文章编号　1004-924X(2016)04-0740-07

高数值孔径投影光刻物镜的光学设计

徐明飞[1,2*]，庞武斌[1]，徐象如[1,2]，王新华[1]，黄　玮[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：针对 45 nm 节点投影光刻物镜的应用，开展了工作波长为 193 nm 的深紫外浸没式高数值孔径(NA)投影光刻物镜的研究和研制。设计了数值孔径(NA)为 1.30 的离轴三反射镜投影光刻物镜和 NA 为 1.35 的同轴两反射镜投影光刻物镜，并对两个设计方案的优劣进行对比分析，选择了同轴式结构作为最终的设计方案。分析了系统在不同 NA 情况下可变光阑与其远心度之间的关系，提出了用双可变曲面光阑的设计方案来优化系统的远心度。实验表明，应用本文设计方案，光刻物镜的波像差小于 1 nm，畸变小于 1 nm；新型的可变光阑使系统 NA 在 0.85～1.35 变化时的最大远心度由 5.83～17.57 mrad 降低至 0.26～3.21 mrad。本文提出的设计方案为 45 nm 节点高数值孔径投影光刻物镜的研制提供了有益的理论依据和指导。

关　键　词：光学设计；高数值孔径(NA)投影光刻物镜；深紫外投影光刻物镜；远心度；曲面光阑

中图分类号：TN305.7；TH703　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20162404.0740

Optical design of high-numerical aperture lithographic lenses

XU Ming-fei[1,2*], PANG Wu-bin[1], XU Xiang-ru[1,2], WANG Xin-hua[1], HUANG Wei[1]

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: stone*870914@163.*com*

Abstract: For the manufacture of a lithographic lens with a 45 nm node, this paper focuses on the development of high numerical aperture (NA), deep ultraviolet (DUV) immersion lithographic lenses. Firstly, an off-axis three mirror projection lithographic objective with the NA of 1.30 and a coaxial two mirror projection lithographic objective with the NA of 1.35 were designed. Two design methods and results were compared and the latter was chosen to be used final design. Then, the relationship between variable stop aperture and telecentricity under different NAs was analyzed. A scheme of dual variable curved apertures was proposed to reduce the image telecentricity of a lithographic lens. The final results show that both wavefront errors(Root Mean Square ,RMS) and distortion of the lithographic lens are less than 1 nm by using the proposed scheme. The new scheme with dual variable curved apertures makes the maximum telecentricity decreases from 5.83－17.57 mrad to 0.26－3.21 mrad when NA varies from 0.85 to 1.35. This scheme provides an advantageous theoretical guidance

收稿日期：2015-04-29；**修订日期**：2015-06-09.

基金项目：国家科技重大专项基金资助项目(No. 2012ZX02701001-007)

and basis for research and development of the lithographic lens with 45 nm node.

Key words: optical system design; high Numerical Aperture (NA) lithographic lens; Deep Ultraviolet (DUV) lithographic lens; telecentricity; curved stop aperture

1 引　言

大规模集成电路制造的核心设备是光刻机。我国的光刻技术研究起步较晚，且进展较为缓慢，水平与国外的差距十分明显。为了具有自主研发高端集成电路的能力，我国开始了极紫外(EUV)光刻技术和深紫外 193 nm 光刻技术[1-4]的研究。

目前，国际上最先进的 193 nm 投影光刻物镜的 NA 超过 1.30，像方视场可达 26 mm×5.5 mm，波像差小于 1 nm，畸变小于 1 nm。不过，该系统是折反式结构且像方浸液，元件数目超过 25 个，设计难度非常大[5-6]。现有的高 NA 投影光刻物镜专利绝大多数来自于 Zeiss、Nikon 和 Cannon，国内关于此方面的研究尚无公开报道。

光刻系统作为现代最精密、最复杂的光学系统之一，其物镜在保证高数值孔径(Numerical Aperture, NA)、极小像差的前提下，还要满足双远心、大视场等要求。一般情况下，光刻物镜要求 NA 在一定范围内可变化，这需要通过调节孔径光阑的尺寸来实现；同时，还要保证光刻物镜在 NA 变化时像方远心度越小越好。在描述光刻物镜的远心度时，成像光锥角平分线比主光线的精度更高。角平分线远心度主要受孔径光阑位置的影响，因此在光刻物镜设计完成后可以通过光阑设计进一步控制远心度。本文完成了 45 nm 节点光刻机的高 NA 浸没式光刻投影物镜的光学设计，并采用双可变曲面光阑降低了系统不同 NA 时的远心度。

