

光刻照明系统中复眼透镜的设计及公差分析

李美萱^{1,2}, 王美娇², 王丽¹, 冷雁冰¹, 董连和¹

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130012)

摘要:在超大规模集成电路中,为了实现 $NA = 1.35$, 波长 193 nm 处分辨率达到 45 nm 的目标,需要对影响光刻照明均匀性的误差源进行详细分析最终确定公差范围。复眼透镜是使光束在系统掩膜面上形成矩形均匀照明区域的关键元件。采用 CODE V 软件设计了复眼透镜对引起照明不均匀性的因素进行分析,结合复眼透镜组的设计方案和实际加工能力,给出 X 和 Y 向复眼曲率公差为 $\pm 10\%$, 后组曲率公差为 $\pm 5\%$, 前后组间隔公差为 $\pm 50\ \mu\text{m}$, 位置精度偏心公差为 $\pm 1\ \mu\text{m}$, 装配精度公差为 $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。制定公差合理、可行,满足了浸没式光刻照明系统高均匀性、高能量利用率的要求。

关键词:浸没式光刻;高均匀性照明;分辨率;光学设计;公差分析

中图分类号:O439 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.07.011

Design and tolerance analysis of compound eye lens in lithography lighting system

LI Mei-xuan^{1,2}, WANG Mei-jiao², WANG Li¹, LENG Yan-bing¹, DONG Lian-he¹

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College Of Optical And Electronical Information Changchun University
of Science And Technology Changchun 130012, China)

Abstract: In order to distinguish 45 nm target in the very large scale integrated circuit where the numerical aperture is 1.35 and its wavelength is 193 nm , it is necessary to analyze the error factors which affects lithography lighting uniformity, and eventually the tolerance range can be determined. Since the compound eye lens can make the light beam form rectangular uniform illumination area on the surface of mask, it is a key component in the lighting system. Through CODE V software, compound eye lens is designed, and the illumination non-uniformity is simulated and analyzed. Considering the compound eye lens design and actual processing, it is concluded that x -direct and y -direct compound eye curvature tolerance is $\pm 10\%$, the back-group curvature tolerance is $\pm 5\%$, the interval tolerance between front and back group is $\pm 50\ \mu\text{m}$, the location accuracy of eccentric tolerance is $\pm 1\ \mu\text{m}$, the assembly accuracy tolerance is $\pm 3\ \mu\text{m}$. The results show that the tolerances are reasonable and feasible and can meet the requirements of high uniformity and high energy utilization of immersion lithography lighting system.

Key words: immersion lithography; high uniformity of illumination; resolution; optical design; tolerance analysis

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 91338116; No. 11474037)资助。

作者简介:李美萱(1984-),女,讲师,博士,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术,微结构光学元件与薄膜波导术、光纤通信技术等。E-mail:limeixuannuc@163.com

通信作者:董连和(1953-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术,微细加工理论与工艺技术,微光学与应用等。E-mail:custdong@126.com

收稿日期:2016-11-21

1 引言

随着世界光刻技术迈入 45 nm 节点及以下,浸没式光学投影曝光光刻技术已成为集成电路制造的主流技术^[1]。良好的照明均匀性能够获得高分辨率,反之,如果照明均匀性较差,那么会造成各个视场分辨率存在差异,曝光线条的粗细不一致,严重影响光刻机的性能^[2-3]。故设计了 NA 达到 1.35,波长为紫外 193 nm 的浸没式光刻系统中的复眼透镜并对其误差源进行详细分析最终确定公差范围,可实现在掩模面上达到高均匀照明,对改善最终的曝光质量具有重要的意义^[4]。

2 复眼透镜的设计

2.1 复眼透镜设计原理

复眼镜组分为前组和后组,复眼镜组的前组对不均匀的光强进行分割,由 Huggens-Fresnel 原理,当平行光垂直入射到狭缝上时,透过狭缝的光会发生衍射现象,将狭缝上各点的光看作是一个个次级光源,在不同方向上的光强分布不同^[5-6]。若在狭缝后置一透镜,则在焦平面上得到强弱相间的衍射条纹^[7]。如图 1 所示, P 点产生的场强为:

$$dE = Ae^{-jkr} \quad (1)$$

式中, A 代表振幅; r 为 B 点到 P 点的距离。

复眼镜组的后组与会聚镜和耦合光组在焦面上再将所分割的光场投射叠加,当 L 远大狭缝 AB 的宽度为 a , r_0 为 C 点到 P 点的距离。令,此时 P 点的总场强为:

$$E_{(p)} = \int adE = Ae^{-jkr_0} \int e^{-jkxp} dx \quad (2)$$

形成特定要求的均匀照明,即 X 向为平顶的均匀照明, Y 向为高斯分布。

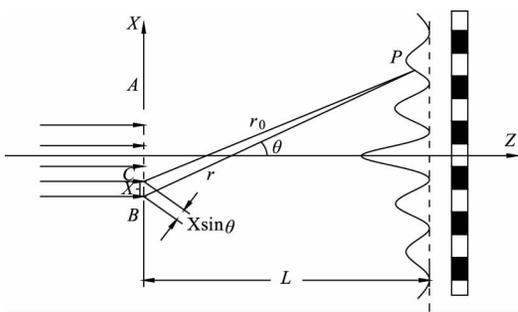


图 1 单缝衍射原理图

Fig. 1 Principle diagram of the single slit diffraction

2.2 复眼透镜的设计

复眼透镜的设计要求工作波长为 193.368 nm,

通光口径为 120 mm, X 向透镜 $F\#$ 为 1.67, Y 向透镜 $F\#$ 为 13.67,物方数值孔径 0.035,等效单元面积小于 0.265 mm^2 。

本文设计的复眼透镜组由 3 片柱面复眼构成,六个表面 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 均为工作表面,如图 2 所示, S_1 、 S_2 为 Y 向柱面复眼,实现 Y 方向上的均匀照明。 S_3 、 S_4 、 S_5 为 X 向柱面复眼,完成 X 方向上的均匀照明。 S_6 为 Y 向柱面复眼负责将光束沿 Y 方向弥散,与 S_1 、 S_2 一起形成 Y 向的平顶高斯能量分布。

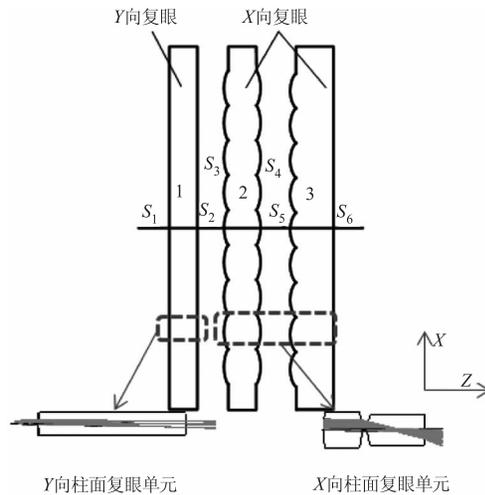


图 2 复眼透镜结构示意图

Fig. 2 Structure of the compound eye lens

3 复眼透镜公差分析

(1) 复眼透镜的误差源分析

复眼透镜组主要功能是形成矩形的均匀照明区域^[8]。因加工制造引入的偏差主要影响照明均匀性^[9]。前组复眼透镜经复眼光组、聚光镜和耦合成像后,在掩模上形成均匀照明,当畸变每变化 0.1%,照明均匀性约变化 0.4%。因此复眼透镜组的误差源分析时,主要分析复眼光组透镜单元之间的发生相对位置误差和面形误差,对各个视场畸变的变化,计算出照明均匀性的变化量^[10]。复眼透镜组的误差源分析采用如图 3 所示光路,即分析复眼透镜参数变化对中间像面上的光能分布影响,掩模面上光能分布与中间像面存在共轭关系,因此复眼透镜参数变化对掩模面上的光能分布与中间像面的光能分布变化规律一致^[11-12]。

(2) 复眼的表面曲率公差分析

Y 向柱面复眼光组前组透镜单元表面曲率半径变化存在误差时,引入的照明性能变化曲线如图 4 所示。

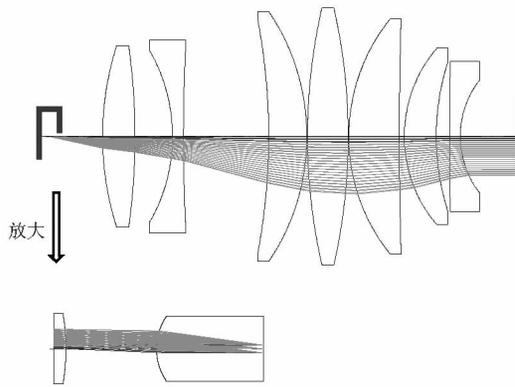


图 3 复眼透镜的公差分析的光路图
Fig. 3 Light path diagram of tolerance analysis for compound eye lens

