的级联衍射光学元件包括第一衍射光学元件和第二衍射光学元件,所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的通光表面均垂直于照明系统光轴,所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件均为相位调制型的衍射光学元件,第一衍射光学元件对入射光束的相位进行预调制后传输至第二衍射光学元件,第二衍射光学元件对预调制后的光束进一步调制传输至变焦距准直透镜组,在变焦距准直透镜组的后焦面上得到所需要的照明模式,所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的通光口径均不小于入射光束的直径,所述的第二衍射光学元件位于变焦距准直透镜组的前焦面。

2. 权利要求1所述的光瞳整形单元的级联衍射光学元件的设计方法,其特征在于包括第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的设计方法,该方法包括下列步骤:

①确定系统参数:包括激光波长 λ 、级联衍射光学元件的通光口径 L 、输出全孔径角 2θ 和变焦距准直透镜组的焦距变化范围 $f_1 \sim f_2$;

②计算相位单元周期;

③入射光束和确定所需光束的光强分布并进行离散化处理;

④对第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的初始位相矩阵 $\phi_1^0(x_1, y_1)$ 进行赋值;

⑤采用迭代算法计算所述的第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的位相矩阵并进行量化处理,得到第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的量化位相矩阵;

⑥评估设计结果。

3. 根据权利要求2所述的级联衍射光学元件的设计方法,其特征在于所述的第一衍射光学元件初始位相矩阵 $\phi_1^0(x_1, y_1)$ 进行赋值的方法,是首先对矩阵 $I_t(u, v) \exp[i\varphi^0(u, v)]$ 进行傅里叶逆变换到第二衍射光学元件平面,得到矩阵 $Q^0(x_2, y_2)$, 该过程在数学上描述为 $Q^0(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1}\{I_t(u, v) \exp[i\varphi^0(u, v)]\}(x_2, y_2)$, 其中 $\varphi^0(u, v)$ 是一个随机位相矩阵,其元素个数与 I_t 相同,其初始位相赋值方法与所述的第一衍射光学元件的初始相位赋值方法相同, $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 是傅立叶逆变换,其算法是该领域的技术人员所公知;再对 $Q^0(x_2, y_2) \exp[-i\phi_2^0(x_2, y_2)]$ 作传播距离为 Z_1 的菲涅耳变换进行处理得到矩阵 $P^0(x_1, y_1)$, 记为 $P^0(x_1, y_1) = \mathcal{P}\{Q^0(x_2, y_2) \exp[-i\phi_2^0(x_2, y_2)], -Z_1\}(x_1, y_1)$, 其中 $-Z_1$ 是所述的第一衍射光学元件和所述的第二衍射光学元件之间的距离, $\mathcal{P}\{, Z_1\}$ 表示传播距离为 Z_1 的菲涅耳变换,所述的第一衍射光学元件初始位相 $\phi_1^0(x_1, y_1) = \arg\{P^0(x_1, y_1)\}$, 其中 $\arg\{\}$ 表示求解复矩阵 P^0 个元素的位相矩阵。

4. 根据权利要求2所述的级联衍射光学元件的设计方法,其特征在于所述的迭代算法包括以下步骤:

(1) 计算 $R^{k+1}(x_2, y_2) = \mathcal{P}\{I_0(x_1, y_1) \exp[i\phi_1^k(x_1, y_1)], Z_1\}$, 其中 k 表示迭代次数,初始值为0;

(2) 计算 $S^{k+1}(u, v) = \mathcal{F}\{R^{k+1}(x_2, y_2) \exp[i\phi_2^k(x_2, y_2)]\}$, 其中 $\mathcal{F}\{\}$ 是傅立叶变换;

(3) 计算 $Q^{k+1}(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1}\{I_t(u, v) \exp[i\arg\{S^{k+1}(u, v)\}]\}$;

(4) 计算 $\phi_2^{k+1}(x_2, y_2) = \arg\{Q^{k+1}(x_2, y_2)\} - \arg\{R^{k+1}(x_2, y_2)\}$;

(5) 计算 $P^{k+1}(x_1, y_1) = \mathcal{P}\{Q^{k+1}(x_2, y_2) \exp[-i\phi_2^{k+1}(x_2, y_2)], -Z_1\}$

(6) 计算 $\phi_1^{k+1}(x_1, y_1) = \arg\{P^{k+1}(x_1, y_1)\}$;

(7) 重复上述步骤 (1) 到步骤 (6), 直到求出 ϕ_2 和 ϕ_1 为止。

5. 根据权利要求 4 所述的级联衍射光学元件的设计方法, 其特征就在于所述的迭代过程中, 判断步骤 (2) 中 S^{k+1} 落在所需光强分布区域的能量占入射光总能量的比例是否满足要求 (即 $\geq 90\%$), 否则重复上述替换和变换过程, 直到满足要求时结束迭代过程。

6. 根据权利要求 4 所述的级联衍射光学元件的设计方法, 其特征就在于所述的量化处理, 是将 0 到 2π 区间的位相数值依据“就近赋值”的原则变为几个等间隔的位相值, 根据所述的位相分布矩阵 ϕ_1 和 ϕ_2 赋值给所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件, 形成量化位相分布。

