

光刻机照明系统匀光单元光学设计与仿真

王刚^{1,2}, 李中梁^{1,2*}, 袁春晓¹, 张方¹¹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, 上海 201800;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对光刻机照明系统矩形光场的均匀照明需求,提出了一种基于单排平凸微柱面镜阵列与小长宽比积分棒相结合的匀光单元方案。分析了小长宽比积分棒输入光场的角度分布特性和宽度对照明均匀性的影响。使用单排平凸微柱面镜阵列进行预匀光可以满足积分棒输入光场需求。采用光线方向余弦的分布偏差表征照明均匀性,构造了匀光单元透镜组的均匀性评价函数,并以 KrF 光刻机匀光单元为对象,利用 CODE V 软件对平凸微柱面镜和聚光镜组进行了自动优化设计。在 LightTools 中对该匀光单元进行仿真验证,结果表明,在不同部分相干因子的传统照明模式和环形照明模式下输出光场的积分非均匀性均小于 0.43%,优于基于弥散斑均方根评价函数优化设计的对照组结果,对相关工程设计有一定参考意义。

关键词 光学设计; 光刻; 照明系统; 匀光单元; 照明均匀性

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221435

1 引言

投影式步进扫描光刻机(以下简称“光刻机”)是用于集成电路芯片制造的关键设备之一^[1-2]。照明系统是光刻机的核心分系统之一,为掩模面提供均匀照明,控制曝光剂量并实现不同的照明模式^[3]。光刻机的照明模式通常可依照掩模图形来调整,以提高光刻分辨率和成像对比度,同时改善焦深^[4-5]。在光刻曝光过程中,硅片上任一点处的曝光剂量是照明光场在扫描方向上的积分辐射能量,所以照明积分非均匀性(IINU)是影响曝光均匀性的一个关键指标^[1,6-7]。照明系统中的匀光单元对改善 IINU 起着至关重要的作用^[1,8]。

用于光刻机照明系统的匀光元件有衍射光学元件(DOE)、微透镜阵列(MLA)及积分棒(或称匀光棒)等^[8]。这些元件各有优缺点。由于衍射损耗,DOE 的使用仅限于小角度,且传输效率较低^[9-10],因此其不常用于光刻机匀光单元。积分棒具有结构简单、易于加工、成本较低等特点^[11]。对于传统的积分棒方案而言,光刻机照明系统的部分相干因子是可调的,积分棒的入射端数值孔径较小,此情况下积分棒的长宽比需要非常大才能达到较好的匀光效果,导致积分棒占用空间长度较大。郭立萍等^[12]进行了基于积分棒的光刻机匀光单元设计,积分棒的数值孔径范围为 0.20~0.66,

长宽比达到了 20:1(X)和 91:1(Y)。MLA 属于折射光学元件(ROE),适用于大数值孔径匀光,能量损耗非常小,不影响激光束的偏振^[8],而且 MLA 结构的纵向长度很短,所以是目前的常用选择。例如:ASML 公司的光刻机照明系统匀光单元使用了二维排布的球面/非球面 MLA 方案^[13],并加入积分棒作为辅助;Nikon、Canon 等公司的光刻机照明系统匀光单元使用了前排方向相互正交的微柱面镜阵列^[14-15]。然而,目前的 MLA 技术成熟度不够高,造价昂贵,装调难度大^[11]。常规的 MLA 方案在应用时一般需要再增加一排相同的 MLA 作为场镜^[16],导致成本进一步增加;而且配合使用的聚光镜组的透镜数一般达到 7 片^[16-17],结构复杂。综上,目前的匀光单元结构方案难以兼顾系统长度、结构复杂度与加工难度。

笔者提出了一种基于单排平凸微柱面镜阵列(PCMCLA)与小长宽比积分棒相结合的匀光单元方案,并构造了该匀光单元透镜组的自动优化评价函数;分析了积分棒输入光场的分布特性对输出光场照明均匀性的影响,并使用单排 PCMCLA 进行预匀光,匀光效果可以满足输入光场的需求。相比于传统的积分棒方案^[18],本方案采用的积分棒长宽比明显减小,更有利于减小系统的空间体积;相比于常规的双排 MLA 方案,本方案中的 MLA 为单排一维列布的 PCMCLA,搭配的聚光镜组仅包含 3 片透镜,降低了结构复杂度,

收稿日期: 2022-11-21; 修回日期: 2023-02-13; 录用日期: 2023-02-25; 网络首发日期: 2023-03-08

基金项目: 上海市集成电路科技支撑专项(20501110600)、上海市政府间科技合作计划(20500711300)、中国科学院青年创新促进会资助项目

通信作者: *lizhongliang@siom.ac.cn

有助于提高可制造性、降低工程成本。此外,笔者采用光线方向余弦的分布偏差表征照明均匀性,构造了匀光单元透镜组的自动优化评价函数,并以 KrF 光刻机匀光单元为例进行了光学设计与仿真验证。同时,以基于传统弥散斑均方根(RMS)评价函数的优化设计结果作为对照组,验证了所构造评价函数的优越性。

2 光刻机照明系统匀光元件及原理

2.1 光刻机照明系统

光刻机照明系统结构^[19]如图 1 所示,其组成单元依次为激光源、扩束单元、光瞳整形单元、匀光单元、可变刀口狭缝和中继镜组。其中,光源输出的激光经过扩束准直后进入光瞳整形单元,光瞳整形单元将其整形为特定的照明模式,如传统照明、环形照明、二极照明、四极照明等^[3,19],且部分相干因子 σ 可调,如图 2 所示。不同照明模式对掩模版上各方向分辨率的提高程度不同。这些照明模式位于光瞳整形单元的出瞳处,即匀光单元的入瞳处。光瞳的形状取决于照明模式,光瞳的大小取决于离焦距离和部分相干因子。匀光单元的主要功能是提高照明均匀性,并将光束整形为特

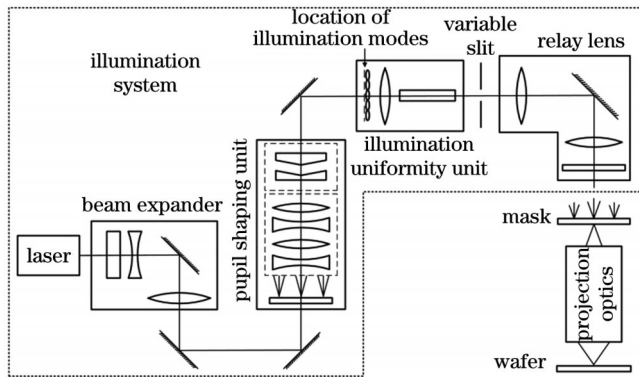


图 1 光刻机照明系统的简化结构

Fig. 1 Simplified structure of a lithography machine

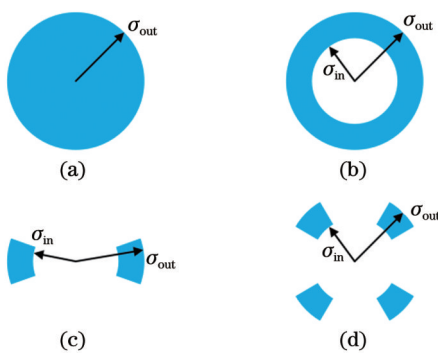


图 2 照明模式与部分相干因子。(a)传统照明;(b)环形照明;
(c)二极照明;(d)四极照明

Fig. 2 Illumination modes and partial coherence factor.
(a) Conventional illumination; (b) annular illumination;
(c) dipole illumination; (d) quadrupole illumination