2 光学设计

2.1 光学结构与优化设计

用于制作 193 nm 投影光刻物镜的光学材料仅有 CaF_2 和熔石英。CaF_2 材料的最大优点是色散非常低，与熔石英结合使用可以较好地校正光刻物镜的色差。然而，折反式光刻物镜的结构形式决定其色差比折射式要低，随着准分子激光器的进步，ArF 光源的光谱线宽越来越短，所以 CaF_2 在光刻物镜中的使用越来越少。此外，CaF_2 非常昂贵且存在本征双折射，所以这里选用熔石英材料来制作高 NA 投影光刻物镜。本设计所使用的熔石英在波长 193.368 nm、22 ℃和标准大气压下的折射率为 1.560 307，色散为 -1.6×10^{-6}/pm。

Tomoyuki[5] 等人指出：在光刻物镜中，当 NA 超过 0.75 时，系统需要采用非球面；当 NA 超过 0.95 时，系统要采用像方浸液技术；当 NA 超过 1.1 时，系统要加入反射镜组成折反式结构；否则，系统的元件口径会急剧增大。193 nm 高 NA 投影光刻物镜都是折反式系统。折反式结构除了有利于提高系统 NA 之外，还有利于降低系统色差。然而折反式系统的设计较为困难，其主要原因是要防止系统内多个反射镜相互遮拦成像光束[5-6]。目前，高 NA 投影光刻物镜的主流结构形式主要有同轴两反射镜系统[7]和离轴三反射镜系统[8]两种。这两种结构的应用最广，且在反射镜数量、系统复杂程度、结构尺寸等方面容易满足设计要求。

光刻物镜的光学系统与传统成像光学系统相比有较大差异。作为现代最复杂的极小像差光学系统，高 NA 投影光刻物镜通常包含多个非球面，并采用离轴视场[5-6]，在这里赛德尔像差理论仅适用于定性分析像差；而且也很难通过使用 PW 算法求解高 NA 光刻物镜的初始结构。单纯地依靠脑力和经验无法完成高 NA 投影光刻物镜的设计。本文参考国外高 NA 投影光刻物镜的结构形式，使用 Code V 光学设计软件，通过编写自定义宏程序来完成高 NA 投影光刻物镜的光学设计。

在使用软件进行优化设计时应注意以下几点：第一，防止反射镜组相互遮拦成像光束，主要手段是选择合适的视场离轴量和反射镜间距，并通过宏程序强制约束反射光线的空间位置。第二，保证光学元件的中心厚、边缘厚等加工条件以及元件装卡机械结构的空间预留量。第三，尽量简化系统结构，减少镜片和非球面的数量，降低元件口径等。第四，控制元件各个表面的最大光线入射角，降低系统的公差敏感度和偏振像差。

本文分析了两种光刻物镜各自的结构特点，并对它们进行了优化。图 1 为同轴两反高 NA 投影光刻物镜结构的优化结果。该结构主要包括折射镜组、反射镜组和数值孔径组。折射镜组和反射镜组的主要功能是平衡系统像差，数值孔径组将中间像传承到像面上并保证较大的数值孔径和较小的远心度。其中反射镜组由 2 个反射镜组成，且光轴与折射镜组相同。反射镜组之间的成像光束近似平行，使反射镜组两端的两个中间像比例接近 1∶1，有助于校正像差。反射镜组的最大作用是提供匹兹凡和，用以校正折射镜组和数值孔径组产生的场曲。

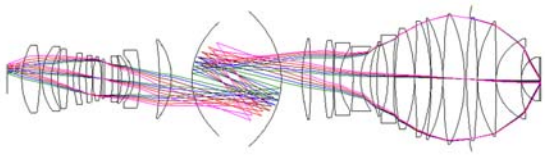

图 1　同轴式光刻物镜的设计结果

Fig. 1　Layout of in-line lithographic lens

图 2 为离轴三反高 NA 投影光刻物镜结构。该结构包含 3 个反射镜，其中 2 个是平面反射镜，1 个是凹面反射镜，反射镜组的光轴与折射镜组的光轴垂直。系统内部包含 2 个中间像。该结构的最大特点是使用了 Schupmann 中继结构，即在光瞳附近用了一片凹面反射镜和一个负透镜组[9-10]。该子系统的放大率接近 1，并且接近光瞳，所以不会附加非对称性像差。负透镜组与凹面反射镜组合使用可以很大程度上矫正场曲，并在一定程度上降低色差。选择曲率适当的反射镜和凹透镜组有利于降低中间像的像差，进而降低整个光刻物镜的像差。