7. 根据权利要求 2 所述的级联衍射光学元件的设计方法, 其特征就在于所述的评估是指计算输出光强分布的衍射效率 (ε) 和非均匀性 (σ), 并和所需要的光强分布指标进行对比, 如果结果不满足指标要求, 则重新设置初始位相, 并重复上述计算步骤, 直到满足指标要求为止, 评估中所用到的参数, 衍射效率 (ε) 的定义为:

$$\varepsilon = E_{\text{signal}}/E_{\text{out}} \times 100\%$$

其中, E_{signal} 是落在所需区域中的光能量, E_{out} 是输出光的总能量;

评估中计算非均匀性时, 首先需要选取评估区域, 选取方法通常是去除所需光强分布区域的一部分边缘后, 用剩下区域进行非均匀性的评估, 评估方法采用均方根误差方式, 表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \mu) / \mu)^2}$$

其中, x_i 为选取区域中的每个位置的光强值, 是 I_t 矩阵中相应单元的数值; N 为选取区域中包含的位置总数, 即所包含矩阵单元的数目; μ 为此 N 个位置的光强平均值。

光刻机光瞳整形单元结构及其衍射光学元件设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光刻机,特别是一种光刻机光瞳整形单元结构及其衍射光学元件设计方法。

背景技术

[0002] 光刻机的照明系统中,需要采用离轴照明模式以增强光刻分辨率、增加焦深、改善光刻图形对比度,从而提高光刻图形质量。光刻机照明系统中光瞳整形单元需要提供传统照明(即轴上照明模式),及环形照明、二极照明、四极照明等离轴照明模式。光瞳整形单元中的衍射光学元件(Diffractive Optical Element,简称为 DOE),与变焦距准直透镜组配合实现所述的多种照明模式。DOE 具有衍射效率高、设计灵活等优点。为了改善光刻线宽(Critical Dimension,CD)控制能力,提升线条边缘粗糙度(Line Edge Roughness,LER)和线宽粗糙度(Line Width Roughness, LWR),光刻机离轴照明模式的光瞳面上光强分布,应该满足散斑噪声低、非均匀性优良、光能利用率高的要求。设计满足上述离轴照明模式要求的 DOE 是本领域技术人员应该重点考虑的问题。

[0003] 目前,传统 DOE 的设计方法主要是基于盖师贝格-撒克斯通(Gerchberg-Saxton, G-S)迭代算法实现(参见 Optik, 35, 237-246, 1972)。为了提高 DOE 的光学性能,研究人员对 G-S 迭代算法提出了多种改进方案(参见 Applied optics, 21, 2758-2769, 1982; Applied Optics, 28, 3864, 1989; J. Opt. Soc. Am. A, 7, 961-969, 1990)。这些改进方案对于提高迭代算法的收敛速度、改进 DOE 的光学性能有所帮助。例如,通过扩大远场衍射区域在迭代计算中的空间尺度,明显有助于降低 DOE 的散斑噪声和提高非均匀性。但是,采用这种方法要求减小 DOE 的单元周期、增加单元数目,而对于光刻机工作波长在深紫外波段的 DOE,增大了设计和加工的难度。增加 DOE 单元数目将大幅度增加计算迭代优化时间,同时,减小 DOE 单元周期将提高加工精度要求,目前主流的 DOE 加工工艺难以保证。

[0004] 中国专利 CN1790094A “消除激光散斑的照明系统以及使用该照明系统的投影系统”,公开了一种包括激光器和衍射光学元件的照明系统。该照明系统将激光器发出的激光束分为子光束,并且将所述子光束在时间或空间上进行平均,由此有效地减小或去除激光散斑影响。该方法是采用光纤将激光束进行分束,但是,由于光纤输出光束有较大的发散角,照射在衍射光学元件会引起光场塌边现象,影响照明光瞳的非均匀性,无法应用于实际的深紫外光刻机照明系统。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服上述在先技术的不足,提供一种光刻机光瞳整形单元结构及其衍射光学元件设计方法,该光瞳整形单元结构具有光瞳非均匀性优良和光能利用率高的优点,并且沿用传统的 DOE 加工工艺,有利于保证 DOE 的加工质量。适用于任何紫外波段的级联 DOE 的设计,例如,248nm 波长、193nm 波长、365nm 波长等。

[0006] 本发明的技术解决方案如下:

[0007] 一种光刻机光瞳整形单元结构,包括级联衍射光学元件和变焦距准直透镜组,其特点在于所述的级联衍射光学元件包括第一衍射光学元件和第二衍射光学元件,所述的两片衍射光学元件的通光表面均垂直于照明系统光轴,所述的两片衍射光学元件均为相位调制型的衍射光学元件,第一衍射光学元件对入射光束的相位进行预调制后传输至第二衍射光学元件,第二衍射光学元件对预调制后的光束进一步调制传输至变焦距准直透镜组,在变焦距准直透镜组的后焦面(此面与光刻机光瞳面共轭))上得到所需要的照明模式。

[0008] 所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的通光口径均不小于入射光束的直径。

[0009] 所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件之间的距离,选取在 10mm ~ 30mm 之间,所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件之间的光束传输物理本质符合“角谱衍射理论”(李俊昌等编著,《信息光学教程》,第 22-23 页,科学出版社,2011)。

[0010] 所述的第二衍射光学元件位于变焦距准直透镜组的前焦面,所述的变焦距准直透镜组利用其焦距的改变,来调节所需要的光瞳面上光强分布图形的尺寸。

[0011] 一种光刻机光瞳整形单元结构中级联衍射光学元件的设计方法,包括第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的设计方法,首先需要确定系统参数,包括激光波长 λ ,级联衍射光学元件的通光口径 L ,输出全孔径角 2θ ,变焦距准直透镜组的焦距变化范围 $f_1 \sim f_2$,所述的级联衍射光学元件的设计方法,包括以下步骤:

[0012] (1) 相位单元周期的计算;

[0013] (2) 入射光束和确定所需光束的光强分布并进行离散化处理;

[0014] (3) 对第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的初始位相矩阵进行赋值;

[0015] (4) 采用迭代算法,并进行量化处理,得到第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的量化位相矩阵;

[0016] (5) 评估设计结果。

[0017] 所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的相位单元周期相同,都以 1 表示,可以依据夫琅和费衍射定理通过下式得到:

$$[0018] \quad 1 \leq \lambda / \sin(2\theta)$$

[0019] 其中, λ 为入射光的波长, 2θ 为所述第二衍射光学元件的输出全孔径角。根据相位单元周期 1、DOE 通光口径 L 可以求得相位单元在一个方向上的单元数量 N :

$$[0020] \quad N=L/1$$

[0021] 所述的入射光束的截面光强分布通常是二维高斯分布,采用二维高斯函数得到入射光强分布 $I_0(x_1, y_1)$:

$$[0022] \quad I_0(x_1, y_1) \propto \exp\left[-\left(\frac{x_1^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y_1^2}{2\sigma_y^2}\right)\right]$$

[0023] 其中, x_1 和 y_1 定义为入射平面(即第一衍射光学原件所在平面)水平(X轴)方向和竖直(Y轴)方向的坐标, σ_x 和 σ_y 分别是入射光束在 X 轴和 Y 轴方向的束腰半径, X 轴和 Y 轴定义为平行于所述的衍射光学元件两个正交方向,这两个坐标轴所定义的坐标平面与照明系统的光轴垂直。

[0024] 所述的光刻机照明系统所需要的光瞳面光强分布为:圆形分布、环形分布、二极分布、四极分布、客户所需分布,在这里表示为 $I_t(u, v)$,表达式中 u 和 v 定义为光瞳面上 X 轴

方向和 Y 轴方向的坐标。I_t 的矩阵大小与 I₀ 一致。所述的光瞳面光强分布形式是该领域的公知技术。

[0025] 所述的光瞳面光强分布的离散化处理是用计算机对矩阵进行二维扫描, 为每个单元逐一赋值。

[0026] 所述的第二衍射光学元件初始位相矩阵 ϕ_2^0 赋值的方法, 是给该矩阵的每个元素 $\phi_2^0(x_2, y_2)$ 逐一地随机赋上 0 到 2π 区间中的一个位相值, 使其分布满足均匀分布、高斯分布、或者任意其它统计分布。所述的统计分布是该领域的技术人员所公知。

[0027] 所述的第一衍射光学元件初始位相矩阵 $\phi_1^0(x_1, y_1)$ 赋值的方法, 是首先对矩阵 $I_t(u, v)\exp[i\phi^0(u, v)]$ 进行傅里叶逆变换到第二衍射光学元件平面, 得到矩阵 $Q^0(x_2, y_2)$, 该过程在数学上描述为 $Q^0(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1}\{I_t(u, v)\exp[i\phi^0(u, v)]\}(x_2, y_2)$, 其中 $\phi^0(u, v)$ 是一个随机位相矩阵, 其元素个数与 I_t 相同, 其初始位相赋值方法与所述的第一衍射光学元件的初始相位赋值方法相同, $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 是傅立叶逆变换, 其算法是该领域的技术人员所公知; 再对 $Q^0(x_2, y_2)\exp[-i\phi_2^0(x_2, y_2)]$ 作传播距离为 Z₁ 的菲涅耳变换进行处理得到矩阵 $P^0(x_1, y_1)$, 记为 $P^0(x_1, y_1) = \mathcal{P}\{Q^0(x_2, y_2)\exp[-i\phi_2^0(x_2, y_2)], -Z_1\}(x_1, y_1)$, 其中 -Z₁ 是所述的第一衍射光学元件和所述的第二衍射光学元件之间的距离, $\mathcal{P}\{, Z_1\}$ 表示传播距离为 Z₁ 的菲涅耳变换, 其算法为该领域的技术人员所公知。所述的第一衍射光学元件初始位相 $\phi_1^0(x_1, y_1) = \arg\{P^0(x_1, y_1)\}$, 其中 $\arg\{\}$ 表示求解复矩阵 P⁰ 每个元素的位相。

[0028] 所述的迭代算法包括以下步骤:

[0029] (4-1) 计算 $R^{k+1}(x_2, y_2) = \mathcal{P}\{I_0(x_1, y_1)\exp[i\phi_1^k(x_1, y_1)], Z_1\}$, 其中 k 表示迭代次数, 初始值为 0;

[0030] (4-2) 计算 $S^{k+1}(u, v) = \mathcal{F}\{R^{k+1}(x_2, y_2)\exp[i\phi_2^k(x_2, y_2)]\}$, 其中 $\mathcal{F}\{\}$ 是傅立叶变换;

[0031] (4-3) 计算 $Q^{k+1}(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1}\{I_t(u, v)\exp[i\arg\{S^{k+1}(u, v)\}]\}$;

[0032] (4-4) 计算 $\phi_2^{k+1}(x_2, y_2) = \arg\{Q^{k+1}(x_2, y_2)\} - \arg\{R^{k+1}(x_2, y_2)\}$;