定形状。IINU 评价的是交叉扫描方向上的综合照明非均匀性^[7],其定义为

$$U_{\text{IINU}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: I_{max} 和 I_{min} 分别为扫描方向上辐照度积分值(以下简称“照度积分”)的最大值和最小值。在 110 nm 节点光刻机照明系统中,要求 IINU 约为 0.7%^[7,20]。

2.2 MLA

如图 3 所示,目前常见的基于 MLA 的匀光单元由 MLA 和聚光透镜(镜组)组成。MLA 可由多个尺寸相同的微透镜并列排布构成,也可由在两个面上方向正交的微柱面镜阵列构成。入射的准直光束由各独立的微透镜孔径分割为不同的通道,所有通道中的光束被聚光透镜折射,随后叠加在聚光透镜的后焦平面上。其中中间实焦面处的第二排 MLA(如图 3 中虚线所示)作为场镜^[16]。

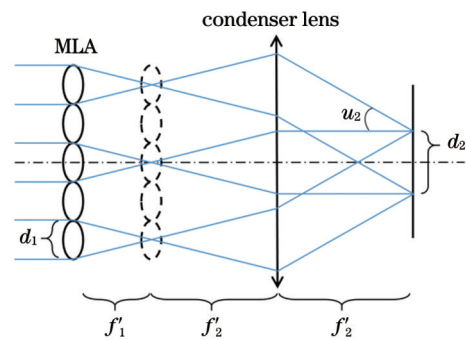


图 3 基于 MLA 的匀光单元的结构

Fig. 3 Structure of the uniformity unit based on MLA

为了使目标平面处的输出光场达到足够的均匀性,微透镜节距(图 3 中的 d_1)需要足够小^[21],实际上可行的微透镜节距一般为 0.5~2 mm。

2.3 积分棒

积分棒利用固体或空心光波导内的多次反射来使入射光分布混合而产生匀光效果^[12],如图 4 所示。图 5 展示了积分棒的光学原理,输入光束在积分棒内传播时,每一次反射都将输入光束的一部分分割出来形成虚的子点光源[如图 5(b)所示],原角度域被划分成多个角度通道[如图 5(a)所示],虚点源与子通道一一对应。每经过一次反射,相应通道原本自由传播[如图 5(a)中的蓝色实线所示]的分布将反向折叠一次。最后,各通道的分布在出口处叠加形成均匀的照度分布^[22]。

积分棒的匀光效果随着侧面全反射次数的增加而改善^[21]。最大角度光线的反射次数为 $m =$



图 4 积分棒的匀光效果示意图

Fig. 4 Schematic of the uniform effect of the integrator rod

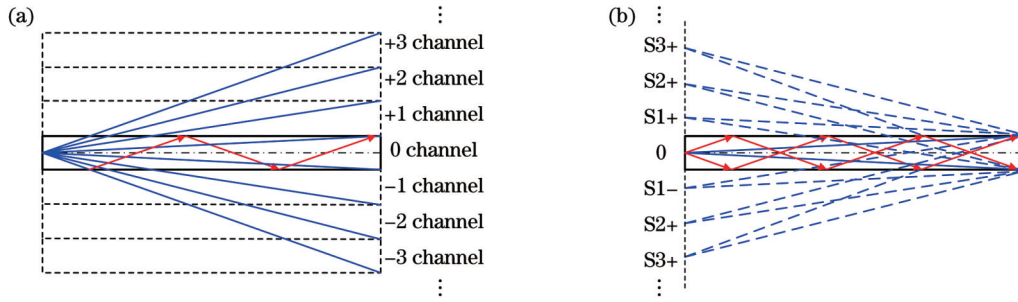


图 5 积分棒的光学原理示意图。(a)角度通道;(b)虚的子点光源

Fig. 5 Schematics of the optical principle of the integrator rod. (a) Angle channels; (b) virtual point sub-sources

$[L \tan(\alpha)/b]$, 其中 α 为输入光束在积分棒内的孔径角, L/b 为积分棒的长度 L 和宽度 b 的比值(长宽比), 中括号表示取整。这意味着, 要实现足够次数的反射, 光束的数值孔径就要足够大, 同时积分棒的长宽比也要足够大。

3 设计方法

笔者提出的匀光单元方案旨在满足高匀光需求的条件下, 相比传统的积分棒方案能够缩减积分棒的长宽比, 而且结构复杂度和加工难度能够比双排 MLA 方案有所下降。由于光刻机照明系统的部分相干因子 σ 可调, σ 较小必然导致积分棒的数值孔径较小, 此时若要使积分棒内的光线达到足够多的反射次数, 积分棒的长宽比需要非常大。因此, 为了使小长宽比的积分棒能够应用于高匀光需求的场合, 需要针对积分棒的输入光场需求展开研究。此外, 匀光单元作为非成像系统, 若基于传统的评价函数进行优化设计, 则结果难以满足性能要求。因此, 需要构造能够反映匀光单

元透镜组性能的自动优化评价函数, 以获得更佳结果。

3.1 小长宽比积分棒的输入光场需求研究

根据文献[21], 利用相空间传播理论对小长宽比积分棒进行分析。输入光场的原角度域划分出的子通道是成对的, 成对通道的反射次数相等。因此, 为了得到对称性好的出射光瞳, 要求入射光束的角度分布对称。

为了简化问题, 将输入的对称分布定义为均匀分布。图 6 展示了一个均匀分布的输入在矩形积分棒中自由传播后的相空间分布变化以及未经折叠的照度分布, 其中, 横坐标表示光线的横向空间位置, 纵坐标表示光线的角度, E 表示照度, 虚线分割的区域代表不同的通道, α 表示光束孔径角, w 表示输入光束的宽度, W 表示积分棒口径, L 表示积分棒长度。图 6(a) 为输入均匀相空间分布, 图 6(b) 为经过积分棒长度的自由传播后未经折叠的输入的相空间分布, 图 6(c) 为输入的照度分布, 图 6(d) 为自由传播后未经折叠的输出照度分布。

