

高光能利用率极紫外光刻波纹板照明系统设计

梁欣丽 李艳秋 梅秋丽

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 针对极紫外光刻照明系统光能利用率低的问题,设计了一套高光能利用率极紫外光刻波纹板照明系统。该系统中波纹板面形采用柱面镜阵列,降低了加工难度;并且根据波纹板反射光线的特性,确定了由修正型复合抛物面聚光镜与二次曲面反射镜组作为中继镜组的结构。整个系统仅采用四片反射镜且其中两片反射镜为掠入射,与传统的极紫外光刻照明系统相比,有效地提高了系统的光能利用率。对一套数值孔径0.33的极紫外光刻投影物镜,给出了与之相匹配的波纹板照明系统设计实例。仿真结果表明,系统的光能利用率可达39.7%,掩模上弧形照明区域扫描方向的积分不均匀度小于2.7%,验证了该设计的可行性和有效性。

关键词 光学设计;波纹板照明系统;反射系统;极紫外光刻

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0322005

Optical Design of High-Efficiency Ripple Plate Illuminator for EUV Lithography

Liang Xinli Li Yanqiu Mei Qiuli

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract A high-efficiency ripple plate illumination system for extreme ultraviolet (EUV) lithography is proposed. A cylindrical mirrors array is used as ripple plate mirror to simplify the system. By analyzing the characteristics of reflection on ripple plate, we design a relay system with a modified compound parabolic concentrator and two conic mirrors to reduce the efficiency loss caused by excessive number of reflective mirrors. Compared with the traditional EUV lithography illumination system, it greatly improves the system's efficiency. A design example for a numerical aperture (NA) 0.33 projection objective is given and the efficiency of the illuminator is 39.7% while the slit non-uniformity of the scanning energy distribution is 2.7% in a prescribed arc area, which proves the feasibility of the design.

Key words optical design; ripple plate illumination system; catoptric system; extreme ultraviolet lithography

OCIS codes 220.2945; 220.4830; 220.3740; 340.7480

1 引言

极紫外(EUV)光刻是最具潜力的下一代光刻技术之一^[1],照明系统是极紫外光刻系统的重要组成部分。目前造成极紫外光刻系统光能损失的原因主要有两个:1)光源收集效率低,现阶段,可收集到的极紫外光源的最大功率仅为70 W,远小于极紫外光刻大规模批量生产(HVM)的目标值250~350 W^[2];2)曝光系统光能利用率非常低^[3]。

根据匀光元件的不同,极紫外光刻照明系统主要有双排复眼照明系统^[4]和波纹板照明系统。在不考虑

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-25

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702001-002)

作者简介: 梁欣丽(1990—),女,硕士研究生,主要从事极紫外光刻照明系统设计方面的研究。

E-mail: bitliangxinli@163.com

导师简介: 李艳秋(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事高分辨成像及先进光刻技术、传感与微系统技术、微纳检测技术和精密光学仪器等方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

其他光能损失,仅考虑元件的反射率影响的情况下,五片式(含一片掠入射镜)的双排复眼照明系统的光能利用率为21.6%,四片正入射复眼照明系统的光能利用率为24%。与双排复眼照明系统相比,波纹板照明系统仅采用一片掠入射式反射镜作为匀光元件,不仅可以降低照明系统的复杂度,显著地提高系统的可制造性,更重要的是,还可以极大地提高系统的光能利用率。1999年,Chapman等^[5]首次提出将波纹板用于极紫外光刻照明系统,但该结构不能同时控制系统长度和光瞳填充。2003年,Tsuji^[6]设计了一套能够同时控制系统长度和光瞳填充的照明系统,但是该系统需要波纹板匀光器与复眼匀光器组合使用,光能利用率为17.5%。2005年,Tsuji等^[7-8]设计得到了一套单一匀光器的波纹板照明系统,然而该系统需要7片中继镜,系统光能利用率仅为9.5%。2009年,K. Kajiyama等^[9]设计了一套中继镜为三片反射镜的波纹板照明系统,但是为了得到良好的匀光效果,需要在波纹板两侧放置平面反射镜提高照明的均匀性,或需要使用两片或多片波纹板进行匀光,系统光能利用率小于32.1%。上述设计波纹板结构比较复杂,所用光学元件较多,光能利用率并没有得到显著提高。