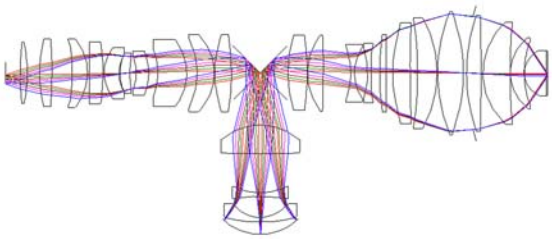

图 2　离轴式高投影光刻物镜的设计结果

Fig. 2　Layout of off-axis lithographic lens

上述两种结构的高 NA 投影光刻物镜的具体参数如表 1 所示。

表 1　光刻物镜的设计参数

Tab. 1　Parameters of in-line and off-axis lithographic lenses

参数	同轴结构	离轴结构
NA	1.35	1.30
像方视场/(mm×mm)	26×5.5	26×5.5
倍率	−0.25	−0.25
总长/mm	1 300	1 300
物方工作距/mm	35	35
像方工作距/mm	3.1	3.1
单色波像差/nm	≤0.65	≤0.57
畸变/nm	≤0.87	≤1.51
远心度/mrad	≤4.2	≤2.7
NA 一致性	≤±0.001 8	≤±0.002 3
元件数	27	28
最大元件口径/mm	311.6	288.9
非球面数	19	20
反射镜数	2(皆是非球面)	3(1 个非球面)
最大非球面度/mm	3.1 mm	2.4 mm

高 NA 投影光刻物镜对像质的要求十分苛刻，一般要求波像差 RMS 小于 1 nm。为了达到这个目标，首先物镜光学设计的名义波像差要小于 1 nm；其次要保证材料公差、元件加工公差、元件检测公差、元件装配公差等各项公差满足要求；最后还要使用一系列合理、有效的像质补偿措施，以提高物镜装调之后的像质。

选取正确的像质补偿措施和方案能够有效降低系统的公差要求，进而降低物镜的制造成本和难度。目前，Zeiss、Nikon 等光刻物镜制造商所采用的像质补偿措施主要有光学复算、计算机辅助装调技术、元件面形精修技术；此外，还包括一些动态补偿技术，如实时变形镜调整技术、红外热补偿技术等。

2.2　方案对比分析

虽然上述两种设计方案的参数指标总体上都满足设计要求，但它们又有诸多不同。离轴方案中元件个数比同轴方案多一个，非球面个数也多一个，但较难加工的非球面反射镜少一个；同轴方案非球面的最大非球面度大于离轴方案。总的来说，同轴方案的 NA 值大于离轴方案，但代价就是元件的加工难度更高。需要注意的是，这里离轴方案的 NA 值为 1.30，但不代表该方案的 NA 极限值是 1.30。

与同轴方案相比，离轴方案的机械结构更复杂。同轴方案具有唯一的光轴，结构较为紧凑，有

利于折射式光刻物镜的机械设计和装调；而离轴方案具有水平和垂直两个光轴，对机械设计和装调提出了更多挑战。离轴方案中，每个光轴都要具有稳定性，所以需要复杂的机械结构以保证两个光轴之间的垂直关系；其次，需要新型的支撑结构以保证水平光轴（针对实际工作情况而言，即反射镜组的光轴）上的元件在重力的作用下不会产生偏心，此外还需要控制反射镜在重力作用下产生的非对称性形变。由于反射镜位于光瞳附近，这意味着较小的反射镜倾斜就会引起较大的像面倾斜。综上所述，无论是机械结构的复杂度还是装配技术的难度，离轴方案都要比同轴方案高得多。

离轴方案的另一个缺点是它对折射式光刻物镜所用的掩模板没有继承性。因为如果折反式系统中包含奇数个反射镜，那么它在像面所成的像为镜像；而如果折反式系统中包含偶数个反射镜，那么它在像面所成的像与折射式系统相同，所以折射式光刻物镜的掩模板能应用于同轴两反系统，却不能应用于离轴三反系统。