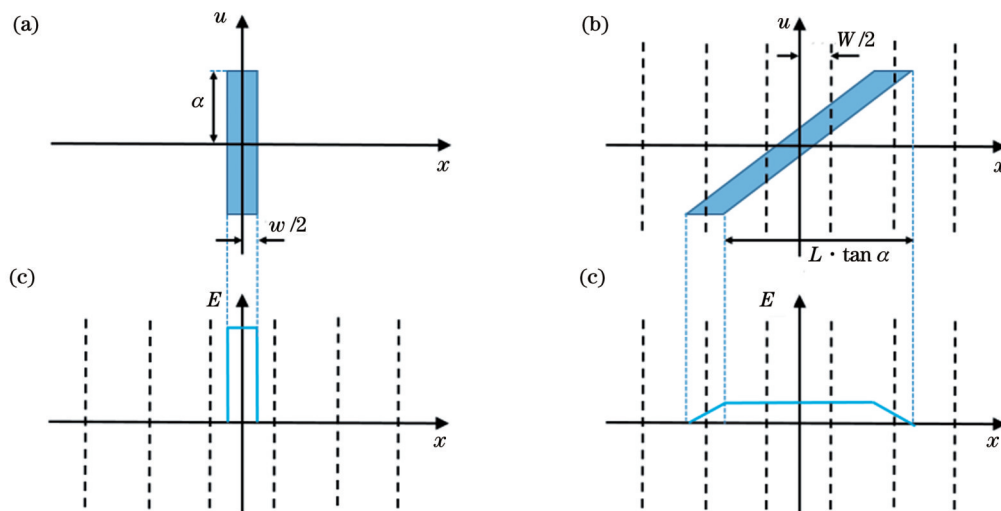


图 6 一个均匀分布的输入经过自由传播后的变化。(a)输入均匀相空间分布;(b)输入经过自由传播后的相空间分布;(c)输入的照度分布;(d)未经折叠的输出照度分布

Fig. 6 Variation of the input with a uniform distribution after free propagation. (a) Uniform distribution of the input in phase space; (b) distribution in phase space after free propagation of the input; (c) irradiance distribution of the input; (d) irradiance distribution of the unfolded output

这种情况下,如图 6(d)所示,均匀分布的输入经过自由传播后被横向展宽,中间通道的照度分布都是均匀的,照度斜坡位于边缘处的几个通道中。所以,照度斜坡在出射端叠加时需要互相完全补偿,最后才能得到均匀的输出光分布,如图 7(a)所示。其中,细实线代表边缘通道的照度分布,粗实线代表所有通道的照度叠加结果。若补偿不足,则会造成起伏状的照度不均匀结果,如图 7(b)所示。

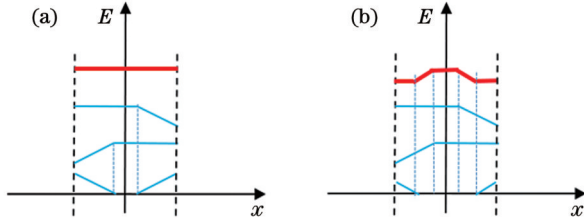


图 7 边缘通道照度分布的叠加结果。(a)均匀结果;(b)一种不均匀结果

Fig. 7 Superposition distribution results of edge channels. (a) A uniform result; (b) a non-uniform result

边缘通道照度斜坡叠加后完全补偿的方法有两种:1)使 $L \tan \alpha$ 为 W 的奇数倍;2)使输入光场宽度 $w = W$ 。由于孔径角 α 是可变的,所以第一种方法很难实现,相比之下第二种方法更易实现。为了验证该方法的有效性,图 8 展示了两个孔径角相同、宽度不同的输入光场对应的出射端照度分布的仿真结果。其中,输入光束的数值孔径为 0.144,积分棒在 X 方向的长宽比为 13:1,接收器的离焦量为 2 mm。当输入光场 X 方向宽度小于积分棒入射端 X 方向宽度时(约为 1/4 入射端 X 方向宽度),意味着输入分布在整个入射端面的 X 方向上是不均匀的,该情况下输出照度分布的顶部呈斜坡状;当光源 X 方向宽度等于入射端 X 方向宽度时,顶部不会产生这种斜坡。

为了保证在不同输入孔径角下出射端的照度分布都足够均匀,本方案要求积分棒输入光场 X 方向宽度等于积分棒入射端 X 方向宽度,而且输入的照度分布在 X 方向上均匀。为了获得这种单个方向上的均匀分布,使用微柱面镜阵列^[17]进行预匀光。

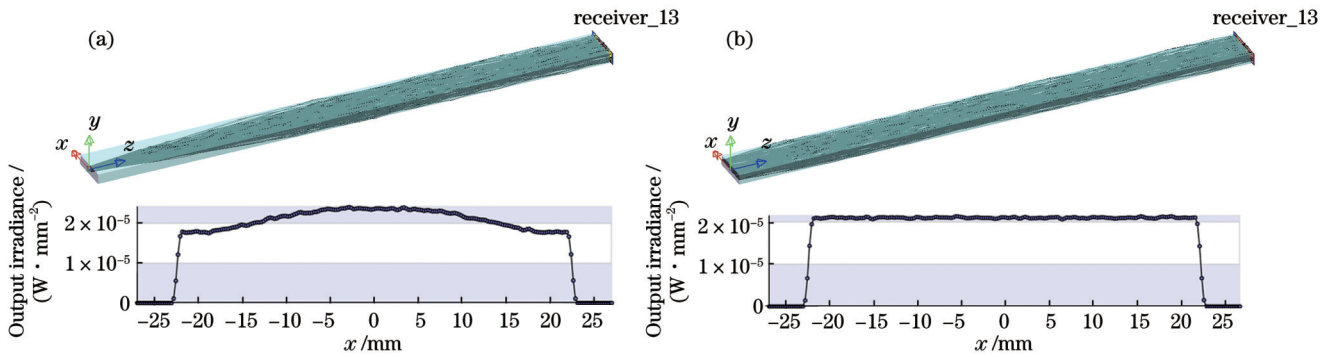


图 8 不同光源宽度(x方向)下输出照度分布的仿真结果。(a)光源宽度明显小于积分棒宽度;(b)光源宽度等于积分棒宽度

Fig. 8 Simulation results of the output irradiance profile under different source widths in x direction. (a) Width of the source is smaller than that of the integrator rod; (b) width of the source is equal to that of the integrator rod

3.2 匀光单元的结构

本文提出的基于 MLA 和积分棒的匀光单元方案如图 9 所示,其中 MLA 采用单排 PCMCLA 的形式。积分棒入射端位于聚光镜组的后焦面,一个只在 X 方向有光焦度的单排 PCMCLA 位于聚光镜组前方,

且 PCMCLA 与聚光镜组在 X 方向共焦。PCMCLA 和聚光镜组的功能是在积分棒入射端处产生一个 X 方向均匀分布的光场,以满足 3.1 节对积分棒 X 方向输入分布所提出的要求。每个微柱面镜和聚光镜组在 X 方向上形成了一个无焦望远镜系统,入射光由每个独立