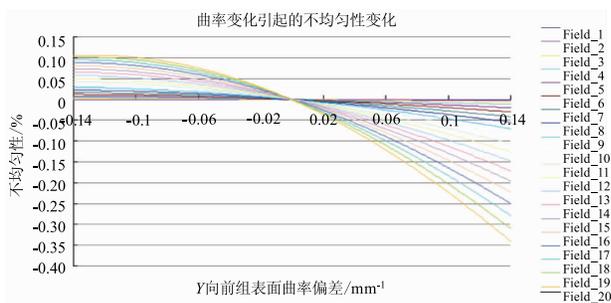


图 4 复眼透镜组 Y 向前表面曲率变化时照明均匀性变化曲线
Fig. 4 Illumination uniformity curve of compound eye lens group with Y-direct front surface curvature changes

Y 向柱面复眼光组后组透镜单元表面曲率半径变化存在误差时,引入的照明性能变化曲线如图 5 所示。

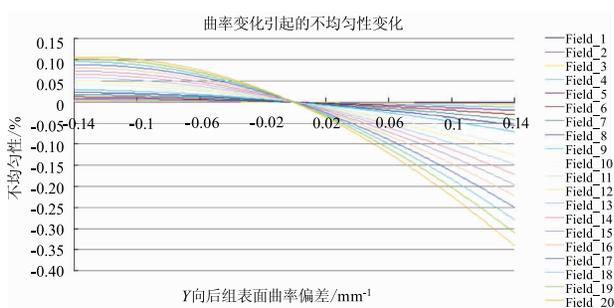


图 5 复眼透镜组 Y 向后表面曲率变化时照明均匀性变化曲线
Fig. 5 Illumination uniformity curve of compound eye lens group with Y-direct back surface

当 X 向柱面复眼透镜组的前组透镜单元表面曲率变化 0.14 mm^{-1} 时,或后组的曲率变化约 0.14 mm^{-1} 时,引起的照明均匀性变化约为 0.4%,复眼透镜的前后组曲率分别为 0.588 mm^{-1} 和 0.425 mm^{-1} ,因此后复眼透镜单元的曲率半径变化达到 20% 和 30%

时,因复眼透镜的曲率半径变化引起的不均匀性将达到 0.4%。考虑复眼透镜组的实际的加工能量,取 Y 向柱面复眼透镜组的曲率偏差为 10%。

X 向柱面复眼光组前组透镜单元表面曲率半径变化存在误差时,引入的照明性能变化曲线如图 6 所示。

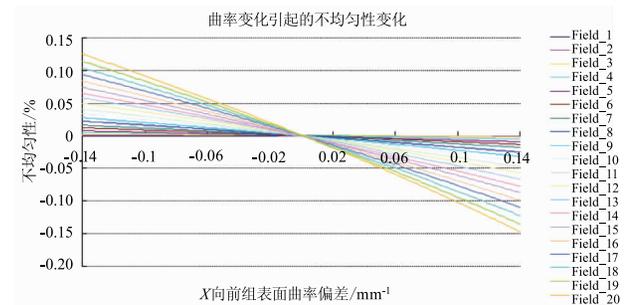


图 6 复眼透镜组 X 向前表面曲率变化时照明均匀性变化曲线
Fig. 6 Illumination uniformity curve of compound eye lens group with X-direct front surface curvature changes

