

基于微反射镜阵列的光刻照明模式变换系统设计

邢莎莎 冉英华 江海波 邢廷文

中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 光源掩膜协同优化是45 nm节点以下浸没式光刻提高分辨率的重要途径之一,为了重构其优化后输出的像素级光源,提出了一种基于可寻址二维微反射镜阵列的新型照明模式变换系统设计方法。分析了减少重构光源所需微反射镜数量的原理,结合成像与非成像光学,利用柱面复眼透镜,获得了入射到微反射镜阵列上的非均匀的特定光强分布,基于此光强分布对微及射镜二维偏转角度进行了模拟及优化,并对该照明模式变换系统进行仿真,结果表明,光瞳重构精度小于2.5%, X,Y 方向光瞳极平衡性小于0.5%,Prolith中重构光源的曝光性能仿真结果满足要求。与类似的系统相比,该系统仅用不足4000个镜单元即可达到设计要求,适用于集成度高的下一代浸没式光刻系统。

关键词 成像系统;照明模式变换;自由照明光瞳;微反射镜阵列;光束整形;非球面复眼

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1111002

Illumination Mode Conversion System Design Based on Micromirror Array in Lithography

Xing Shasha Ran Yinghua Jiang Haibo Xing Tingwen

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Source and mask co-optimization is one of the most important resolution enhancement solutions in immersion lithography for nodes 45 nm and below. In order to reconstruct the optimum output pixelated source, a novel illumination mode conversion system design method based on a two-dimensional addressable micro-mirror array is proposed. The principle of reducing the number of micro-mirror required to reconstruct the source is analyzed, combing imaging and non-imaging optics, using cylindrical fly-eye lens to achieve the specific non-uniform intensity distribution on micro-mirror array. Based on this, optimization of each title angle of micro-mirror is programmed and the whole system is simulated. The results show the accuracy of the reconstructed source is less than 2.5 %, and pupil non-balance X,Y is below 0.5 %. The simulation results of reconstructed source with Prolith meets the design requirements. Compared with similar systems, the system ensures that the accuracy of reconstructed source with less than 4000 micro-mirror element, it's suitable for high integration of the next generation of immersion lithography system.

Key words imaging systems; illumination mode conversion system; free-form pupil; micro-mirror array; beam shaping; aspheric cylindrical lens

OCIS codes 110.3960; 080.4225; 080.4035; 110.2945

1 引言

随着超大规模集成电路的特征尺寸进入45 nm及以下节点,传统的193 nm ArF浸没式光刻工艺因子已逼近其理论极限,研究发现,对于芯片上不同形状的线条,决定其衍射光源形状的照明出瞳对控制和减小工艺因子 k_1 的影响较大^[1];对于复杂的芯片线条而言,光源掩膜优化技术(SMO)作为193 nm ArF浸没式光刻中一种重要的分辨率增强技术被应用到45 nm及其以下节点的工艺中,其同时优化曝光系统的光源及掩膜,采用非圆周对称的复杂光源形状来作为照明光瞳,可较为有效地增大工艺窗口,提高光刻分辨率^[1-3]。为此,需

收稿日期:2015-04-29;收到修改稿日期:2015-06-25

基金项目:国家科技重大专项(2012ZX02701)

作者简介:邢莎莎(1987—),女,硕士,助理研究员,主要从事光学设计和照明方面的研究。E-mail:drizzlyrain3@163.com

要在光刻照明系统中有一种可以重构SMO输出的最佳光源形状装置,以实现掩膜面的不同模式照明。

目前主要是通过衍射光学元件(DOE)来实现照明模式的变换^[4],但其存在零级和高阶衍射,易有光能量的损失和背景杂散光的产生,使可用工艺窗口变小;此外,由于每种照明出瞳形状需要一片相应的DOE来产生,在曝光系统的应用中需要大量的转盘轮换和照明模式设置时间,不但增加了设计成本和周期,还限制了照明光源的灵活性^[5]。为了克服上述缺陷,2008年,Michael Layh等^[6]设计了一种基于微反射镜阵列(MMA)的可编程照明装置,ASML将其应用在NXT系列光刻机的曝光系统中代替DOE实现照明模式变换,只需一片MMA即可产生特定的照明光瞳分布^[7-8]。所使用的MMA通过微机电集成系统(MEMS)集成技术制做,结构类似于数字微镜器件(DMD),每一个微镜单元都可在 -10° 到 $+10^{\circ}$ 之间的连续角度范围内进行二维方向的偏转,通过反射光斑的自由移动在目标面上重构预设的照明光瞳。

由于在65 nm节点以下的光刻工艺中,曝光过程中特征尺寸(CD)的变化量需要严格控制在1 nm以内^[9],这对重构光瞳的稳定性和精确度提出了较高的要求。因此在上述可编程照明系统中,入射至MMA上的光束要求有稳定的光强分布。Michael Layh等^[6]通过在系统中加入阵列型光学积分器以产生均匀、稳定的光强分布,而微反射镜单元数量越多,反射光斑尺寸越小,重构光源的精确度就越高。经过计算,至少需要10000个以上的微反射镜单元才能满足设计要求,这给MEMS的集成和驱动电路制作带来很大困难^[10]。为了减小微反射镜数量,缓解制造压力,2012年,Andray S Tychkov等^[11]提出将微反射镜的表面镀膜并加热至变形,使其有一定的曲率来控制反射光斑尺寸,但此方法在MMA加工方面存在较大困难且减镜数量有限;若在MMA前切换使用焦距不同的微透镜阵列来控制反射光斑的尺寸,由于芯片生产曝光过程中每种照明光瞳的切换时间均要求在秒量级,无疑会给机械控制装置带来巨大压力,且带来额外的加工损耗^[5]。