[0033] (4-5) 计算 $P^{k+1}(x_1, y_1) = \mathcal{P}\{Q^{k+1}(x_2, y_2)\exp[-i\phi_2^{k+1}(x_2, y_2)], -Z_1\}$

[0034] (4-6) 计算 $\phi_1^{k+1}(x_1, y_1) = \arg\{P^{k+1}(x_1, y_1)\}$;

[0035] (4-7) 重复上述步骤 (4-1) 到 (4-6), 直到求出 ϕ_2 和 ϕ_1 为止。

[0036] 迭代过程中, 判断步骤 (4-2) 中 S^{k+1} 落在所需光强分布区域的能量占入射光总能

量的比例是否满足要求(即 $\geq 90\%$),否则重复上述替换和变换过程,直到满足要求时结束迭代过程。

[0037] 如果遇到无法满足设定光强分布要求的情况,那么通过设置最大迭代次数来结束当前迭代过程,并重新设置初始位相,以开始新的迭代过程。

[0038] 最后可以得到满足期望的输出光强分布矩阵 I_t 的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件的位相分布矩阵 ϕ_1 和 ϕ_2 。

[0039] 所述的量化处理,是将 0 到 2π 区间的位相数值依据“就近赋值”的原则变为几个等间隔的位相值,根据所述的位相分布矩阵 ϕ_1 和 ϕ_2 赋值给所述的第一衍射光学元件和第二衍射光学元件,形成量化位相分布。所述的量化处理,可以在所述的迭代算法步骤(4-4)和(4-6)中实现,也可以在所述的迭代算法结束后单独统一处理。所述的量化位相分布通常为,例如,二台阶、四台阶、八台阶、十六台阶等结构赋值方式。以所述的八台阶结构为例,其赋值分别为 0 、 $2\pi/8$ 、 $4\pi/8$ 、 $6\pi/8$ 、 $8\pi/8$ 、 $10\pi/8$ 、 $12\pi/8$ 和 $14\pi/8$ 八种位相数值。

[0040] 所述的评估是指计算输出光强分布的衍射效率(ε)和非均匀性(σ),并和所需要的光强分布指标进行对比,如果结果不满足指标要求,则重新设置初始位相,并重复上述计算步骤,直到满足指标要求为止。评估中所用到的参数,衍射效率(ε)的定义为:

$$[0041] \quad \varepsilon = E_{\text{signal}}/E_{\text{out}} \times 100\%$$

[0042] 其中, E_{signal} 是落在所需区域中的光能量, E_{out} 是输出光的总能量。

[0043] 其次,计算非均匀性时,首先需要选取评估区域,选取方法通常是去除所需光强分布区域的一部分边缘后,用剩下区域进行非均匀性的评估,评估方法采用均方根误差方式,表示为:

$$[0044] \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \mu) / \mu)^2}$$

[0045] 其中, x_i 为选取区域中的每个位置的光强值,是 I_t 矩阵中相应单元的数值; N 为选取区域中包含的位置总数,即所包含矩阵单元的数目; μ 为此 N 个位置的光强平均值。

[0046] 所述的变焦距准直透镜组的设计方法是本领域技术人员所公知的,参见专利 CN1474235A。

[0047] 所述的光瞳整形单元通过调节所述的变焦距准直透镜组的焦距来实现相干因子的调节。

[0048] 与在先技术相比,本发明具有下列技术优点:

[0049] (1) 本发明所述的级联衍射光学元件为实现光瞳整形提供了更多的设计自由度,能够实现比现有技术更高的衍射效率和更好的非均匀性;

[0050] (2) 本发明所述的级联衍射光学元件,无需增加衍射光学元件的单元数量和减小单元周期,降低了设计和加工的难度。同时,级联衍射光学元件可以利用现有的光刻工艺进行加工,具有加工成熟、加工精度容易保证的优点。

附图说明

[0051] 图1是本发明光刻机光瞳整形单元的光路结构示意图。

[0052] 图2是本发明一个衍射光学元件的截面示意图。

[0053] 图3是在先技术设计的四极照明的结果图。

[0054] 图 4 是本发明设计的四极照明的结果图。

[0055] 图 5 是采用本发明光瞳整形单元的光刻机照明系统的光路图。

具体实施方式

[0056] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的说明,但不应以此限定本发明的保护范围。

[0057] 先请参阅图 1,图 1 是本发明的光刻机光瞳整形单元的光路结构示意图,用于产生紫外光刻机中所需的光瞳面光强分布。由图 1 可知,光瞳整形单元包括第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103,以及变焦距准直透镜组 104。入射光束 101 经过通光表面设置为垂直于照明系统光轴的第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 后,照射在变焦距准直透镜组 104 上,所述的两片衍射光学元件均为相位调制型衍射光学元件,第一衍射光学元件 102 对入射光束的位相进行预调制后传输至第二衍射光学元件 103;第二衍射光学元件 103 对预调制后的光束进一步调制后,传输至变焦距准直透镜组 104 的后焦面 105 (此面与光刻机光瞳面共轭) 上,得到所需的照明模式。

[0058] 第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 的通光口径均不小于入射光束 101 的直径。第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 之间的距离 Z_1 选取在 10mm ~ 30mm 之间。

[0059] 第二衍射光学元件 103 位于变焦距准直透镜组 104 的前焦面,变焦距准直透镜组 104 的焦距为 f_L 。

[0060] 图 2 是本发明的第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 的截面示意图,定义了直角坐标系的 X 轴和 Y 轴。另外, x 和 y 代表衍射光学元件上某一个位相单元的二维坐标。