由于浸没式高 NA 投影光刻物镜采用偏振照明方式，所以需要控制系统的偏振像差。偏振像差主要来源于光学材料的应力双折射和系统的膜系[10-11]。当偏振光通过膜系时，偏振像差主要与偏振光的入射角有关。虽然两个方案的透射膜系的光线入射角较为接近，不过三反射镜方案中平面反射镜的光线入射角明显大于两反射镜方案中凹面反射镜的光线入射角，所以前者的偏振像差一般要大于后者。

综上所述，本文选择同轴两反射镜系统作为高 NA 投影光刻物镜的最终设计方案。

由于系统的视场关于 Y 轴对称，在 Y 轴所分割出的半视场内均匀取 24 个视场分析波像差和畸变，结果如图 3 和图 4 所示。最大波像差为 0.64 nm，最大畸变为 0.79 nm。

3　远心度与光阑

3.1　远心度

在传统成像光学系统中，远心度定义为某一视场成像光束主光线与光轴的夹角。投影光刻物镜采用像方远心的目的是为了减小由于硅片离焦或平整度缺陷所引起的畸变，进而保证光刻机的

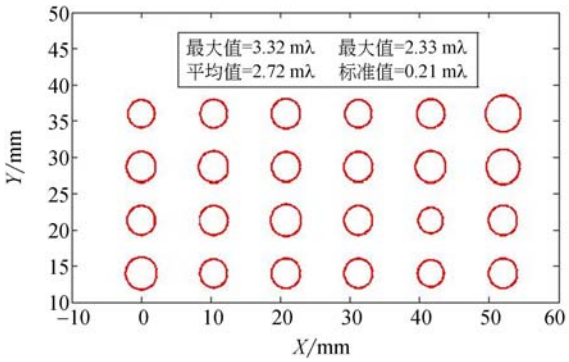

图 3　同轴投影光刻物镜的单色波像差分布

Fig. 3　Distribution of monochromatic wavefront errors for in-line lithographic lens

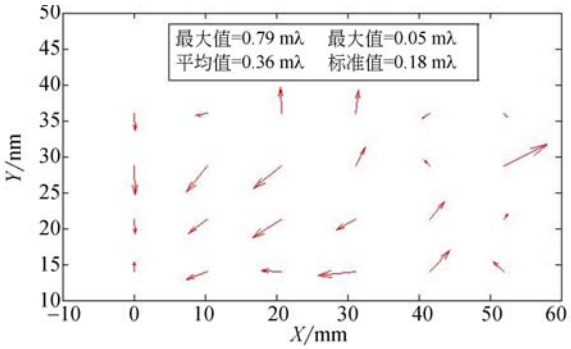

图 4　同轴投影光刻物镜的畸变分布

Fig. 4　Distortion distribution of proposed in-line lithographic lens

套刻精度，即需要保证成像光锥能量中心的传播方向与光轴平行。相比主光线，成像光锥的角平分线更有利于表征成像光锥能量中心的传播方向（例如系统存在渐晕）。所以，这里用成像光锥的角平分线代替主光线定义光刻物镜的远心度，即为角平分线远心度。由于光刻物镜旋转对称，所以可将系统矩形全视场转化为等价的 Y 轴线视场，再追迹 Y 轴视场点成像光束上、下边缘光线的角平分线即可得出远心度。

在光学系统中一般有多个能限制成像光束的孔径，但只有在孔径光阑处，所有的视场点的成像光束才会充满孔径（假设系统无渐晕），即孔径光阑会影响所有视场点成像光束的方位。忽略光刻物镜光学设计结果的影响，系统的像方远心度则主要受孔径光阑位置的影响。

3.2　光阑像差与可变光阑

在成像光学系统中，每个物方视场点都会发出成像光束或光锥。理想情况下，各个视场点的

成像光束中相同空间方位的光线在孔径光阑面上将会聚到一点，该点在孔径光阑面的方位等价于光线在成像光束中的方位；若没有汇聚到一点即存在光阑像差。当 NA 变化时，最佳光阑位置随 NA 变化时的轨迹不是平面即为光阑场曲。

理想情况下，光刻物镜在 NA 变化时的光阑像差应始终为零。若要满足实际系统在 NA 变化时仍然保持较好的远心度，则需要降低系统在不同 NA 时的光阑像差。因此，在光刻物镜设计过程中有必要选择恰当的可变光阑设计方案，以调节不同 NA 时光阑位置进而降低光阑像差的影响，最终降低系统的远心度。