X 向柱面复眼光组后组透镜单元表面曲率半径变化存在误差时,引入的照明性能变化曲线如图 7 所示。

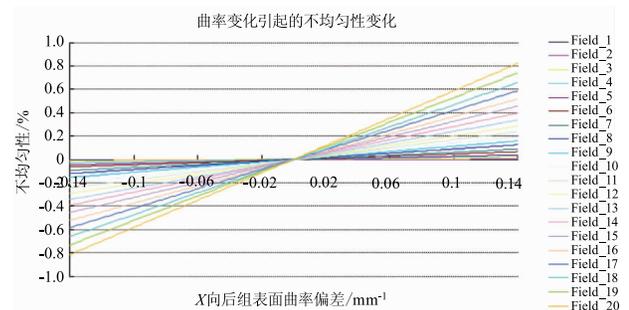


图 7 复眼透镜组 X 向后表面曲率变化时照明均匀性变化曲线
Fig. 7 Illumination uniformity curve of compound eye lens group with X-direct back surface curvature changes

当 X 向柱面复眼透镜组的前组透镜单元表面曲率变化 0.04 mm^{-1} 时,或后组的曲率变化约 0.06 mm^{-1} 时,引起的照明均匀性变化约为 0.4%,复眼透镜的前后组曲率分别为 0.69 mm^{-1} 和 2.36 mm^{-1} ,因此后复眼透镜单元的曲率半径变化达到 5% 和 3% 时,因复眼透镜的曲率半径变化引起的不均匀性将达到 0.4%。考虑到实际加工能力,复眼透镜组曲率偏差取 5%。

(3) 复眼透镜组间隔的公差分析

复眼透镜组之间的间隔变化时,各个视场的照明均匀性的变化量与前后组间隔的变化量之间的关系如图 8、图 9 所示。

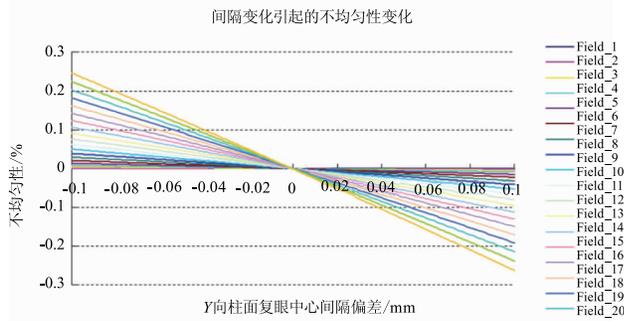


图8 Y向柱面复眼透镜组间隔变化时照明均匀性变化曲线
Fig. 8 Illumination uniformity curve of Y-direct cylinder compound eye lens group with interval changes

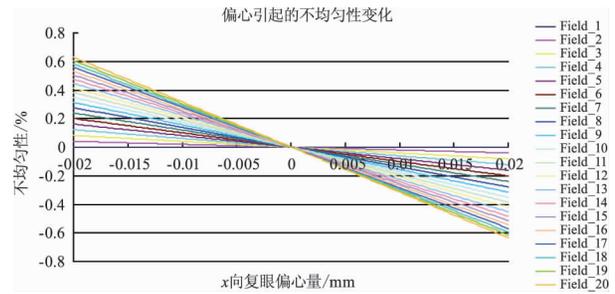


图11 X向柱面复眼透镜组横向偏移时照明均匀性变化曲线

Fig. 11 Illumination uniformity curve of X-direct cylinder compound eye lens group with lateral migration

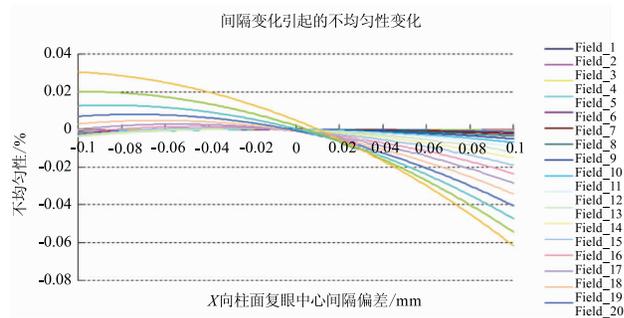


图9 X向柱面复眼透镜组间隔变化时照明均匀性变化曲线

Fig. 9 Illumination uniformity curve of X-direct cylinder compound eye lens group with interval changes

当复眼透镜组之间的间隔变化 ± 0.1 mm 时,照明均匀性变化均小于 0.3%。但间隔变化达到 0.1 mm 时,在掩模面上照明视场尺寸的变化超过 2 mm,将导致照明区域尺寸小于工作区域尺寸。综合考虑后,选择的间隔公差为 0.05 mm。