[0061] 下面通过一个具体实施例,进一步说明光刻机光瞳整形单元的结构和设计方法。

[0062] 首先确定如下系统参数:激光波长 $\lambda=248\text{nm}$,级联衍射光学元件的通光口径 $L=10\text{mm}$,输出全孔径角 $2\theta=25.4\text{mrad}$,变焦距准直透镜组的焦距变化范围为 $f_1 \sim f_2=300\text{mm} \sim 1200\text{mm}$ 。

[0063] 然后根据以下步骤设计所述的第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103:

[0064] (1) 位相单元周期的计算:

[0065] 第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 的位相单元周期相同,以 1 表示,依据夫琅和费衍射定理通过下式得到:

$$[0066] \quad 1 \leq \lambda / \sin(2\theta)$$

[0067] 其中, λ 为入射光波长, 2θ 为所述第二衍射光学元件 103 的输出全孔径角。计算得到 $1 \leq 9.76 \mu\text{m}$;根据位相单元周期、DOE 通光口径可以求得位相单元在一个方向上的数量为 $N=1024$ 。

[0068] (2) 入射光束和确定所需光束的光强分布并进行离散化处理:

[0069] 入射光束 101 的截面光强分布通常按照二维高斯分布处理,入射光强分布矩阵 I_0 用下式表示:

$$[0070] \quad I_0(x_1, y_1) \propto \exp \left[- \left(\frac{x_1^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y_1^2}{2\sigma_y^2} \right) \right]$$

[0071] 式中, x_1 和 y_1 定义为入射平面(即第一衍射光学元件所在平面)水平(X轴)方向和竖直(Y轴)方向的坐标, σ_x 和 σ_y 分别是入射光束在 X 轴和 Y 轴方向的束腰半径, X 轴和 Y 轴定义为平行于所述的衍射光学元件两个正交方向, 这两个坐标轴所定义的平面与照明系统光轴垂直。第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 的通光口径与入射光束的直径相同, $L_1=L_2=L=10\text{mm}$, 再根据位相单元周期 1 设定矩阵单元的行和列坐标, 代入上述公式得到 I_0 。

[0072] 所需光瞳光强分布的离散化处理是通过计算机对矩阵进行二维扫描, 为每个单元逐一赋值。

[0073] (3) 对第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的初始位相矩阵进行赋值:

[0074] 第二衍射光学元件 103 初始位相矩阵 ϕ_2^0 赋值的方法, 是给该矩阵的每个元素 $\phi_2^0(x_2, y_2)$ 逐一地随机赋上 0 到 2π 区间中的一个位相值。

[0075] 第一衍射光学元件 102 初始位相矩阵 $\phi_1^0(x_1, y_1)$ 赋值的方法, 是首先对矩阵 $I_t(u, v)\exp[i\varphi^0(u, v)]$ 进行傅里叶逆变换得到矩阵 $Q^0(x_2, y_2)$, 该过程在数学上描述为 $Q^0(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1}\{I_t(u, v)\exp[i\varphi^0(u, v)]\}(x_2, y_2)$, 其中 $\varphi^0(u, v)$ 是一个随机位相矩阵, 其单元个数与 I_t 相同, 其初始位相赋值方法与所述的第一衍射光学元件的初始赋值方法相同, $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 表示傅里叶逆变换, 其算法为该领域的技术人员所公知; 再对 $Q^0(x_2, y_2)\exp[-i\phi_2^0(x_2, y_2)]$ 作传播距离为 Z_1 的菲涅耳变换进行处理得到矩阵 $P^0(x_1, y_1)$, 记为 $P^0(x_1, y_1) = \mathcal{P}\{Q^0(x_2, y_2)\exp[-i\phi_2^0(x_2, y_2)], -Z_1\}(x_1, y_1)$, 其中 $-Z_1$ 是第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 之间的距离。 $\mathcal{P}\{\cdot, Z_1\}$ 表示传播距离为 Z_1 的菲涅耳变换, 其算法为该领域的技术人员所公知。所述的第一衍射光学元件 102 初始位相 $\phi_1^0(x_1, y_1) = \arg\{P^0(x_1, y_1)\}$, 其中 $\arg\{\}$ 表示求解 P^0 矩阵的位相矩阵。

[0076] (4) 采用迭代算法并进行量化处理, 得到第二衍射光学元件和第一衍射光学元件的量化位相矩阵;

[0077] 迭代算法采用以下步骤:

[0078] (4-1) 计算 $R^{k+1}(x_2, y_2) = \mathcal{P}\{I_0(x_1, y_1)\exp[i\phi_1^k(x_1, y_1)], Z_1\}$, 其中 k 表示迭代次数, 初始值为 0;

[0079] (4-2) 计算 $S^{k+1}(u, v) = \mathcal{F}\{R^{k+1}(x_2, y_2)\exp[i\phi_2^k(x_2, y_2)]\}$;

[0080] (4-3) 计算 $Q^{k+1}(x_2, y_2) = \mathcal{F}^{-1}\{I_t(u, v)\exp[i\arg\{S^{k+1}(u, v)\}]\}$;

[0081] (4-4) 计算 $\phi_2^{k+1}(x_2, y_2) = \arg\{Q^{k+1}(x_2, y_2)\} - \arg\{R^{k+1}(x_2, y_2)\}$;