本文提出了一种基于二维MMA的新型照明模式变换系统设计,其重点在于设计一种在减少所需微反射镜数量的同时重构形状,并且使能量满足要求的像素级光源。为此,分析了减少所需微反射镜数量的设计原理,采用3片柱面复眼透镜和聚光镜作为光束整形单元,通过产生非均匀的特定光强分布以减少微反射镜数量,缓解了制造过程中MEMS集成和机械转换的压力,符合实际曝光生产的需要。在Matlab软件中编程求解微反射镜阵列的二维偏转角度,并通过软件Lighttools, Prolith仿真得到照明结果,结果很好地匹配了SMO输出的优化光源,光源重构精度高,算法收敛速度快,实现了对光束方向和强度的可编程控制。

2 基于MMA的照明模式变换系统原理

基于MMA的照明模式变换系统光路结构如图1所示,激光器发出的高斯光束经过扩束准直系统后出射至光束整形单元中,光束整形单元由柱面复眼透镜和聚光镜组成,在激光器输出的脉冲激光存在10%以上能量波动、输出光斑形状不规则的情况下,光束整形单元中的复眼透镜将光束分割叠加,在空间和时间上保证出射到微透镜阵列上光强的稳定性。经过整形后的光强稳定分布的光束出射至一个微透镜阵列上,微透镜阵列位于聚光镜组的像方焦面上,并与目标照明面成光学共轭的位置关系,微透镜阵列将入射至其上的光束聚焦到MMA上,微透镜阵列与微反射镜阵列个数相等,每个微透镜单元尺寸一致,且与每个微反射镜单元的中心

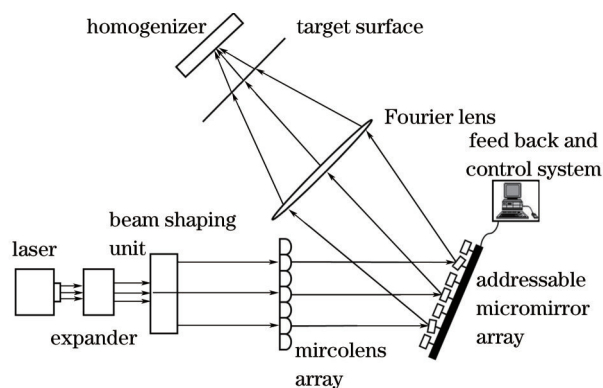


图1 基于MMA的照明模式变换系统简图

Fig.1 Schematic diagram of illumination mode conversion system based on MMA

一一对应。其中,闭环反馈控制系统通过静电驱动每个微反射镜单元围绕两个相互垂直的轴方向进行连续角度偏转,不同反射角的光束经过傅里叶镜组后在目标照明面上叠加,形成与不同照明模式对应的光强分布。由此系统产生的光分布经过后续的匀光系统和耦合镜组后出射到掩膜面上形成均匀照明。

将目标照明面划分为 $P \times P$ 个网格,每个反射光斑的大小与单元网格尺寸相等,将目标光强用像素灰度级表示,引入如下的矢量:

$$\mathbf{L} = [L_1, L_2, L_3, \dots, L_m], \mathbf{K} = [K_1, K_2, K_3, \dots, K_m], \quad (1)$$

式中将归一化的目标光强在每个网格内的平均灰度值从小到大排序,即为向量 \mathbf{L} ,且 $L_1 = 0.1, L_m = 1, 0.1 \leq L_i \leq 1 (i = 0, 1, \dots, m), m$ 为目标光强的像素灰度级次,向量 \mathbf{K} 为 \mathbf{L} 中每个像素灰度级的数量,当出射到微透镜阵列上的光强为均匀分布时,目标照明面上每个反射光斑大小相同,光强相等,所需微反射镜单元数量 N 和光源重构精度 δ 由下式决定:

$$\begin{cases} N \geq \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{\Delta I} \times K_i \\ \delta = \frac{\text{round}\left(\frac{L_i}{\Delta I}\right) \times \Delta I - L_i}{L_i} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\text{round}()$ 为四舍五入取整函数, ΔI 为目标照明面上每个反射光斑的光强,当目标光强像素级次较多且每级数量较大时,若要求 $\delta < 2.5\%$,一般 $\Delta I < 0.025$,经过计算 $N > 10000$ 。为了加快控制算法求解,简化测试及数据处理过程,希望在微透镜阵列的每列或每排上光强相等,即光束整形单元的出射光强在一方向上均匀分布;另一方面,为了减少所需微反射镜数量,考虑到目标光源像素灰度级在范围 $0.1 \sim 1$ 之间连续分布,因此希望光束整形单元的出射光强在另一方向上具有在范围 $0.1 \sim 1$ 之间连续分布的值,此时所需微反射镜数量 N 为:

$$N > \sum_{i=1}^m K_i. \quad (3)$$

引入如下的矢量 \mathbf{L}' 和 \mathbf{K}' :

$$\mathbf{L}' = [L'_1, L'_2, L'_3, \dots, L'_n], \mathbf{K}' = [K'_1, K'_2, K'_3, \dots, K'_n], \quad (4)$$

式中将经过光束整形单元整形,微透镜阵列分割,通过微反射镜阵列、傅里叶镜组后出射到目标照明面上的反射光斑的光强归一化,将每个反射光斑的平均强度值从小到大排序,即为向量 \mathbf{L}' , $L'_1 = 0.1, L'_n = 1, 0.1 \leq L'_j \leq 1 (j = 0, 1, \dots, n), n$ 为其像素灰度级次,向量 \mathbf{K}' 为 \mathbf{L}' 中每个像素灰度级的数量,有:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m K_i = P_{\text{FR}} \times P^2 \\ \sum_{j=1}^n K'_j = N \end{cases}, \quad (5)$$