(4) 复眼前后组的横向偏心公差分析

当复眼光组前后组透镜单元之间沿垂直与光轴方向发生偏心时,引入的照明均匀性变化如图 10、图 11 所示。

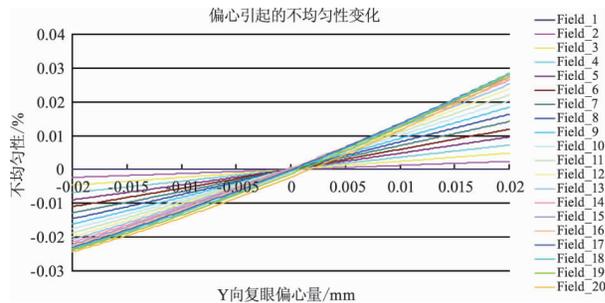


图10 Y向柱面复眼透镜组横向偏移时照明均匀性变化曲线

Fig. 10 Illumination uniformity curve of y-direct cylinder compound eye lens group with lateral migration

因此 Y 向柱面复眼横向偏移 20 μm 时,引入的照明均匀性小于 0.03%,但引入的照明视场区域的偏移量已经达到了 1.3 mm,可以忽略 Y 向柱面复眼横向偏移对照明均匀性的影响。X 向柱面复眼的横向偏移 12 μm 时,引入的照明均匀性小于 0.4%,但引入的照明视场区域的偏移量已经达到了 4 mm。因此 X、Y 向柱面复眼横向偏移对照明均匀性的影响较小,需要综合考虑照明视场位置的偏移量。X 向柱面复眼偏移 1 μm ,照明区域偏移 0.35 mm。Y 向柱面复眼偏移 1 μm ,照明区域偏移 0.06 mm。因此取 X、Y 向柱面复眼透镜单元位置偏差小于 1 μm 。前后组之间的定位偏差小于 3 μm 。

(5) 复眼光学加工要求

复眼透镜组中前后组透镜的曲率半径变化、前后组之间的间隔和沿横向的偏心等 4 个参数的变化是引起各个视场主光线相对位置变化的主要原因,其中横向的偏心对照明均匀性的影响相对较小。另外,复眼透镜组之间沿 X、Y 向的每偏心 1 μm ,将引起掩模面上的照明区域中心位置的变化 0.35 mm 和 0.06 mm。各个参数公差如表 1 所示。

表 1 复眼透镜组的公差要求

Tab. 1 Tolerance requirements of compound eye lens tolerance requirements

名称	公差
Y 向复眼曲率	$\pm 10\%$
X 向复眼曲率	$\pm 10\%$
后组曲率	$\pm 5\%$
前后组间隔	$\pm 50 \mu\text{m}$
位置精度偏心	$\pm 1 \mu\text{m}$
装配精度	$\pm 3 \mu\text{m}$