[0082] (4-5) 计算 $P^{k+1}(x_1, y_1) = \mathcal{P}\{Q^{k+1}(x_2, y_2)\exp[-i\phi_2^{k+1}(x_2, y_2)], -Z_1\}$;

[0083] (4-6) 计算 $\phi_1^{k+1}(x_1, y_1) = \arg\{P^{k+1}(x_1, y_1)\}$;

[0084] (4-7) 重复上述步骤 (4-1) 到 (4-6), 直到求出 ϕ_2 和 ϕ_1 为止。

[0085] 迭代过程中, 判断步骤 (4-2) 中 S^{k+1} 落在所需光强分布区域的能量占入射光总能量的比例是否满足要求 (即 $\geq 90\%$), 否则重复上述替换和变换过程, 直到满足要求结束迭代过程。

[0086] 如果遇到无法满足设定光强分布要求的情况, 那么通过设置最大迭代次数来结束当前迭代过程, 并重新设置初始位相, 以开始新的迭代过程。

[0087] 最后可以得到满足期望的输出光强分布矩阵 I_t 的第一衍射光学元件 102 和第二衍射光学元件 103 的位相分布矩阵 ϕ_1 和 ϕ_2 。

[0088] 最后对 ϕ_1 和 ϕ_2 进行量化处理, 是将 0 到 2π 区间的位相数值依据“就近赋值”的原则变为几个等间隔的位相值。所述的量化处理, 可以在所述的迭代算法步骤 (4-4) 和 (4-6) 中实现, 也可以在所述的迭代算法结束后单独统一处理。本实施例, 对 ϕ_1 和 ϕ_2 进行量化处理, 是采用十六台阶结构方式, 即 $0, 2\pi/16, 4\pi/16, 6\pi/16, 8\pi/16, 10\pi/16, 12\pi/16, 14\pi/16, 16\pi/16, 18\pi/16, 20\pi/16, 22\pi/16, 24\pi/16, 26\pi/16, 28\pi/16, 30\pi/16$ 共十六种位相数值。

[0089] (5) 评估设计结果 :

[0090] 计算输出光强分布的衍射效率 (ε) 和非均匀性 (σ), 并与所需要的光强分布指标进行对比, 如果结果不满足指标要求, 则重新设置初始位相, 并重复上述设计步骤, 直到满足指标要求为止。评估中所用到的参数, 衍射效率的定义为 :

$$[0091] \quad \varepsilon = E_{\text{signal}} / E_{\text{out}} \times 100\%$$

[0092] 其中, E_{signal} 是落在所需区域中的光能量, E_{out} 是输出光的总能量。

[0093] 其次, 在计算非均匀性时, 首先需要选取评估区域, 选取方法通常是去除所需光强分布区域的一部分边缘后, 用剩下区域进行非均匀性的评估, 评估方法采用均方根误差方式, 表示为 :

$$[0094] \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - \mu) / \mu)^2}$$

[0095] 其中, x_i 为选取区域中的每个位置的光强值, 是 I_t 矩阵中相应单元的数值 ; N 为选取区域中包含的位置总数, 即所包含矩阵单元的数目 ; μ 为此 N 个位置的光强平均值。

[0096] 以四极照明为例, 图 3 和图 4 分别给出了在先技术和本发明的设计结果。按照在先技术的设计方法, 得到最终四极照明的优化结果 201, 分析光瞳面对角线上的光强分布 202, 明显的可以看出在先技术的优化结果中, 光瞳内无效区域 203 中含有较多杂光 ; 有效区域 204 中的光强分布非均匀性较差。根据上述公式可以计算得到 : 按照在先技术优化的 DOE 衍射效率为 90.3%, 有效区域中光强分布的非均匀性为 4.87%。

[0097] 而根据本发明公开的设计方法实现的设计结果为 301, 分析光瞳面对角线上的光强分布 302, 结果表明光场无效区域 303 中的杂光基本上被消除 ; 有效区域 304 中的光强分布较均匀。根据本发明公开的设计方法而优化的 DOE 衍射效率为 97.1%, 有效区域中光强分布的非均匀性为 0.85%, 图 4 结果与图 3 结果相比, 衍射效率相对提高了 7.53%, 非均匀性相对提高了 82.55%。

[0098] 图 5 是本发明的光瞳整形单元结构在光刻机照明系统中的应用实例。激光器 401 发出的激光依次经过扩束镜组 402 和 403、反射镜 404、级联衍射光学元件 405 和 406、变焦

距准直透镜组 407、微透镜阵列 408、聚光镜 409、扫描狭缝 410、中继透镜组 411，最终在掩模面 412 上形成均匀的照明光场。本发明的级联衍射光学元件的使用，有利于提高光刻线宽控制能力和提高线条边缘粗糙度和线宽粗糙度的级别。

[0099] 与在先技术相比，本发明具有下列技术优点：

[0100] (1) 本发明所述的级联衍射光学元件为实现光瞳整形提供了更多的设计自由度，能够实现比现有技术更高的衍射效率和更好的非均匀性；

[0101] (2) 本发明所述的级联衍射光学元件，无需增加衍射光学元件的单元数量和减小单元周期，降低了设计和加工的难度。同时，级联衍射光学元件可以利用现有的光刻工艺进行加工，具有加工成熟、加工精度容易保证的优点。