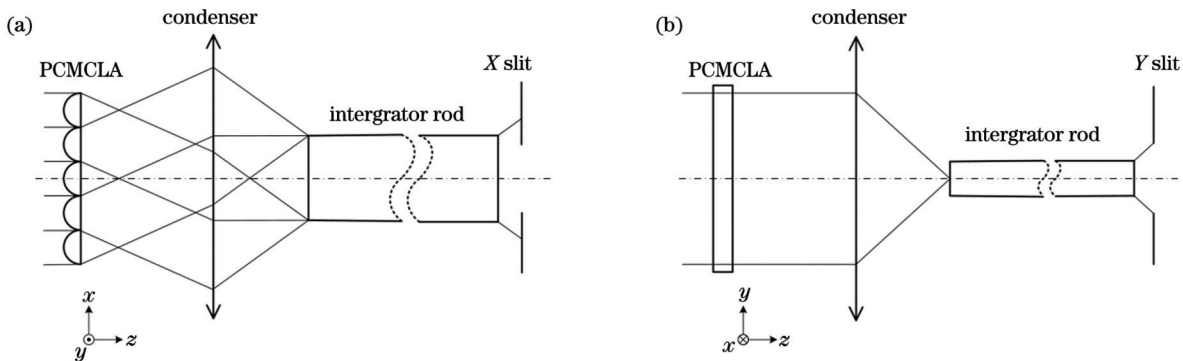


图 9 所提匀光单元的结构示意图。(a)X 方向的结构(俯视图);(b)Y 方向的结构(正视图)

Fig. 9 Structure scheme of the proposed illumination uniformity unit. (a) Structure in the X direction (top view); (b) structure in the Y direction (front view)

的微柱面镜孔径分为不同的通道,各通道的光束被聚光镜组折射后的角度不同,所有的通道角度构成了积分棒输入光场的角度分布。每个微柱面镜的输入光束在 X 方向上被扩束,同时在 Y 方向上被会聚,所以积分棒入射端的输入分布是一个条状光斑,这样可防止积分棒入射光束过度聚焦导致的热损伤。积分棒的主要作用是匀化 Y 方向的光分布。本方案与 ASML 公司的 MLA 加积分棒的匀光单元方案^[13]有所不同:ASML 方案中主要起匀光效果的是二维排布的 MLA,该 MLA 同时实现 X 、 Y 两个正交方向的匀光,其积分棒只起到进一步辅助匀光的作用;而本方案中采用单排一维列布的 PCMCLA 实现 X 单方向匀光,同时采用积分棒实现 Y 单方向匀光。

考虑到镜组的结构与成本,本方案中聚光镜组中的透镜数量取 3 片。该匀光单元的组成部分包括 1 个单排 PCMCLA、3 片式聚光镜组和 1 个矩形积分棒。

3.3 评价函数

传统成像系统优化设计一般使用基于弥散斑 RMS 值、调制传递函数或波像差的评价函数^[23],但照明系统匀光单元属于非成像系统,更注重目标区域内的光能分布均匀性。因此,无法直接将传统的几何像差指标作为本匀光单元优化设计的评价函数。龚爽等^[20]基于余弦辐射体的光线角度分布特性,提出了利用出射光瞳数值孔径的平方值来表征像面照度的方法,并建立了光刻机照明系统中继镜组的优化评价函数,其关注点为像方视场内的数值孔径分布均匀性。受该方法启发,笔者采用逆向光路分析法,假设本匀光单元的目标视场照明均匀(光线横向分布均匀),反推出了中间实像点处光线方向余弦的分布为线性分布。相比于文献^[20],本文更关注中间实像点处光线的方向余弦分布,因此采用光线方向余弦的分布偏差表征照明均匀性,构建光刻机照明系统匀光单元的自动优化评价函数。

如图 10 所示,在 X 方向上,任取 PCMCLA 的一个通道进行分析。在微柱面镜和聚光镜组的共焦点处建立直角坐标系,微柱面镜的出射光线 \overline{OP}_c 的方向角 θ_M

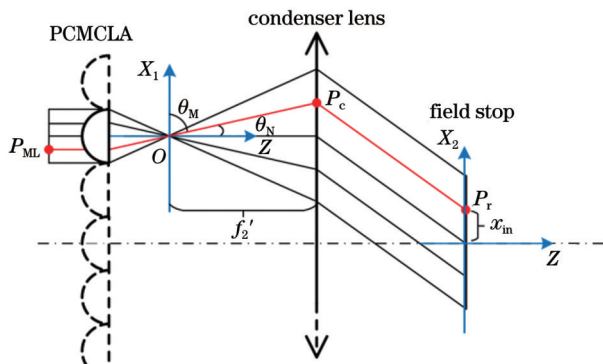


图 10 所提匀光单元中光线分布的几何原理(俯视图)

Fig. 10 Geometric principle of the ray distribution in the uniformity unit (top view)

同该光线经过聚光镜组后与积分棒入射面的交点 P_r 的横坐标 x_m 的几何关系为线性关系,即

$$\cos \theta_M = \sin \theta_N = \frac{x_m}{f_2'} \quad (2)$$

式中: θ_M 为微柱面镜的出射光线与所建坐标系 X_1 轴的夹角; θ_N 为微柱面镜的出射光线与 Z 轴的夹角; x_m 为积分棒入射光线在积分棒入射端面上的横坐标; f_2' 为聚光镜组的焦距。

因此,在 X 方向上,积分棒入射光束的空间分布与微柱面镜出射光线的方向余弦分布为线性关系。积分棒入射端的照度分布与积分棒入射光线的空间横向分布等效,所以积分棒入射端处的均匀照度要求等效于共焦点处光线方向余弦的特定线性分布要求。因此,对于微柱面镜,要求其全光瞳内 0° 视场光线的出射方向余弦分布是均匀的;而对于聚光镜组,要求不同视场下全光瞳光线的出射方向余弦分布皆接近于理想的均匀分布。对微柱面镜轴上焦点弥散斑和聚光镜焦面上各视场弥散斑的要求可适当放宽,以便更有效地控制光线的方向余弦分布。

本文采用光线方向余弦的分布偏差表征照明均匀性,将微柱面镜与聚光镜组中间共焦点处光线方向余弦的理论值作为目标值,将各视场各归一化光瞳的光线方向余弦与其理论值的偏差的加权平方和作为自动优化时的评价函数。评价函数的表达式为

$$U = \sum_i \sum_j \omega_{i,j} (M_{i,j}^t - M_{i,j}^l)^2 \quad (3)$$

式中: i 为视场编号; j 为归一化光瞳编号; $\omega_{i,j}$ 为第 i 个视场、第 j 个归一化光瞳的权重; $M_{i,j}^t$ 为对应光线的出射方向余弦的真实光线追迹值; $M_{i,j}^l$ 为对应光线的出射方向余弦的理论值。

该评价函数描述了实际光线方向角分布与理想角分布的偏差。评价函数的值越小,表示实际光线方向余弦的分布与均匀分布越接近,积分棒入射端处的照度分布越均匀。此外,为了进行对比,本文亦进行了基于传统弥散斑 RMS 评价函数的自动优化设计(以下称“对照组”),并在 4.4 节中展示了其仿真结果。

4 光学设计与仿真

4.1 积分棒设计

为了匹配 KrF 光刻机投影物镜、中继镜组数值孔径和放大率的设计参数要求,积分棒入射端数值孔径的最大值取 0.5125,最大孔径角取 30.83° 。根据文献^[12]中矩形积分棒的设计方法进行积分棒设计,为了达到输出光场的矩形面积要求,本方案积分棒的入射端有效横截面尺寸取 $44 \text{ mm} \times 10.4 \text{ mm}$ 。为留出加工余量,积分棒的实际横截面尺寸取 $45 \text{ mm}(X) \times 11.5 \text{ mm}(Y)$,材料为熔石英,适用波长为 248 nm。