式中 P_{FR} 为目标光源的光瞳填充比。当给目标光源中每个像素值 L_i 乘以一个 $t (t > 1)$ 时,其归一化后的相对强度比不变,设每个 tL_i 可由多个反射光斑叠加而成,则:

$$tL_i = \mathbf{L}' \cdot \mathbf{A}_i + \Delta \varepsilon_i, \mathbf{A}_i = [a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots, a_{in}]^T (a_{ni} \text{ is integer}) \quad (6a)$$

$$t = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^n L'_j K'_j}{\sum_{i=1}^m L_i K_i + \sum_{i=1}^m \Delta \varepsilon_i K_i} (\sum_{i=1}^m \Delta \varepsilon_i K_i > 0) \\ \frac{\sum_{j=1}^n L'_j K'_j}{\sum_{i=1}^m L_i K_i - \sum_{i=1}^m \Delta \varepsilon_i K_i} (\sum_{i=1}^m \Delta \varepsilon_i K_i < 0) \end{cases} (t > 1), \quad (6b)$$

式中 \mathbf{A}_i 为组成 tL_i 所需要的每个 L'_j 的数量矩阵, $\Delta \varepsilon_i$ 为每个 tL_i 对应的像素灰度值误差,其与 L'_j 各像素级间间隔 $\Delta L'_j$ 有关,令 $|\Delta \varepsilon_i| < \frac{1}{2n}$ 。微反射镜的能量利用率 E 定义为产生目标照明所需反射光斑总能量与全部微反

射镜单元对应的反射光斑能量之比,即:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m (L' \cdot A_i) K_i}{\sum_{j=1}^n L'_j K'_j} = \frac{\sum_{i=1}^m (tL_i - \Delta\varepsilon_i) K_i}{\sum_{j=1}^n L'_j K'_j} = \frac{t \sum_{i=1}^m L_i K_i - \sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i}{\sum_{j=1}^n L'_j K'_j}, \quad (7)$$

此时光源重构精度 δ 定义为

$$\delta = \max \left| \frac{L' \cdot A_i - tL_i}{tL_i} \right| = \max \left| \frac{-\Delta\varepsilon_i}{tL_i} \right| (i = 1, 2, \dots, m). \quad (8)$$

当给定微反射镜能量利用率最小值为 E_{\min} 时,由(6),(7)式得出设计中总的像素灰度值误差应满足:

$$\frac{(E_{\min} - 1)t}{(E_{\min}t - 1)} \times \sum_{i=1}^m L_i K_i = (\sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i)_{\min} < \sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i < (\sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i)_{\max} = \frac{(1 - E_{\min})t}{(E_{\min}t + 1)} \times \sum_{i=1}^m L_i K_i. \quad (9)$$

在实际计算中发现,对于 $6\% \leq P_{FR} \leq 30\%$ 的像素级光源,只有当 $t \geq 8$ 才能同时满足 $\delta \leq 3\%$, $E \geq 0.9$ 。考虑目标光源分布为如下的极限情况:当 L_i 中每个像素值均相等,即需要实现均匀照明时, L' 中必须有多组像素值之和近似为 1 且误差最小;当 $t \geq 8$, $tL_i \geq 0.8$ 时,结合(8),(9)式为了进一步减小 δ ,提高 E ,希望 L' 中像素值在 $L'_j \geq 0.8$ 后像素级次间隔 $\Delta L'_j$ 较小,从而使 $\Delta\varepsilon_i$ 能进一步减小;考虑到柱面复眼透镜的实际加工能力和之后的求解面型方便,光强可用平滑,对称的函数表示,综上所述,设在另一方向上光束整形单元出射光束横截面为平顶高斯函数,在此基础上分析图 2 所示的两种平顶光强分布:

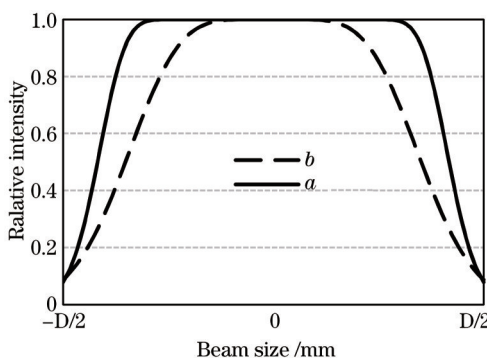


图 2 光束横截面光强分布图

Fig.2 Intensity profile over cross-section

这两条曲线皆在范围 0.1~1 之间有连续的光强分布,设曲线的平顶宽度与斜坡宽度之比为 k ,出射光束截面为正方形光斑,则微反射镜单元数量 N 为:

$$N = 4n^2(k + 1)^2. \quad (10)$$

图 2 中,曲线 a 对应 $k > 1$,曲线 b 对应 $k < 1$,由(10)式,当微反射镜单元数量 $N_a = N_b$ 时,像素灰度级次 $n_a < n_b$;当 $E \geq 0.9$, $t \geq 8$ 时,由(9)式,曲线 a, b 的 $\left(\sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i \right)_{\max}$ 和 $\left(\sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i \right)_{\min}$ 相差较小;当曲线 a 的 k 值较大时,每个灰度

级间间隔 $\Delta L'_j$ 增大,此时 $\sum_{i=1}^m \Delta\varepsilon_i K_i$ 易超出其允许的上、下限;而 k 值太小时,会给柱面复眼面型加工带来难度,因此在计算中一般取 $0.3 < k < 1.5$,具体 k 的取值应兼顾 δ, E, N ,并根据设计要求确定;而微反射镜阵列的数量 N 由整形单元的输出光强、目标光源的像素灰度级,设计要求的光源重构精度和微反射镜能量利用率决定,由(10)式,设计中只要保证 $n(n < 38)$ 的取值使得 $\Delta\varepsilon_i$ 满足(8),(9)式,则 $N < 10000$,即可达到减镜的目的。例如,当整形单元出射光束的横截面在一方向上为 $k=0.55$, $n=26$ 的平顶高斯分布时,对于一个 $P_{FR}=30\%$, $\sum_{i=1}^m L_i K_i = 300$ 的像素级光源,当微反射镜数量 $N=6500$,经过计算 $\delta=0.52\%$,对应的 $E=99.2\%$ 。