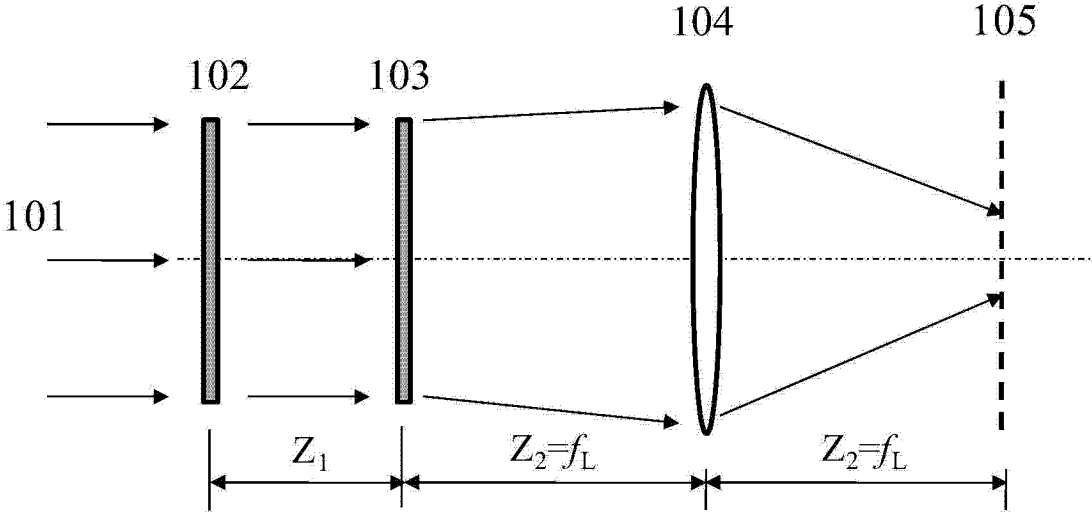


图 1

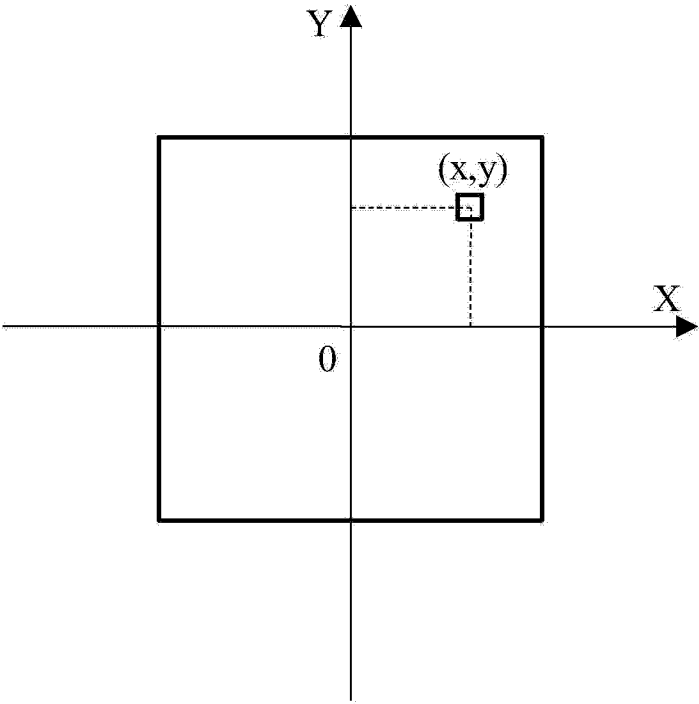


图 2

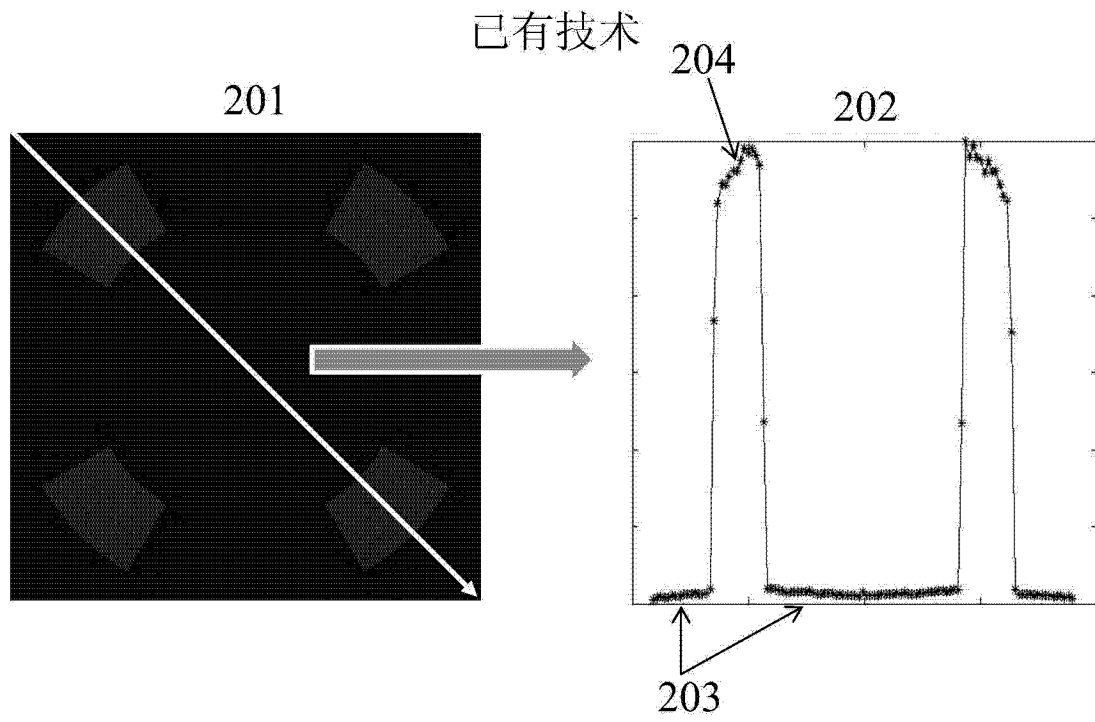