由于本方案中积分棒的主要功能是匀化 Y 向光分

布,所以积分棒的长度需要保证 Y 向的最小数值孔径 ($NA_{min} = 0.147$) 的光束有足够多的反射次数,以达到匀光指标。为使匀光单元的整体长度不超过 900 mm,积分棒长度取 600 mm,对应的反射次数为 5 次,积分棒的长宽比为 13:1(X)和 52:1(Y)。该长宽比与文献 [12] 中采用的积分棒相比明显更小。

4.2 PCMCLA 设计

根据本文所提匀光单元的性能要求,确定 PCMCLA 的设计参数如下:波长 248 nm,单元节距 0.6 mm,微柱面镜数量 215 个,总口径 129 mm,焦距 1.6 mm,透镜材料为熔石英。

根据平凸透镜曲率半径-焦距公式,计算得微柱面镜的初始曲率半径为 0.81376 mm。在 CODE V 软

件中,针对 1 个视场 (0°) 和 10 个等间距归一化光瞳 ($0.1 \sim 1.0$, 步长 0.1) 构造自定义优化评价函数,优化后得到结构参数 (表 1) 和结构图 (图 11),其中:圆锥系数为 -0.66508 ,中心厚度为 1.8 mm,后表面到最佳像面的距离 (即后截距) 为 0.407 mm。所提评价函数 U 值为 1.387×10^{-6} ,几何弥散斑直径为 $7.743 \mu\text{m}$ 。作为对照组的传统弥散斑 RMS 评价函数下的优化结果如下: U 值为 3.114×10^{-3} ,几何弥散斑直径为 $0.009 \mu\text{m}$ 。出射光线方向余弦的绝对偏差分布如图 12 所示,其中横坐标为归一化光瞳坐标,A 曲线为所提评价函数下的优化结果,B 曲线为对照组的优化结果。可见,经所提评价函数优化后光线方向余弦的分布更接近理想分布。

表 1 微柱面镜的结构参数

Table 1 Structure parameters of the micro-cylindrical lens

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-aperture /mm
Object	Sphere	Inf.	Inf.		
1 (stop)	Sphere	Inf.	0		0.3
2	Y toroid	0.814	1.8	'C7980'	0.3
3	Sphere	Inf.	0.407		0.3
4 (image)	Sphere	Inf.	0		0.3

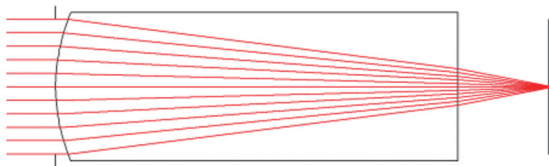


图 11 微柱面镜的结构示意图

Fig. 11 Structure diagram of the micro-cylindrical lens

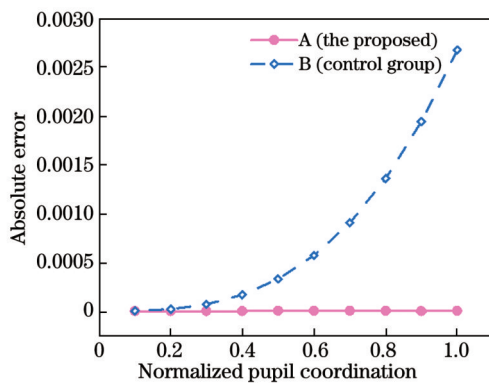


图 12 微柱面镜的出射光线方向余弦的绝对偏差分布曲线

Fig. 12 Profile of absolute error of the exiting rays' direction cosine of the micro-cylindrical lens

4.3 聚光镜组设计

根据本文所提匀光单元对聚光镜组的性能要求,采用逆向设计方法,将原本的视场光阑作为入瞳,将原入瞳作为视场光阑,确定聚光镜的设计参数如下:波长 248 nm,焦距 120 mm,通光口径 $\Phi = 126 \text{ mm}$,像方数值孔径 0.1875,物方视场角 $\pm 31.67^\circ$,物面尺寸

45 mm,光阑与第一表面的距离不小于 20 mm,系统总长不大于 250 mm,透镜数量 3 片,透镜材料为熔石英。

在 CODE V 软件中,针对 6 个视场 ($0^\circ, 9.6^\circ, 16.0^\circ, 22.6^\circ, 27.2^\circ, 32.0^\circ$) 和 21 个等间距归一化光瞳 ($-1.0 \sim 1.0$, 步长为 0.1) 构造自定义优化评价函数,优化后得到结构参数 (表 2) 和结构图 (图 13),其中:表面 6 为非球面,圆锥系数为 1955.045,4 阶系数为 -1.9151×10^{-7} 。所提评价函数的 U 值为 0.07911。对照组优化结果显示 U 值为 2.612。出射光线方向余弦的绝对偏差分布曲线如图 14 所示,A 曲线为所提评价函数下的优化结果,B 曲线为对照组的优化结果。可见,经所提评价函数优化后光线方向余弦的分布更接近理想分布。

4.4 仿真分析

为验证笔者基于光线方向余弦分布构造的均匀性评价函数的优越性以及基于该评价函数的匀光单元设计结果的匀光性能,在 LightTools 软件中对所设计的匀光单元整体进行仿真。仿真模型如图 15 所示,从光源到积分棒出射端的总体长度为 852.3 mm,满足匀光单元的长度限制 ($< 900 \text{ mm}$)。采用的照明模式包括传统照明模式和环形照明模式,面光源的光强分布等效于照明模式,光源波长为 248 nm。圆形面光源对应于传统照明模式,环形面光源对应于环形照明模式,圆形面光源的直径和环形面光源的环内外直径分别根据不同的 σ 设置为相应的值。光源位于单排 PCMCLA 的前表面处并与其贴紧,发散角为 1.35° ,追迹光线数量为 2×10^7 ,空间分布和角度分布都为均匀分布,校准公差为 5%。

表 2 聚光镜组的结构参数
Table 2 Structure parameters of the condenser lens

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-aperture /mm
Object	Sphere	Inf.	Inf.		
1 (stop)	Sphere	Inf.	21.24		23.5
2	Sphere	-170.63	52.89	'C7980'	53.5
3	Sphere	-90.58	15.56		53.5
4	Sphere	150.39	31.41	'C7980'	71.0
5	Sphere	-562.10	59.86		71.0
6	Asphere	-3175.97	49.04	'C7980'	72.5
7	Sphere	-136.09	25.47		72.5
8 (image)	Sphere	Inf.	-5.47		65.5