综上所述,要重构 SMO 优化后的像素级光源,当整形单元出射光束的横截面在一方向上呈平顶与斜坡宽度成一定比例的平顶高斯分布时,可在减少微反射镜单元数量的同时满足系统设计要求。为此,利用光束整形单元产生以下的光强分布:在一方向上具有一定斜坡宽度的平顶高斯分布,在另一方向上为均匀分

布。为了保持重构光源精细度,需要保证目标照明面上反射光斑尺寸相同,则光束整形单元的出射光束还需保持其远心性。

下面,以在 X 方向上形成所需要的平顶光强分布,在 Y 方向上形成均匀的光强分布为例,介绍光束整形所用柱面复眼透镜的面型设计过程。

3 整形透镜面型设计

光束整形单元原理如图 3 所示,采用一对 Y 方向的一维柱面复眼透镜在 Y 方向上产生均匀的光强分布,采用一片 X 方向的一维柱面复眼透镜在 X 方向上产生平顶高斯光强分布。其中, Y 方向的柱面复眼面形参数可根据成像光学的原理,在光学软件中优化得到; X 方向的柱面复眼面形函数可采用非成像光学的方法,根据斯涅耳折射定律和能量守恒条件^[12]。

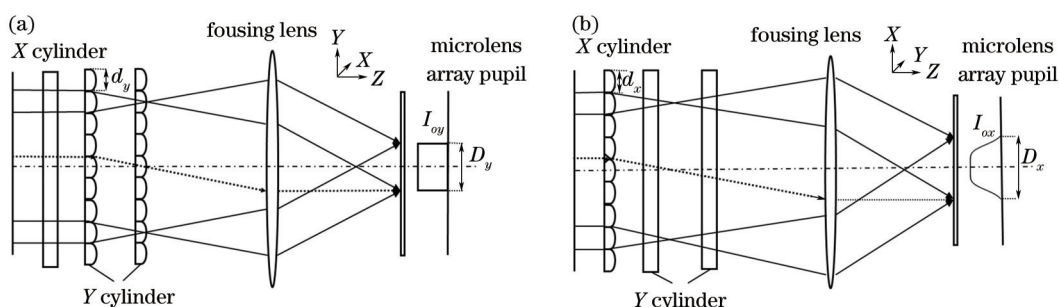


图 3 柱面复眼透镜整形原理示意图。(a) $Y-Z$ 平面; (b) $X-Z$ 平面

Fig.3 Beam shaping principle of cylindrical fly-eye lens. (a) $Y-Z$ plane; (b) $X-Z$ plane

3.1 理论推导

如图 4 所示,以图 3(b)中位于坐标轴上的复眼子透镜为例进行分析。如图 4 所示光轴沿 Z 方向,入射光光强为 $I_i(x)$,出射光光强为 $I_o(x)$,从扩束准直系统出射的激光光束入射到子透镜 1 上,其第一面为平面,第二面为 X 方向柱面,坐标顶点位于柱面顶点,面型参数函数为 $Z_1(x)$,设某一入射光线坐标为 $[x_i, Z_1(x_i)]$,与之对应的像面上出射光线坐标为 $[x_j, Z_j(x_j)]$,由能量守恒定律,可得:

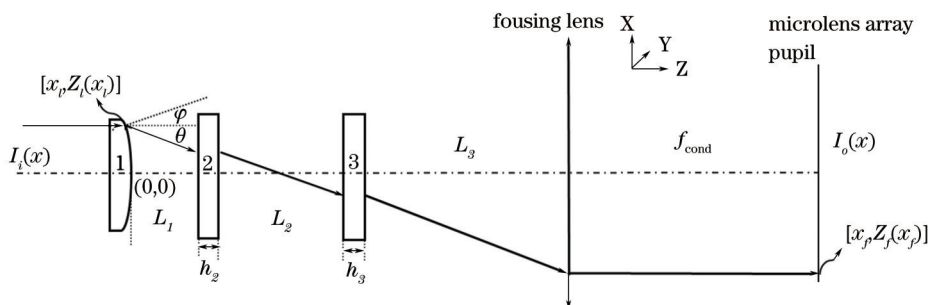


图 4 坐标轴 X 方向上柱面复眼子透镜光线偏折示意图

Fig.4 Path of a general ray tracing sub-cylinder fly-eye lens on axis of X direction

$$G_1 \int_0^{x_i} 2\pi \times I_i(x) x dx = G_2 \int_{x_j}^0 2\pi \times I_o(x) |x| dx, \quad (11)$$

其中, G_1, G_2 分别为入射光强与出射光强对应的归一化能量系数,对于入射高斯光束,当小复眼单元数量足够多时,可认为每个复眼尺寸内入射光束均匀分布,即 $I_i(x) = 1$,将出射光强分布函数用多束基模高斯光束合成的平顶光束模型^[13]表示:

$$\left\{ \begin{aligned} I_o(x) &= \sum_{m=1}^M \alpha_m \exp\left(-m \frac{x^2}{w_0^2}\right), \end{aligned} \right. \quad (12a)$$

$$\alpha_m = (-1)^{m+1} \frac{M(M-1)\cdots(M-m+1)}{m!}, \quad (12b)$$

其中, w_0, M 分别为平顶高斯光束的束腰宽度和阶数。将 $I_o(x)$ 的表达式代入(11)式中,可求得 x_i 关于 x_j 的光线

映射函数表达式为：

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt{\frac{-2 \int_{x_f, m=1}^0 M \alpha_m \exp(-m \frac{x^2}{w_0^2}) x dx}{\theta}}, \\ \varphi = \frac{G_1}{G_2} = \sqrt{\frac{-2 \int_{-D_x, m=1}^0 M \alpha_m \exp(-m \frac{x^2}{w_0^2}) x dx}{d_x^2}}, \end{cases} \quad (13)$$