本文的研究重点在于提高照明系统的光能利用率。设计了一套新的波纹板照明系统,该系统采用了单排柱面镜阵列和三个反射镜的结构,可在掩模面上获得均匀的弧形光斑,系统结构紧凑。通过减少系统中反射镜的数量尽量多地使用掠入射,提高了系统光能利用率,而且匀光元件波纹板的面形采用柱面镜阵列,降低了系统加工难度。

2 波纹板的照明特性

图1所示为利用波纹板进行匀光照明的基本原理图。图1(a)是位于 yoz 平面内沿着扫描方向的示意图,图1(b)是位于 xoz 平面内垂直于扫描方向(利用投射式说明)的示意图。光源发出的EUV辐射经收集镜收集后形成平行光束或小角度会聚的近似平行光束,入射到波纹板上,波纹板是一种仅在一个方向上有起伏的反射镜。当沿着波纹板轴线方向的平行光线以一定角度入射到波纹板时,波纹板将入射宽光束分割为多个通道,每个通道分别对光源成像。由于波纹板仅在一个方向上对光有调制作用,光源经过每个通道所成的子午像和弧矢像分离。光源的子午像为弧形光斑(子午面实际为锥体反射,反射光线为弧形平行光束,为了便于理解,称其为子午像),光源的弧矢像为沿着轴线方向的线形光斑,称为二次光源。所有的弧形光斑经过中继镜组叠加成像在掩模面上,补偿了其均匀性的微小差别,得到均匀的照明光斑。二次光源经后续中继镜组成像在系统出瞳,实现一定的光瞳填充。

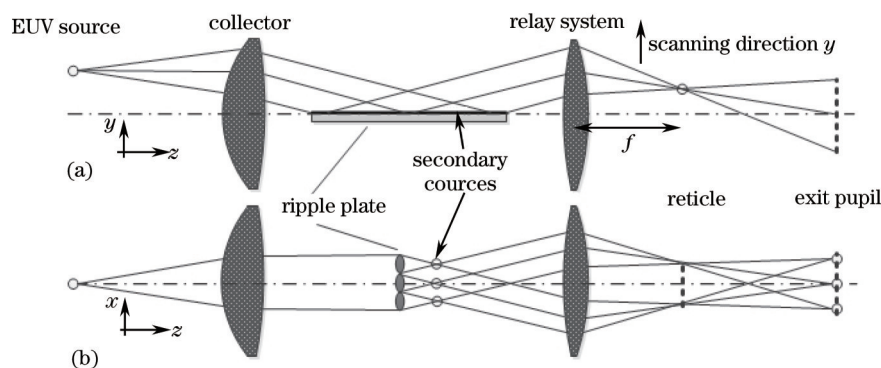


图1 波纹板照明系统原理示意图。(a) yoz 平面;(b) xoz 平面

Fig.1 Principle of ripple plate illumination system. (a) yoz plane; (b) xoz plane

3 波纹板照明系统设计

照明系统是极紫外光刻系统的关键组成部分之一,衔接了极紫外光刻光源和投影物镜,照明系统一方面需要配合光源的尺寸和光束发散角度,另一方面也需要在给定的弧形视场上提供均匀的照明并满足相应的光瞳填充。设计的波纹板照明系统如图2所示,该系统由两个子系统组成:波纹板匀光器和中继镜组。该系统波纹板结构采用柱面镜阵列,采用修正型复合抛物面聚光镜(CPC)与二次曲面反射镜组构成中继镜组,

减小了由于反射镜片数过多造成的光效率损失。极紫外光刻系统中掩模是反射式掩模,在设计照明系统过程中,为了简化问题,便于理解,没有考虑掩模的反射性,同时设置虚拟出瞳面,虚拟出瞳的位置与出瞳关于掩模对称。如不特殊说明,本文所指出瞳均为虚拟出瞳。