为了判断光刻物镜可变光阑的理想位置，以原像面的视场光阑（离轴视场）为新的孔径光阑、以平行光入射方式从光刻物镜像方逆追迹光线，成像于光刻物镜原孔径光阑的位置，因为理想光刻物镜像方远心且像方 NA 一致。为方便分析，这里将系统简化成单透镜，如图 5 所示。将像方 D 视场点的成像光束以光轴为对称轴投影到 D'、孔径光阑 AB 投影到 $A'B'$，则离轴孔径 AB 子午面上的上下边缘视场成像可等效为轴上孔径 AA' 上下边缘的宽光束成像。

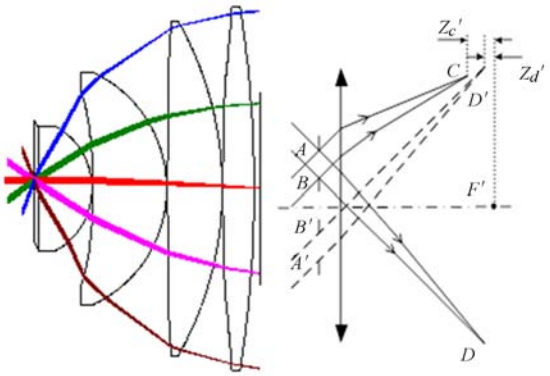

图 5　从像面逆追迹光线

Fig. 5　Scheme of inverse tracing rays from image field

本文根据图 5 来分析光刻物镜 NA 变化时可变光阑理想位置的大致轨迹。首先，根据 Seidel 像差理论，像面存在场曲，即 C，F′，D 沿光轴方向的坐标不一致，所以光阑的最佳轨迹为曲面，简称曲面光阑。其次，根据 Seidel 像差理论，光束 AA' 存在子午慧差，即边缘光束像点 C，D 存在位置关系 $Z_c' > Z_d'$，所以曲面光阑是倾斜的。再次，因为光阑倾斜，为了保证子午方向和弧矢方向的通光口径一致，光阑应为椭圆形。最后，由于光阑倾斜且光阑处通光光束有一定锥角，光阑位置应有一定偏心。

3.3　曲面光阑参数的计算

从上文分析可知，高 NA 投影光刻物镜的光阑是同时具有倾斜、偏心量的椭圆形曲面可变光阑。倾斜、偏心光阑不仅会破坏系统的旋转对称性，不利于像质的分析和补偿；还会增加机械结构的实现难度。本文中光刻物镜的像方视场离轴量为 6.25 mm，它引起的光阑倾斜量和偏心量较小，所以计算光阑参数时忽略其偏心和倾斜，这样光阑也不再是椭圆形。此外，由于光阑像差十分复杂[12]，本文并不使用光阑像差计算光阑参数，而是直接使用像方远心度来判断理想的光阑位置，光阑像差仅用于定性分析理想光阑的大致轨迹。

通过编写 Code V 自定义宏程序来计算曲面光阑参数，具体流程如图 6 所示。该方法通过设置光阑面的曲率来达到平移光阑的目的，进而计算不同 NA 时的最佳光阑位置坐标。通过多次运算来选取适当的 R_0 和 R_{max}，确保最佳光阑面的半径在二者之间。本文中投影光刻物镜 NA 在 0.85～1.35可调，经过宏程序运算后，表 2 给出了光阑面在部分 NA 时的最佳半径及光阑与子午面上边缘光线交点的坐标。其中坐标原点是初始平面光阑与光轴的交点，光轴正向定义为 Z 轴，Y 坐标值即为光阑半口径。

表 2　不同 NA 时的理想光阑参数

Tab. 2　Ideal aperture parameters under different NAs

NA	光阑面半径 R	光阑位置	
		Z 坐标	Y 坐标
1.35	256	43.76	143.14
1.30	332	27.74	132.85
1.25	413	18.94	123.64
1.20	494	13.66	115.37
1.15	571	10.28	107.84
1.10	642	7.98	100.92
1.05	704	6.37	94.48
1.00	754	5.20	88.43
0.95	790	4.34	82.71
0.90	811	3.69	77.27
0.85	816	3.19	72.06