其中, D_x 为聚光镜组焦面上 X 方向的光斑尺寸, d_x 为子透镜 1 的口径。在 $X-Z$ 平面内, 由子透镜 1 产生微透镜阵列入瞳面 X 方向上照度分布, 子透镜 2, 3 可看做插入光路中的平行平板, 根据几何光学易得坐标关系为：

$$x_f = 2x_1 + \{f_{\text{cond}} - 2[L_1 + L_2 + L_3 - Z_1(x_1)]\} \tan \theta - 2(h_2 + h_3) \times \frac{\sin \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (14)$$

上式中, f_{cond} 为聚光镜组的焦距, L_1 为子透镜 1, 2 之间的距离, L_2 为子透镜 2, 3 之间的距离, L_3 为子透镜 3 与聚光镜组之间的距离, h_2, h_3 分别为子透镜 2, 3 在 X 方向上的中心厚度, θ 为光线经过子透镜 1 折射后与光轴的夹角, φ 为 x_1 点处切线法向向量与光轴的夹角, 由(14)式可得到一个 $\tan \theta$ 关于 x_f, x_1 的隐函数表达式, 设其为：

$$\tan \theta = g(x_f, x_1), \quad (15)$$

根据 Snell 定律, 有：

$$\tan \theta = \frac{nz_1(x_1)' - z_1(x_1)' \sqrt{1 - (n^2 - 1)z_1(x_1)^2}}{nz_1(x_1)^2 + \sqrt{1 - (n^2 - 1)z_1(x_1)^2}}, \quad (16)$$

其中, n 为复眼透镜材料的折射率, 当 $f_{\text{cond}} \gg Z_1(x_1)$ 时, 有 $1 - (n^2 - 1)Z_1(x_1)^2 \approx 1$, 联立(13), (15), (16)式, 得到柱面复眼子透镜 1 的面型函数方程为：

$$Z_1(x_1) = \int_0^{x_1} \frac{(n-1) - \sqrt{(n-1)^2 - 4ng[x_f(x_1), x_1]^2}}{2ng[x_f(x_1), x_1]} dx, \quad (17)$$

其中, $x_f(x_1)$ 是 x_f 关于 x_1 的数值解, 可通过(13)式求出。(17)式积分复杂, 不具有解析解的表达形式, 可采用数值积分方法, 在 Matlab 中编程求出 $Z_1(x)$ 面型方程的数值解。

3.2 整形透镜面型设计结果及讨论

在微透镜阵列入瞳面上形成如第 3 节中图 2 所示的光强分布为例, 准分子激光器发出的光束经过扩束准直系统后进入光束整形单元, 入射光束横截面为超高斯分布的矩形光斑, 设入射光束波长 $\lambda=193 \text{ nm}$, 光斑尺寸 $\Phi_x=\Phi_y=20 \text{ mm}$, X 方向上出射平顶高斯光束阶数 $M=4$, 束腰宽度 $w_0=19.1$, 为了保证 Y 方向上远场光强分布有一定的均匀性, 结合复眼的实际加工能力, 取 X, Y 方向上复眼单元的数量均为 51 个, 子透镜口径为 $d_x=d_y=0.4 \text{ mm}$, 微透镜阵列入瞳面大小为 $D_x=D_y=60 \text{ mm}$, 经过优化后得出柱面子透镜 2, 3 中心厚度和空气间隔分别为 $h_1=2.6 \text{ mm}$, $h_2=2.65 \text{ mm}$, $L_1=5.4 \text{ mm}$, $L_2=41.7 \text{ mm}$; 曲率半径和非球面系数分别为 $r_2=-19.23 \text{ mm}$, $k_2=0.58$, $r_3=-30.17 \text{ mm}$, $k_3=-3$, 聚光镜组焦距 $f_{\text{cond}}=L_3=6500 \text{ mm}$ 。采用龙贝格积分法在 Matlab 中求解出子透镜 1 第二面的矢高与对应入射面坐标的离散数据集 $[Z_1(x), x]$, 利用非线性最小二乘法拟合出透镜元面形曲线的高次多项式, 拟合均方根误差控制在 10^{-8} mm 数量级, 所得子透镜 1 第二面的非球面系数见表 1。

表 1 柱面子透镜 1 第二面的面型系数

Table 1 Coefficient of second surface of sub-cylinder fly-eye lens 1

c_1	k_1	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}	A_{14}	A_{16}	A_{18}
-0.031	0	3.679×10^{-2}	-11.317	1.7041×10^3	-1.4436×10^5	7.1156×10^6	-2.0362×10^8	3.1307×10^9	-2.00398×10^{10}

表 1 中, 柱面子透镜元 1 第二面的最大矢高小于 $0.7 \mu\text{m}$, 镜单元间面型跳变角度小于 0.5° 。利用光学软件 Lighttools 对光束整形单元进行模拟, 追迹 10^8 条光线后, 在聚光镜组像面上得到远场光强分布输出, 如图 5 所示。图 5(a) 为二维照度分布图, 图 5(b) 中的两条线皆为过像面中心 X 方向横截面上归一化的照度分布, 虚线为拟产