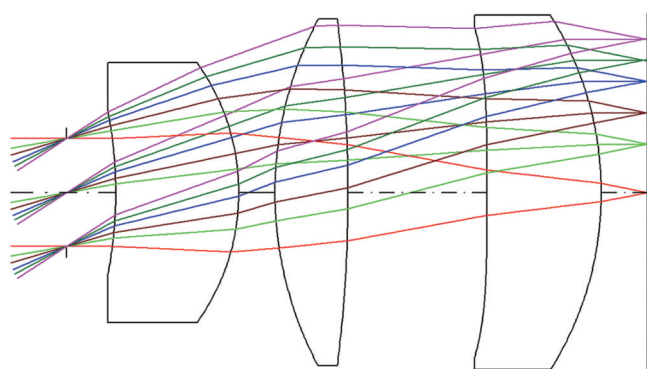


图 13 聚光镜组的光学结构示意图

Fig. 13 Optical structure diagram of the condenser lens

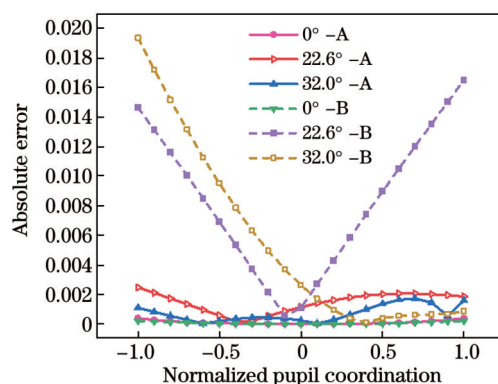


图 14 聚光镜组出射光线方向余弦的绝对偏差分布曲线

Fig. 14 Profile of absolute error of the exiting rays' direction cosine of the condenser lens

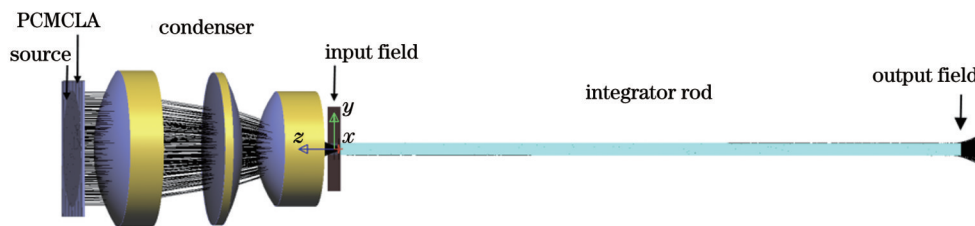


图 15 匀光单元的仿真模型(轴测图)

Fig. 15 Simulation model for the illumination uniformity unit (axonometric view)

经过仿真,在积分棒入射端和出射端分别得到了输入光场和输出光场的照度分布。本方案的结果以字母 A 为标识,对照组的结果以字母 B 为标识。接收器网格照度值采样的估计误差为 1.99%,照度积分的估计误差为 0.15%。

图 16 展示了 $\sigma=0.88$ 的传统照明模式下 A 组输入光场的条形照度分布,该分布符合预期。因为仿真光源加入了发散角这一要素,所以条形分布的 Y 向弥散尺寸比光学设计阶段的弥散斑尺寸更大。在 $\sigma=0.88$ 的传统照明模式下, A 组和 B 组的输入光场顶部的 IINU 分别为 0.41% 和 1.54%;在 $\sigma=[0.88, 0.64]$ 的环形照明模式下,两者的 IINU 分别为 0.54% 和

1.53%。与对照组相比,本方案设计结果的 IINU 更低,证明了本评价函数能够使积分棒的 X 向输入光场更均匀。

图 17 展示了 $\sigma=0.88$ 的传统照明模式下 A 组输出光场的照度分布。对输出光场数据进行处理后,得到了不同 σ 的传统照明模式和环形照明模式下去噪后的归一化照度积分值曲线,如图 18 所示。表 3 展示了 A 组和 B 组对应的 IINU。结果表明, A 组中不同 σ 的传统照明模式和环形照明模式下输出光场的 IINU 皆小于 0.60%, B 组的 IINU 均劣于 A 组。这说明本方案设计结果的输出光场具有更佳的均匀性。综合输入光场和输出光场结果可得,对于小长宽比的积分

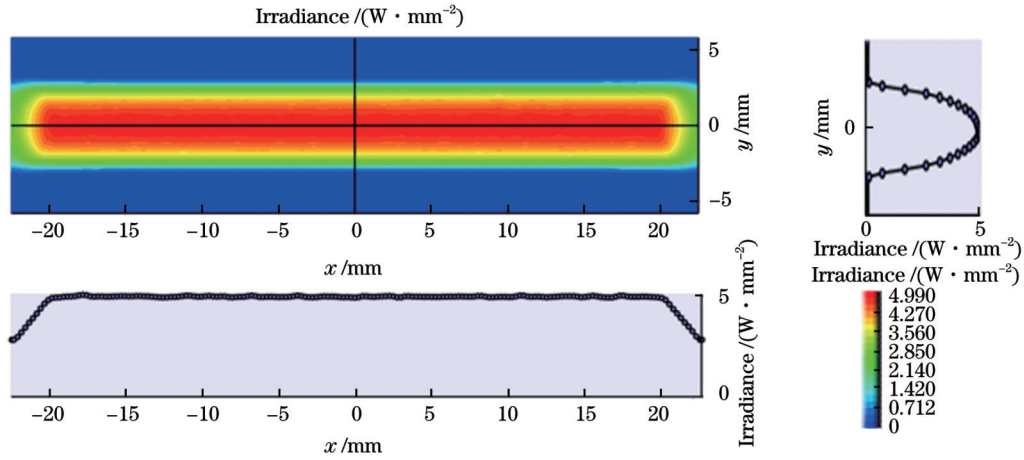


图 16 $\sigma=0.88$ 的传统照明模式下的输入光场照度图和切片曲线

Fig. 16 Diagram and profile of irradiance of the input illumination field under the conventional mode with $\sigma=0.88$

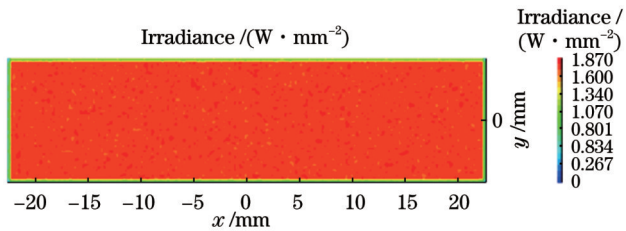


图 17 $\sigma=0.88$ 的传统照明模式下的输出光场照度图

Fig. 17 Diagram of irradiance of the output illumination field under the conventional mode with $\sigma=0.88$

棒,与对照组相比,所提评价函数可使积分棒的 X 向

输入光场更均匀,从而使得输出光场更均匀,满足 IINU 初步指标,证明了笔者所提匀光单元方案的可行性以及所构建均匀性评价函数的优越性。

对于传统照明模式,随着 σ 减小, IINU 增大。这是由于随着 σ 减小,光源面积和数值孔径都减小,从而导致使用到的微柱面镜的数量以及积分棒中最大角度光线的反射次数都减少,在一定程度上影响了匀化效果。对于环形照明模式,当外环直径一定时,环宽越大, IINU 越小。这是因为环宽越大,照明模式就越接近传统照明,而且光源面积和数值孔径增大,