3.4　双光阑方案设计

根据理想光阑的位置参数，画出高 NA 光刻

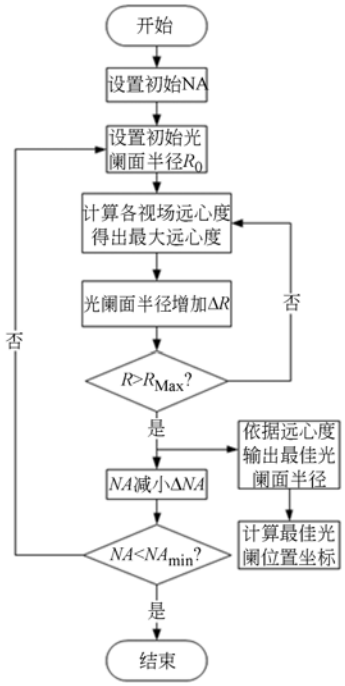

图 6　理想光阑参数的计算流程图

Fig. 6　Flow chart of ideal aperture parameter calculation

物镜 NA 由 0.85 变化至 1.35 时光阑位置的轨迹，如图 7 所示。从图中可以看出，当 NA 变化时光阑位置经过透镜内部，很显然这是无法实现的。本文采用双光阑方案来解决这个问题，设计结果如图 8 所示。当 NA 在 0.85～1.21 变化时，使用光阑 1 限制成像光束；当 NA 在 1.21～1.35 变化时，使用光阑 2 限制成像光束；当 NA＝1.21 时，光阑 1 或光阑 2 系统像方的最大远心度近似相等。以两个光阑各自轨迹的拐点为分界点：光阑 1 轨迹外侧部分的曲率与其紧邻光学表面的曲率相同，距离光学表面 0.5 mm；光阑 2 轨迹内侧部分的曲率与其紧邻光学表面的曲率相同，距离表面也是 0.5 mm。其余的光阑轨迹取决于理想光阑的位置参数。

针对图 8 的双光阑设计方案，求出光刻物镜 NA 从 0.85 变化至 1.35 时像方最大远心度的变化曲线，并与平面可变光阑的最大远心度变化曲线相比较，结果如图 9 所示。使用平面可变光阑时，最大远心度在 5.83～17.57 mrad 间变化；使用双可变曲面光阑时，最大远心度在 0.26～3.21 mrad 间变化。其中，采用双可变曲面光阑时的远心度变化曲线在 NA＝1.21 左右形成了单峰，这是由双光阑部分位置偏离了理想光阑位置引起