生目标的照度分布,实线为模拟所得照度分布,图5(c)为过像面中心的Y方向横截面上的照度分布。

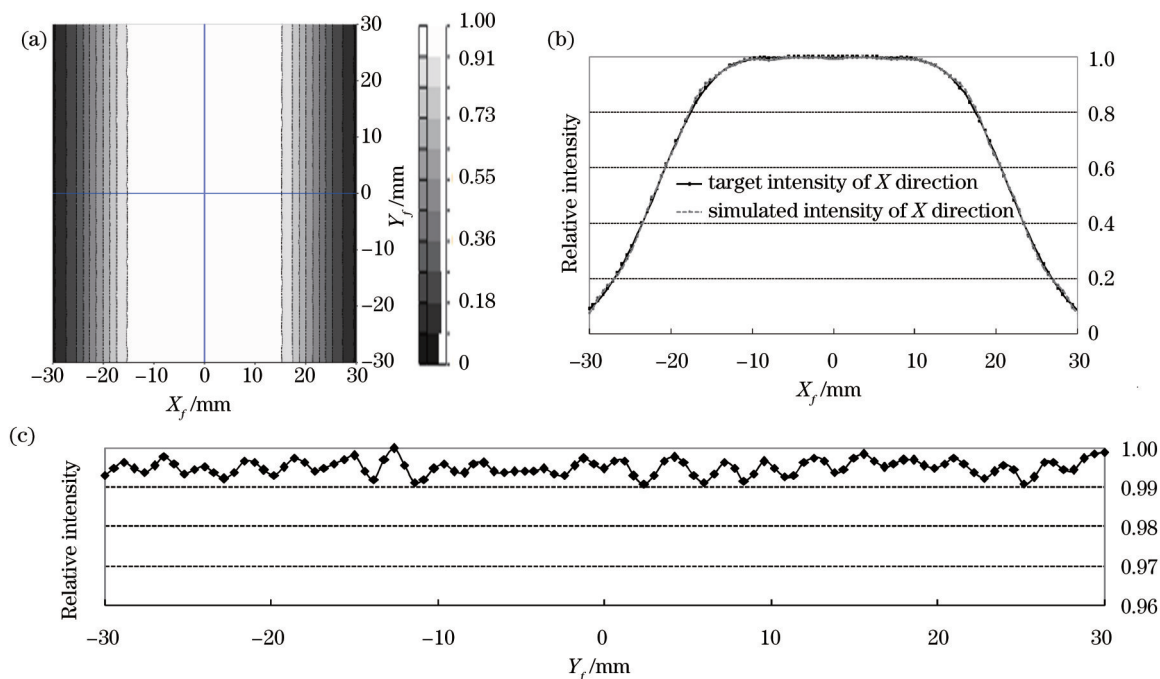


图5 聚光镜组像面上的照度分布图。(a) 二维照度分布(强度等高线);(b) 过像面中心X方向横截面上照度分布;
(c) 过像面中心Y方向横截面上照度分布

Fig.5 Normalized irradiance distribution on the image plane of condenser. (a) 2D distribution (intensity contour);

(b) X direction intensity profile over the cross-section on the center of image plane;

(c) Y direction intensity profile over the cross-section on the center of image plane

柱面复眼透镜与聚光镜组组合后像方远心度最大为 9.1×10^{-3} mrad,由于光束整形单元输出的照度分布直接影响到后续算法的精度,将仿真所得数据进行处理并分析,结果如表2所示:

表2 光束整形单元设计结果

Table 2 Design results of beam shaping unit

	Criterion	Target	Design result
X direction	Flat top width: slope width	2:3	2:2.95
	Intensity differences	<0.02	<0.016
Uniformity in each slice of Y direction		>95%	>95.7%
	Intensity threshold	0.09	0.075

表2中,Y方向上任一截面内照明不均匀性小于4.3%,X方向上设计所得照度与目标照度差值小于0.016,输出光强归一化后强度级别从0.075~1连续分布,满足预定设计要求。

4 照明模式变换系统模拟及结果分析

将上述得到的设计结果应用于第2节所示的照明模式变换系统中,由第2节中的分析可知,由于不同目标光源的各像素灰度值不等,各灰度级数量不等,所以最少需要的微反射镜单元数量 N_{min} 是一个统计结果,计算中参考了约30种对应不同掩膜图形的像素级光源,设由SMO求解出的最佳优化光源光瞳填充比 $P_{FR} \leq 30\%$,以 $P_{FR}=30\%$ 的5种像素级光源作为参考,图6(a)为当微反射镜能量利用率 $E > 99\%$ 时, N 从2500~6500的范围内取值所得到的光源重构精度的最小值 δ_{min} 。

从图6(a)中可看出,当 $N \geq 3600$ 时,这5种像素级光源的 $\delta_{min} \leq 2.5\%$;图6(b)为 $N=3600$ 、30种像素级光源 P_{FR} 取值范围在6%~30%时,重构光源的 $\delta_{min} \leq 2.5\%$,对应的 $E > 99\%$,满足系统设计的要求。取最少所需微反射镜单元数量 $N_{min}=3600$,则整形单元出射的光束经过微透镜阵列后,被分割为 60×60 个不同通道的细光束聚焦到微反射镜阵列上,照明模式变换系统部分参数如表3所示。

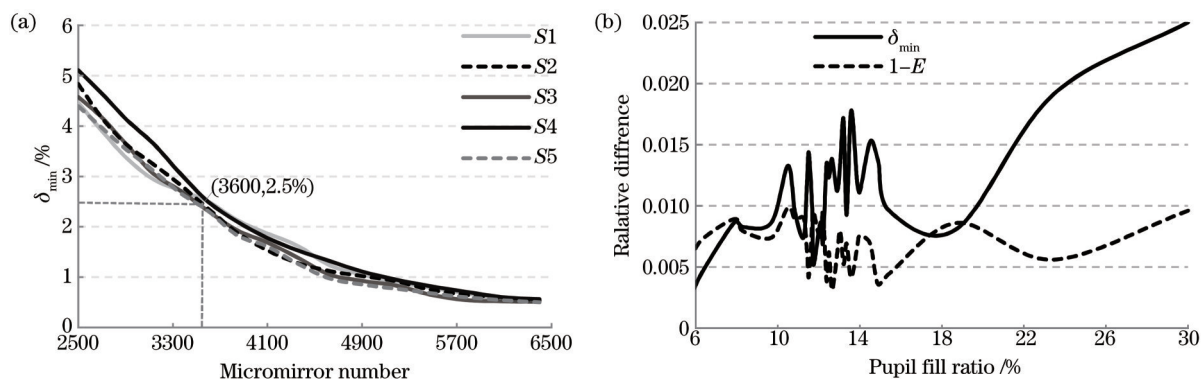


图6 30种像素级光源计算结果。(a) $P_{FR}=30\%$ 的5种像素级光源在 N 取不同值时的 δ_{min} ; (b) $N=3600$ 时,不同 P_{FR} 的 δ_{min} 和对应 E 值