图 3

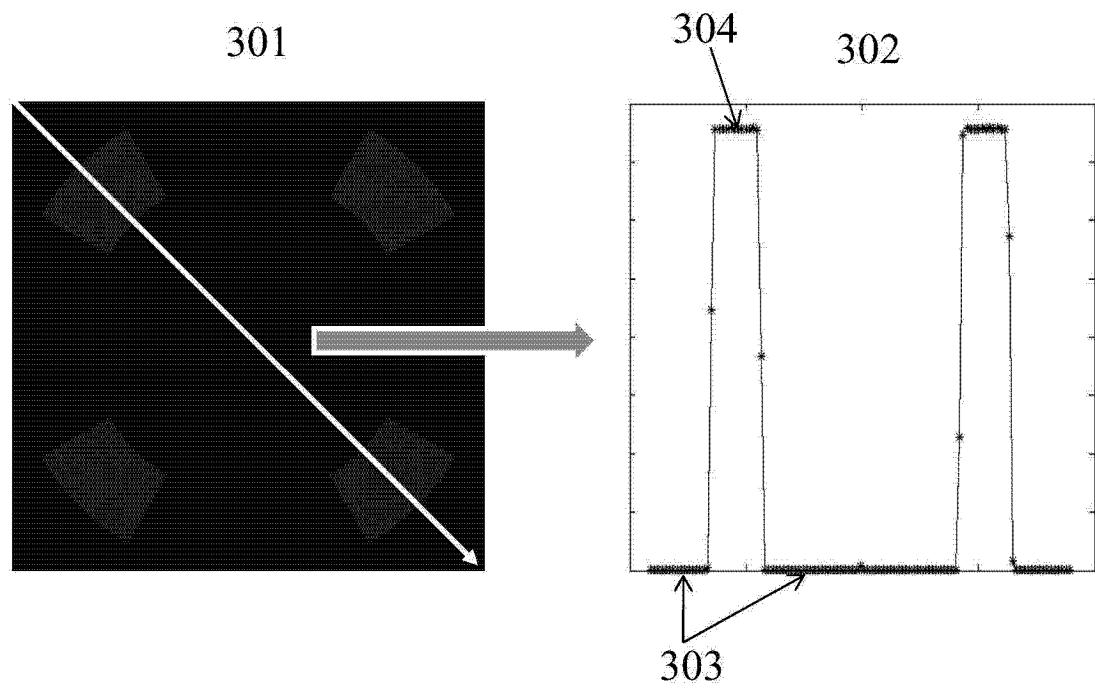


图 4

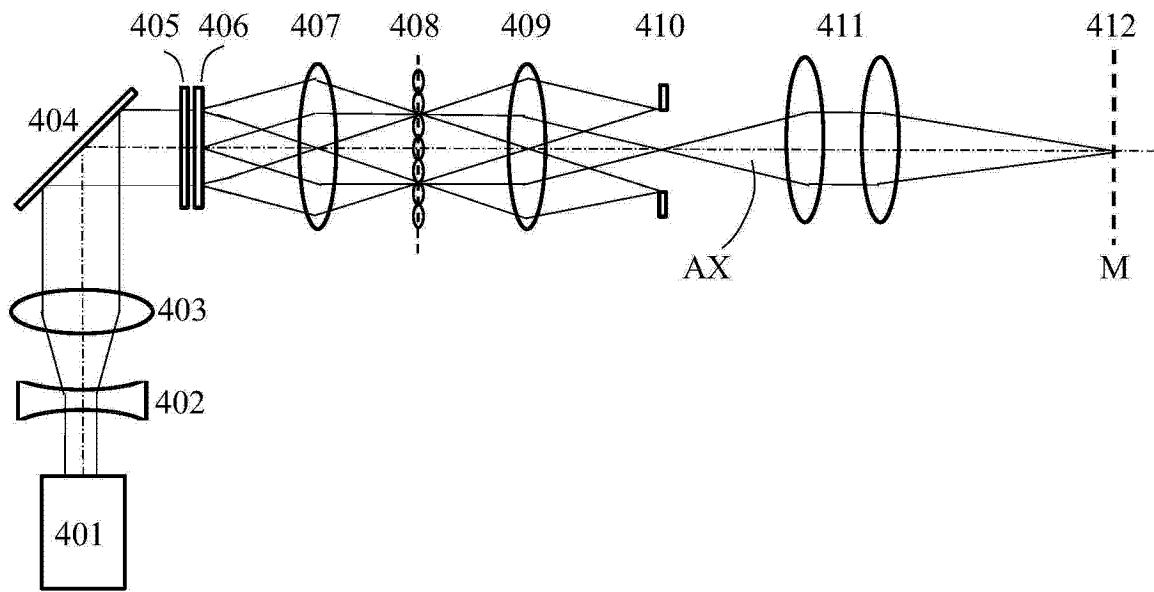


图 5