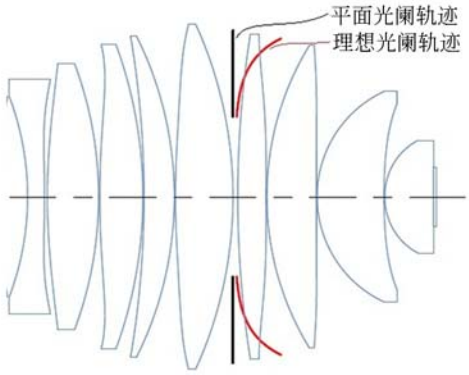

图 7　不同 NA 时的光阑轨迹

Fig. 7　Trajectories of stop apertures under different NAs

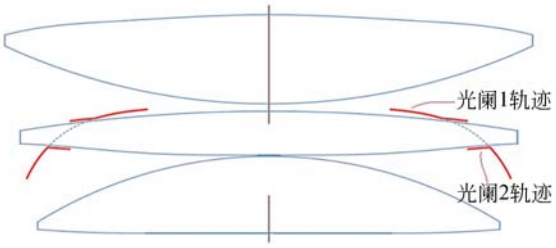

图 8　双可变曲面光阑设计方案

Fig. 8　Scheme of dual curved variable stop apertures

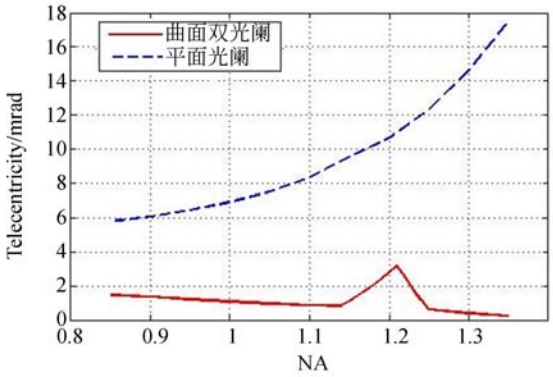

图 9　像方最大远心度变化曲线

Fig. 9　Variation curves of maximum telecentricity for different stop apertures

的，该曲线的其它拐点对应光阑曲线的拐点。从图 9 可以看出，曲面双光阑设计方案大幅度降低了光刻物镜的像方远心度。

4　结　论

本文针对 45 nm 节点深紫外投影光刻物镜

的研制，完成了NA为1.30的离轴三反投影光刻物镜和NA为1.35的同轴两反投影光刻物镜的光学设计，并对两个设计方案进行了对比分析，选择同轴式结构作为最终的物镜设计方案。同轴式投影光刻物镜的波像差和畸变均小于1 nm。然后，分析了光阑像差与可变光阑之间的关系，并以像方远心度为评价标准，得出了NA变化时的最佳光阑位置轨迹。最后，提出了双可变曲面光阑的设计方案，使系统不同NA时的最大远心度由5.83～17.57 mrad降低至0.26～3.21 mrad。本文设计可为高NA投影光刻物镜的研究提供一定的思路。

参考文献：

[1] 赵阳，巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学，2012，5(4)：394-400.
ZHAO Y，GONG Y. Computer aided alignment of small scale projected objective [J]. *Chinese Optics*，2012，5(4)：394-400. (in Chinese)

[2] 赵磊，巩岩，赵阳. 光刻投影物镜中的透镜X-Y柔性微动调整机构[J]. 光学 精密工程，2013，21(6)：1425-1433.
ZHAO L，GONG Y，ZHAO Y. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*，2013，21(6)：1425-1433. (in Chinese)

[3] 赵菲菲，唐剑宇，黄玮，等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. 光学学报，2014，34(6)：0622001.
ZHAO F F，TANG J Y，HUANG W，*et al.*. Computer-aided alignment for the lithographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*，2014，34(6)：0622001. (in Chinese)

[4] 朱京涛，宋竹青，丁涛，等. 极紫外Mg/Sic、Mg/Co多层膜的稳定性[J]. 光学 精密工程，2013，21(6)：1380-1386.
ZHU J T，SONG ZH Q，DING T，*et al.*. Stability of Mg/Sic，Mg/Co EUV multilayers [J]. *Opt. Precision Eng.*，2013，21(6)：1380-1386. (in Chinese)

[5] TOMOYUKI M，YASUHIRO O，YOHEI F，*et al.*. Catadioptric projection lens for 1.3 NA scanner [J]. *SPIE*，2007，6520：652021.

[6] KNEER B，GRÄUPNER P，GARREIS R，*et al.*. Catadioptric lens design：The breakthrough to hyper-NA optics [J]. *SPIE*，2006，6154：615420.

[7] DIRK J. Projection exposure method，projection exposure system and projection objective：European Patent，EP09001938.1[P]. 2009.

[8] Alexander. High aperture catadioptric projection objective：International Patent，WO2009040011 [P]. 2009.

[9] DODOC A. Toward the global optimum in lithographic lens design [J]. *SPIE-OSA*，2010，7652：76522B.

[10] SHRIBAK M，INOUE S，OLDENBOURG R. Polarization aberrations caused by differential transmission and phase shift in high numerical-aperture lenses：theory，measurement，and rectification [J]. *Opt. Eng.*，2002，41(5)：943-954.

[11] 尚洪波，刘春来，张巍，等. 膜系引入偏振像差对投影光刻物镜设计的影响与改进[J]. 光学学报，2015，35(1)：0122003.
SHANG H B，LIU CH L，ZHANG W，*et al.*. Effects and improvements of coating induced polarization aberration on lithography lens design [J]. *Acta Optica Sinica*，2015，35(1)：0122003. (in Chinese)

[12] 王永仲，周金鹏，宫武鹏. 超大空域凝视光学系统的光阑像差[J]. 应用激光，1998，18(5)：200-202.
WANG Y ZH，ZHOU J P，GONG W P. The stop aberrations and aberration vignetting of fish-eye lenses or extreme wide-angle objectives [J]. *Applied Laser*，1998，18(5)：200-202. (in Chinese)

作者简介：

徐明飞(1987－)，男，吉林磐石人，博士研究生，2010年于天津大学获得学士学位，主要从事光学设计方面的研究。E-mail：stone870914@163.com

导师简介：

黄 玮(1965－)，男，吉林长春人，研究员，博士生导师，主要从事光学设计方面的研究。E-mail：huangw@ciomp.ac.cn