Fig.6 30 kinds of pixelated source simulation results. (a) Values of δ_{min} corresponding to 5 kinds of pixelated source when different N are taken; (b) when $N=3600$, $6\% \leq P_{FR} \leq 30\%$, calculated δ_{min} and E

表3 照明模式变换系统中部分元件参数

Table 3 Part of the component parameters of illumination mode conversion system

Component name	Parameters	Value
Micro-lens element	Size	1mm×1mm
Micro-mirror element	Maximum tilt angle	5°
	Accuracy for tilt angle	< 0.2mrad
Fourier lens	Magnification	2.85
Homogenizer pupil	Size	150 mm

将微反射镜阵列的二维偏转角度看做待求多子集和问题^[14],采用改进的二表算法在 Matlab中编程求解角度矩阵。图7(a)为 Lighttools中的照明模式变换系统部分光路结构模拟图,追迹 10⁸条光线后,将照明出瞳面上的光强分布数据导入 Matlab中进行处理,图7(b)为光源-掩膜优化求解出的归一化目标光源分布,图7

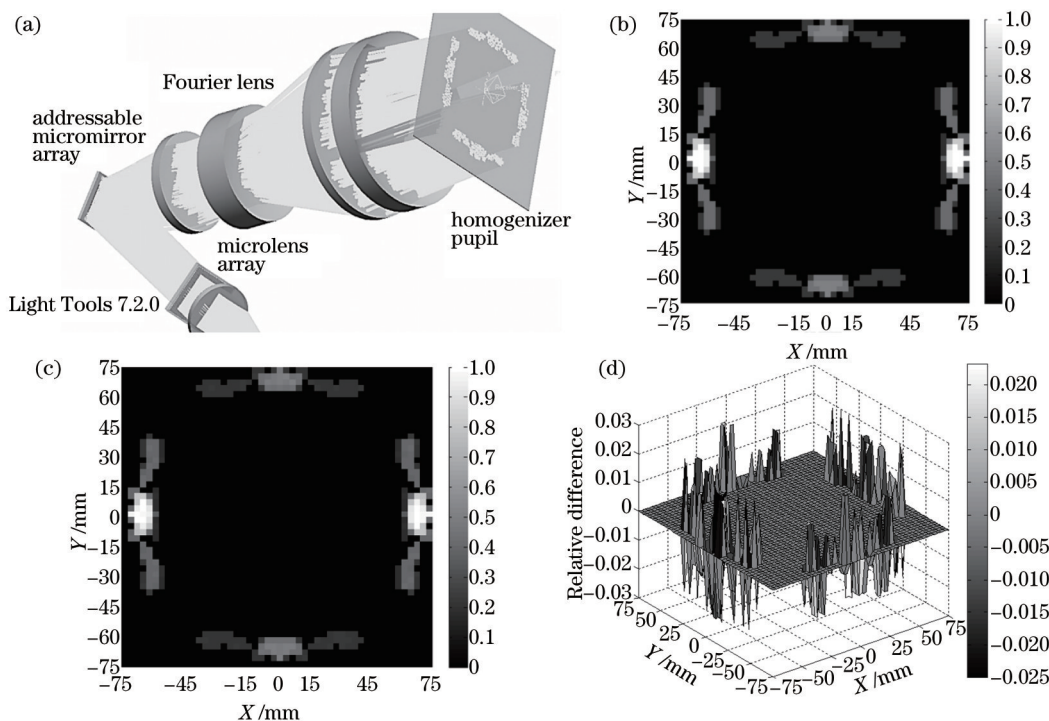


图7 目标光源与设计所得重构光源仿真图。(a) 系统部分光路结构图;(b)光源-掩膜优化输出的目标光源分布;

(c)优化设计得到的重构目标光源分布;(d)目标光源分布与设计所得光源分布相对强度比。

Fig.7 Simulated illumination distribution between reconstructed source and target source. (a) Simulation diagram of parts of the optical system; (b) target source after SMO; (c) reconstructed source after optimization; (d) relative intensity difference between reconstructed source and target source

(c)为模拟所得到归一化重构光源分布,图 7(d)为归一化的目标光源和重构光源光强的相对强度比。取目标面上网格划分数 $P=51$,产生如图 7(c)所示重构光源的时间为 3.73 s。采用表 4 所示的各项参数对设计结果进行评价,图 8 为在光刻软件 Prolith 中分别采用目标光源和重构光源时,CD 和焦深(DOF)的变化情况。

表 4 设计结果评价

Table 4 Evaluation of design results

Criterion	Target	Simulation result
Source reconstruction accuracy	<2.5%	<2.2%
X, Y non-balance	<2%	<0.5%
Energy efficiency of micromirror	>99%	>99.5%