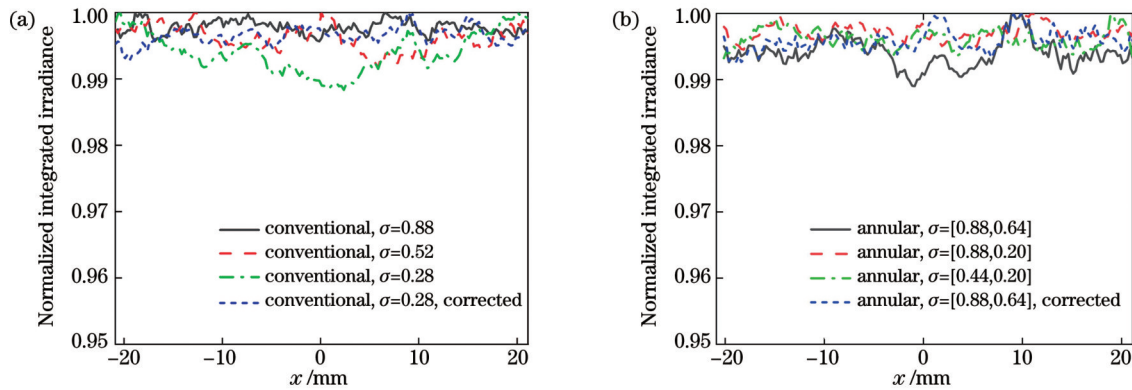


图 18 归一化照度积分值曲线。(a)传统照明模式;(b)环形照明模式

Fig. 18 Normalized integrated irradiance profiles. (a) Conventional illumination mode; (b) annular illumination mode

表 3 不同 σ 下 A 组和 B 组输出光场的 IINU

Table 3 IINU of input optical field of A and B groups under different σ values

Illumination mode	σ	IINU of scheme A / %	Corrected IINU of scheme A / %	IINU of scheme B / %
Conventional mode	0.88	0.31		0.49
	0.52	0.42		1.51
	0.28	0.59	0.35	0.75
Annular mode	[0.88, 0.64]	0.55	0.37	0.63
	[0.88, 0.20]	0.28		0.43
	[0.44, 0.20]	0.42		1.08
Target			IINU is less than or equal to 0.46%	

使用到的微柱面镜的数量以及积分棒反射次数都增多。通过对比环形照明模式下 $\sigma=[0.88, 0.64]$ 和 $\sigma=[0.44, 0.20]$ 这两个环宽相同时的结果可以看出,外环较大时的 IINU 比外环较小时更大。这说明不同归一化光瞳处的光束经过聚光镜组后形成的空间分布的均匀性是有差异的,聚光镜组在大归一化光瞳处的性能劣于小归一化光瞳处的性能。

考虑到后期的加工和装配误差,设计指标应留出余量,按照工程经验,IINU 的设计指标取成品指标(0.7%)的 2/3,即 0.46%。所以需要进一步提升该匀光单元的性能,可在积分棒输出端处加入具有特定透过率分布的灰度滤波器^[24]对 IINU 未达标的光场进行校正。在 $\sigma=0.28$ 的传统模式和 $\sigma=[0.88, 0.64]$ 的环形模式下,校正后的归一化照度积分值曲线分别如图 18(a)和图 18(b)中蓝色小间隔短划线所示,这两条曲线的整体起伏较未校正之前更小,两者的 IINU 分别下降到 0.35% 和 0.37%。此时所有传统照明和环形照明模式下的 IINU 皆小于 0.43%,满足设计指标。

5 结 论

在满足光刻照明均匀性要求的前提下,为了更好地兼顾系统长度、结构复杂度与可制造性,笔者提出了一种基于单排 PCMCLA 与小长宽比积分棒相结合的照明系统匀光单元方案。经理论分析后可知,积分棒横截面宽尺寸方向上的输入光场分布需要同时满足角度对称和照度均匀,且宽度等于积分棒横截面宽度,才可以在输出端得到均匀的光场分布。在积分棒之前使用单排 PCMCLA 进行预匀光可以获得上述输入分布。此外,笔者采用以光线方向角的分布特性表征照明均匀性的方法,构造了用于本匀光单元自动优化设计的评价函数。

以 KrF 光刻机照明系统为例,在 CODE V 中对本匀光单元方案中的 PCMCLA 和聚光镜组进行了优化设计。在 LightTools 中对该匀光单元进行仿真验证,结果表明,在不同 σ 的传统照明模式和环形照明模式下,输出光场的 IINU 皆小于 0.60%,经灰度滤波器校正后皆小于 0.43%,可以满足照明积分非均匀性小于 0.46% 的设计指标。与常规积分棒方案、MLA 方案相比,本方案能够更好地兼顾系统长度、结构复杂度与可制造性。在匀光单元优化设计中构建的评价函数的有效性优于传统弥散斑 RMS 评价函数,对于相关工程设计有一定参考意义。下一步将开展光瞳性能平衡、公差分析等工作。

参 考 文 献

- [1] Levinson H J. Principles of lithography[M]. Bellingham: SPIE, 2010.
- [2] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.
- [3] 刘佳红, 张方, 黄惠杰. 步进扫描投影光刻机照明系统技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922011.
- [4] 郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-25.
- [5] 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.
- [6] Park J R, Kim S H, Yeo G S, et al. Improvement of shot uniformity on a wafer by controlling backside transmittance distribution of a photomask[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 553-560.
- [7] Gong S, Yang B X, Huang H J. Illumination uniformity correction by using dynamic gray filters in a lithography system[J]. Applied Optics, 2022, 61(10): 2706-2714.
- [8] Ganser H, Darscht M, Miklyaev Y, et al. High-throughput homogenizers for hyper-NA illumination systems[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61542N.
- [9] Bizjak T, Mitra T, Aschke L. Novel high-throughput micro-optical beam shapers reduce the complexity of macro-optics in hyper-NA illumination systems[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 65202X.
- [10] 杨亮亮, 刘成林, 沈法华, 等. 工作在一定入射角度范围内镀有增透膜的衍射光学元件的衍射效率研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1205002.
- [11] Han X, Li L, Huang Y F, et al. Design and analysis of deep ultraviolet microlithography illumination system[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7657: 765715.
- [12] 郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用[J]. 光子学报, 2006, 35(7): 981-985.
- [13] Kruijswijk G S, Dierichs M, Eurlings M, et al. Lithographic apparatus and device manufacturing method: US20060139599[P]. 2006-06-29.
- [14] Tanitsu O. Optical integrator, illumination optical device, photolithograph, photolithography, and method for fabricating device: US20080074631[P]. 2008-03-27.
- [15] Hase T. Illumination system and exposure apparatus: US20050117137[P]. 2005-06-02.
- [16] Chen M, Chen L Q, Zeng A J, et al. Generation of trapezoidal illumination for the step-and-scan lithographic system[J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6820-6826.
- [17] 肖艳芬, 朱菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0216001.
- [18] Mizutani M. Illumination optical apparatus and device manufacturing method: US20160147162[P]. 2016-05-26.
- [19] 甘雨, 张方, 朱思羽, 等. 光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304007.
- [20] Guo L P, Huang H J, Wang X Z. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.
- [21] Liu J H, Zhang F, Huang H J. Research progress on illumination system technology of step-and-scan projection lithography tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922006.
- [22] Liu J H, Zhang F, Huang H J. Research progress on illumination system technology of step-and-scan projection lithography tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922011.
- [23] Guo L P, Huang H J, Wang X Z. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.
- [24] Hu Z H, Zhu J, Yang B X, et al. Far-field multi-parameter measurement of diffractive optical element for pupil shaping in lithography system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0908001.
- [25] Yang L L, Liu C L, Shen F H, et al. Diffraction efficiency of diffractive optical elements with antireflection coatings within a certain incident angle range[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1205002.
- [26] Gan Y, Zhang F, Zhu S Y, et al. Evaluation algorithm of pupil photolithography technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922006.