4 测试结果

采用 CODE V 软件对照明系统的均匀性进行仿真,形成掩膜面光能的相对强度分布如图 12 所示。

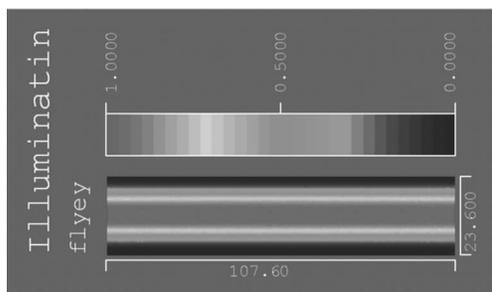


图 12 掩膜面能量分布图

Fig. 12 Energy distribution of mask surface

掩膜面照明性能仿真结果及 Y 方向能量分布见图 13,表明传统照明和离轴照明模式下 Y 方向能量分布均优于 99.5%。

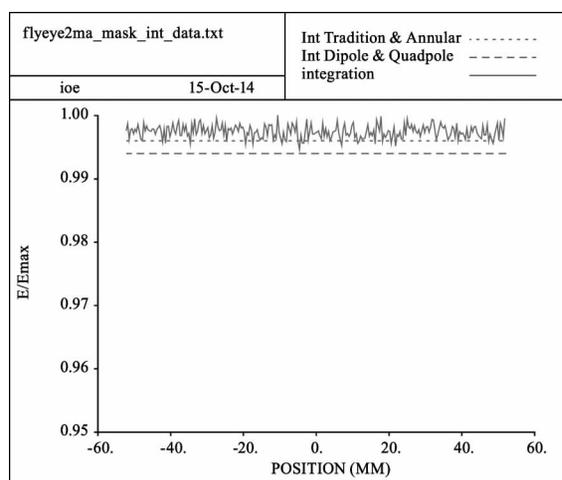


图 13 Y 方向能量分布

Fig. 13 Y-direct energy distribution of mask surface

5 结论

根据复眼透镜的设计要求,采用 3 片柱面镜设计的复眼透镜组,分别实现了 X、Y 方向上的均匀照明。对影响光刻照明均匀性的误差源进行详细分析,给出了复眼透镜的公差分析的光路图。前组复眼透镜经复眼光组、聚光镜和耦合成像后,在掩膜上形成均匀照明,当畸变每变化 0.1%,照明均匀性约变化 0.4%。因此复眼透镜组的误差源分析时,主要分析复眼光组透镜单元之间的发生相对位置误差和面形误差,对各个视场畸变的变化,计算出照明均匀性的变化量。结合复眼透镜组的设计方案 and 实际加工能力,给出复眼透镜组具体的公差要求。采用 CODE V 软件对浸没式光刻照明系统的均匀性进行

仿真,仿真结果表明在传统照明和离轴照明模式下, Y 方向能量分布均优于 99.5%,验证了制定公差合理、可行。

参考文献:

- [1] XIAO Yanfen, ZHU Jing, YANG Baoxi. Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems [J]. Chinese J. Lasers, 2013, 40 (2): 0216001. (in Chinese)
肖艳芬,朱菁,杨宝喜.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.
- [2] LIANG Xinli, LI Yanqiu, MEI Qiuli. Optical design of high-efficiency ripple plate illuminator for EUV lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (3): 0322005. (in Chinese)
梁欣丽,李艳秋,梅秋丽.高光能利用率极紫外光刻波纹板照明系统设计[J].光学学报,2015,35(3):0322005.
- [3] ZHAO Yang, GONG Yan. Methods of enhancing uniformities of output beams from beam expanding unit for illumination system of deep-ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (8): 0822004. (in Chinese)
赵阳,巩岩.提高深紫外光刻照明系统扩束单元光束均匀性的方法[J].光学学报,2012,32(8):0822004.
- [4] 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):122005.
- [5] HU Zhonghua, YANG Baoxi, ZHU Jing. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese J. Lasers, 2013, 40 (6): 0616001. (in Chinese)
胡中华,杨宝喜,朱菁.用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J].中国激光,2013,40(6):0616001.
- [6] 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.
- [7] CHEN Xu,LIU Weiqi,KANG Yusi, et al. Designand tolerance analysis of Offner compensator[J]. Opt. Precision Eng. ,2010,18(1):88-93. (in Chinese)
陈旭,刘伟奇,康玉思,等. Offner 补偿器的结构设计与装调[J]. 光学 精密工程,2010,18(1):88-93.
- [8] ZHAO Yang,GONG Yan. Design of beam shaping unit for deep ultravioletlithographic illumination system[J]. Opt. Precision Eng. ,2011,19(1):29-34. (in Chinese)
赵阳,巩岩. 深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计[J]. 光学 精密工程,2011,19(1):29-34.
- [9] John E Childers, Tom Baker, Tim Emig, James Carriere, Marc D. Himel, Advanced testing requirements of diffractive optical elements for off axis illumination in photolithography[C]. Proc of SPIE,2009,7430:74300S.
- [10] L Zhang,D Liu,T Shi, et al. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-null interferometric testing [J]. Applied Optics, 2013,52(35):8501-8511.
- [11] HAO Yong,LI Lun,YU Junbo. Design and preparation of aspherical compound eye[J]. Laser & Infrared,2016,46(6):727-730. (in Chinese)
郝永平,李伦,于军波. 非球面复眼设计及其制备工艺研究[J]. 激光与红外,2016,46(6):727-730.
- [12] HAO Yongping,LI Lun. New progress in structure design and imaging systems of artificial compound eye[J]. Laser & Infrared,2015,45(12):1407-1412. (in Chinese)
郝永平,李伦. 仿生复眼结构设计及其成像系统研究新进展 [J]. 激光与红外, 2015, 45 (12): 1407 - 1412.