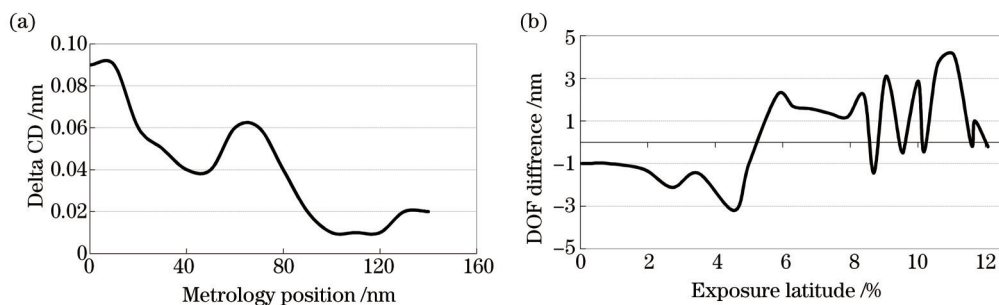


图 8 Prolith 中重构光源和目标光源曝光模拟结果($NA=1.35, f_{cd}=45$ nm, 密集线条, 衰减相移掩模)。

(a) 不同测量平面 CD 变化量; (b) 焦深变化情况。

Fig.8 Simulation of reconstructed source and target source with Prolith ($NA=1.35, f_{cd}=45$ nm, dense line, AttPsm). (a) CD variation with different metrology positions; (b) DOF differences between reconstructed source and target source

从表 4 中设计结果可见,对于图 7(b)所示的像素级光源,光源重构精度小于 2.2%,微反射镜能量利用率大于 99.5%。图 8 为在 Prolith 中分别采用重构光源与目标光源进行性能仿真的结果,光刻机数值孔径 $NA=1.35$,工作波长 $\lambda=193$ nm,掩模特征尺寸 $f_{cd}=45$ nm,掩模类型为衰减相移掩膜,图形为密集线条分布,仿真结果表明 CD 变化量小于 0.1 nm,当曝光容度 $E_i=6\%$ 时,DOF 变化量小于 3 nm。上述结果表明,设计的新型结构能够满足 193 nm 浸没式光刻系统对照明模式变换系统的设计要求。

5 结 论

为了在光刻照明系统中重构光源掩膜优化输出的光源,提出了一种基于二维 MMA 的新型照明模式变换系统的设计方法,利用该方法设计的系统具有较少的微反射镜数量和较高的光源重构精度和能量利用率。为了避免 MEMS 制造难以实现高驱动器密度和高表面质量的镜阵列,设计了 3 片柱面复眼透镜的结构,对入射到 MMA 上的光束进行整形以获得 X 方向和 Y 方向上独立的光强分布,基于此非均匀的光强分布减少所需反射镜数量,相比于原来的需要 10000 个以上的镜单元分布,本系统用不到 4000 个镜单元即可达到设计要求,为基于二维 MMA 实现任意照明光瞳提供了一种思路。

将入射至 MMA 上的光束整形形成平顶高斯分布,也可按照设计要求将其整形成其他稳定,连续的光强分布。为了确保整形后出射光束光强分布的精确性,要求在柱面复眼表面加工时有较高的图形定位精度,可采用电子束直写^[15]等方式制备;由于重构光源的精度很大程度上依赖于微反射镜阵列的数量,制作高稳定性,可连续旋转的 MMA 是研究工作下一步的目标。

参 考 文 献

- 1 Tamer H Coskun, Dai Huixiong, Huang Hsu-Ting, *et al.*. Accounting for mask topography effects in source-mask optimization for advanced nodes[C]. SPIE, 2011, 7973: 797309.
- 2 A E Rosenbluth, S Bukofsky, C Fonseca, *et al.*. Optimum mask and source patterns to print a given shape[J]. J Micro/Nano/ith MEMS. 2002, 1(1): 13-30.
- 3 Thomas Mulders, Vitaliy Domnenko, Bernd Kuchler, *et al.*. Simultaneous source-mask optimization: a numerical combining method

- [C]. SPIE, 2010, 7823: 78233x.
- 4 Hu zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 5 Jörg Zimmermann, Paul Gräupner, Jens Timo Neumann, *et al.*. Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners[C]. SPIE, 2010, 7640: 764005.
- 6 Michael Layh, Markus Degunther, Michael Patra. Microlithographic Projection Exposure Apparatus Having a Multi-Mirror Array with Temporal Stabilisation: US, US20150177623A1[P]. 2015-06-25.
- 7 M Mulder, A Engelen, O Noordman, *et al.*. Performance of FlexRay, a fully programmable illumination system for generation of freeform sources on high NA immersion systems[C]. 2010, 7640: 76401.
- 8 G McIntyre, D Corliss, R Groenendijk, *et al.*. Qualification, monitoring, and integration into a production environment of the world's first fully programmable Illuminator[C]. 2011, 7973: 797306.
- 9 Jin-hyuck Jeon, Chan-ha Park, Hyun-jo Yang, *et al.*. Analysis of the impact of pupil shape variation by pupil fit modeling[C]. SPIE, 2010, 7640: 76400Y.
- 10 Wang Weimin, Tao Fenggang, Yan Shengmei, *et al.*. Study on a novel segmented micro-deformable mirror with tip-tilt motion[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0716002.
汪为民, 陶逢刚, 颜胜美, 等. 新型分立倾斜式微变形镜研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0716002.
- 11 Andray Sergeevich Tychkov. Illumination System, Lithographic Apparatus and Method: US, 20120194794[P]. 2012-08-02.
- 12 B R Frieden. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance[J]. Appl Opt, 1965, 4(11): 1400-1403.
- 13 Li Yajun. New expressions for flat-topped light beams[J]. Opt Communications, 2002, 206(4-6): 225-234
- 14 Horowitz E, Sahni S. Computing partitions with applications to the knapsack problem[J]. J ACM, 1974, 21(2): 277-292.
- 15 Liu Ming, Xie Changqing. Microfabrication Technology[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2004: 11-12
刘 明, 谢常青. 微细加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 11-12.

栏目编辑: 韩 峰