- characteristic parameters in lithography illumination system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304007.
- [20] 龚爽, 杨宝喜, 黄惠杰. 光刻机照明系统中中继镜组的光场均匀性优化设计[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 0322001.
- Gong S, Yang B X, Huang H J. Optimization design of illumination uniformity of relay lens in lithography illumination system[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3): 0322001.
- [21] Rausch D, Herkommer A M. Phase space approach to the use of integrator rods and optical arrays in illumination systems[J]. Advanced Optical Technologies, 2012, 1(1/2): 69-78.
- [22] Iwasaki K, Hayashi T, Goto T, et al. Square and uniform laser output device: theory and applications[J]. Applied Optics, 1990, 29(12): 1736-1744.
- [23] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [24] He Y, Xing T W, Lin W M, et al. Method for illumination uniformity correction in the illumination system of lithography[J]. Optik, 2021, 228: 166172.

Design and Simulation of Illumination Uniformity Unit in Lithography Illumination Systems

Wang Gang^{1,2}, Li Zhongliang^{1,2*}, Yuan Chunxiao¹, Zhang Fang¹

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Lithography is currently an essential tool in the production of integrated circuits (ICs) and other micro- and nano-scale elements used widely in the electronics industry. The resolutions of deep-ultraviolet step-and-scan dry lithography machines in the international market range from 57 nm to 350 nm. The illumination system is an important component of the lithography exposure system. The illumination mode is typically adjustable according to the mask pattern, including a full circle, annular rings, or poles, to improve resolution, imaging contrast, and focal depth. During the IC manufacturing process, the exposure field is scanned using a narrower illumination field. Therefore, illumination-integrated nonuniformity is a key factor in determining the resolution and critical dimension uniformity (CDU), which are crucial to the performance of advanced lithography systems. To obtain higher resolutions and better CDU, the exposure dose must be maintained as uniformly as possible in the scanning direction. The illumination uniformity unit is the primary component for obtaining a uniform illumination field. Currently, the homogenizer elements used in lithography illumination systems include diffractive optical elements (DOEs), microlens arrays (MLAs), and integrator rods. The adoption of DOEs is limited to small angles and reduces transmission efficiency owing to typical diffraction losses. MLAs are refractive optical elements (ROEs) suitable for large numerical apertures (NAs) with minimal energy loss and no effect on laser beam polarization. However, MLAs remain expensive and difficult to process, install, and adjust. Although integrator glass rods are simple in structure, easy to process, and inexpensive, their length-to-width ratio becomes extremely large when small NA and sufficient reflections are required, making them unsuitable for space conservation. This research intends to be beneficial in terms of reducing structural complexity and production costs, as well as improving the effectiveness of the illumination uniformity unit's automatic optimization design.

Methods Considering the advantages and disadvantages of the aforementioned homogenizer elements, an illumination uniformity unit comprising a plano-convex microcylindrical lens array (PCMCLA), condenser lens group, and a rectangular integrator rod is proposed in this study to obtain the uniform rectangular illumination field required in dry lithography. Compared with the current common uniformity unit structure based on double MLAs, the proposed structure reduces the MLA and the number of lens pieces in the condenser lens group. An MLA is typically made up of multiple microlenses of the same size arranged side by side. The aperture of each microlens divides incident light into different channels, indicating differentiation. The beam in each channel is refracted by a lens called an integrator or condenser lens. Subsequently, all channels are superimposed on the rear focal plane of the condenser lens, which is equivalent to integration. The operating principle of an integrator glass rod is based on multiple reflections that mix the incident light distribution and produce a homogenizing effect. Hence, the combination of these two elements can achieve illumination uniformity in the X and Y directions, respectively, which can be suitable for the small NA case triggered by a small partial coherence factor σ . Then, via geometric analysis, we inferred that in the X -direction, the spatial distribution of the incident beam of the integrator is linear with the direction cosine distribution of the outgoing light from the microlens. Accordingly, to obtain the optical optimization design of the plano-convex microcylindrical lens and condenser lens group in the CODE V software, the weighted square sum of the difference between the cosine value of each relative pupil ray's exit direction and its ideal value was adopted as an evaluation function. Taking the KrF lithography exposure system as an example, an illumination uniformity unit was designed via automatic optimization based on the evaluation function and conventional evaluation function of the diffusion spot root-mean-square (RMS). Subsequently, the obtained structural model of the uniformity unit was simulated using the LightTools software.

Results and Discussions The simulation results (Table 3) indicate that the non-uniformity of all types of output illumination in the simulation [illumination-integrated nonuniformity (IINU) of scheme A in Table 3] is less than 0.60% under different coherence factors, which is better than the contrasted optimization results [IINU of scheme B in Table 3] based on the conventional evaluation function of the diffusion spot RMS. For conventional illumination, IINU increases with the decrease in σ because this decrease implies a decrease in the light source area and NA. This decrease triggers a decrease in the number of microlenses involved and the reflection times of the extreme ray in the rod, which affects the homogenizing effect to some extent. When the outer ring diameter remains constant in annular illumination, IINU is getting smaller with increasing ring width. This is because the larger the ring width, the more similar the illumination pattern is to that of conventional illumination. In addition, when the ring width is constant, IINU is worse when the outer ring is larger than that when the outer ring is smaller. This is because the performance of the condenser lens with a large relative pupil is inferior to that with a small relative pupil. To further improve the performance of the proposed structure, different grey filters with specific transmittance distributions are added at the output end of the integrator rod to correct the illuminance distribution of the illumination fields with poor uniformity. Subsequently, the simulation results [corrected IINU of scheme A in Table 3] reach the IINU target of less than 0.43%. The corresponding normalized integrated irradiance profiles derived from the proposed design are presented.

Conclusions The proposed structure of the illumination uniformity unit in lithography exposure systems comprises a PCMCLA, three-piece condenser lens group, and a rectangular integrator rod. To obtain the automatic optimization design of the microlens and condenser lens groups, an evaluation function based on the angle cosine distribution of light rays is proposed to characterize illumination uniformity. The simulation results indicate that the designed structure achieves the requirement of IINU ($\leq 0.46\%$), and verify that the proposed evaluation function is more effective than the conventional evaluation function of diffusion spot RMS, thereby providing a simply constructed and economical reference for related engineering.

Key words optical design; lithography; illumination system; homogenizer; illumination uniformity