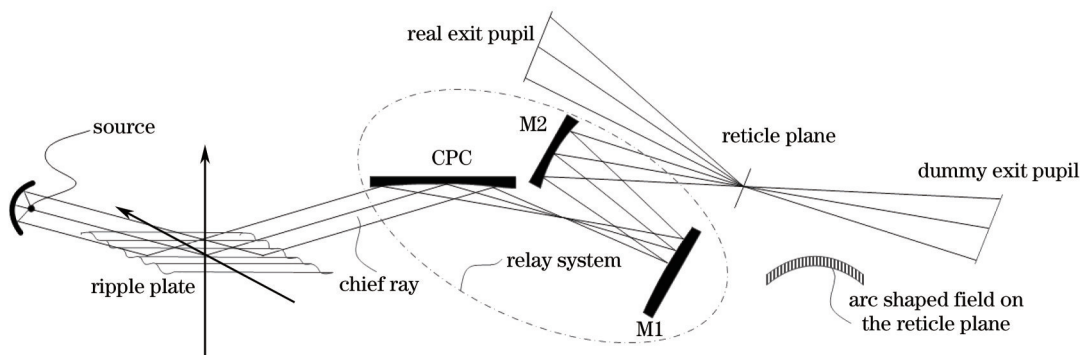


图2 波纹板照明系统结构设计图

Fig.2 Designed ripple plate illumination system layout

3.1 波纹板面形选取

波纹板是一种仅在一个方向上有起伏的反射镜,起伏在轴线方向上相互平行,并在垂直于轴线方向上依次排列。图3(a)是一种典型的凹面波纹板,其前视图如图3(b)所示。图3(c)是另一种典型凸面波纹板的前视图。通过交替排列凸面和凹面反射镜,可以得到复合型波纹板,其前视图如图3(d)所示。由于复合型波纹板比单一型波纹板更连续^[7],反射后更容易形成均匀的弧形,因此选用复合型波纹板。

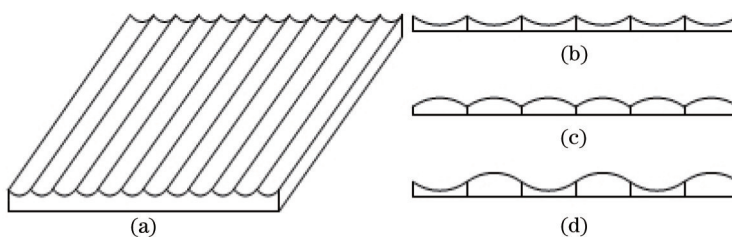


图3 波纹板面形示意图。(a)凹面波纹板;(b)凹面波纹板前视图;(c)凸面波纹板前视图;(d)复合型波纹板前视图

Fig.3 Schematic views of ripple plate integrator. (a) A typical concave ripple plate; (b) front view of concave ripple plate; (c) front view of convex ripple plate; (d) front view of compound ripple plate

波纹板的起伏的形状可以影响弧形照明区域的均匀性,Chapman等^[5]给出了理想的波纹板面形,但是这种面形复杂,为了简化照明系统,方便加工,采用柱面镜波纹板,推导出每个小柱面镜的半径 R_c 满足如下条件:

$$R_c^2 = (p/4)^2 + (R_c - H/2)^2, \quad (1)$$

其中 p 是周期, H 为峰谷值,定义为

$$H = \frac{p}{2 \sin \theta_{arc}} \left\{ 1 - \cos \theta_{arc} + \ln \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \theta_{arc}) \right] \right\}, \quad (2)$$

其中 θ_{arc} 是掩模弧形所对应的圆心角。

3.2 中继镜组结构设计

在波纹板照明系统中,中继镜组是决定整个系统光能利用率的关键部分。由于波纹板照明系统为科勒-临界照明,故需要将光源的子午像与弧矢像分别成像在特定位置。这也给波纹板照明系统的中继镜组设计带来了一定难度。中继镜组的作用是:1)将光源的子午像叠加到掩模上得到均匀的照明光斑;2)将二级光源成像在照明系统出瞳,实现一定的光瞳填充。同时,为了提高照明系统的光能利用率,应遵循以下两个原则:1)严格控制使用的反射元件数量;2)在设计过程中尽量使用掠入射(多层反射膜正入射和掠入射的最大反射率分别为70%和90%^[5])。

为了将光源的子午像进行叠加,对波纹板的反射光线进行分析。由波纹板工作原理可知,当入射光线为平行光线时,波纹板反射镜的反射光线是一系列具有不同方位角的平行光,如图4所示。这与太阳光在一天中不同时刻的光照情况类似,如图5所示。在太阳能收集系统中,复合抛物面聚光镜^[10]可以接收一天中不同时刻入射到接收角内的所有光线,会聚到接收器。因此,可以利用光线的相似性,选取CPC作为中继镜,实现光源子午像的叠加。

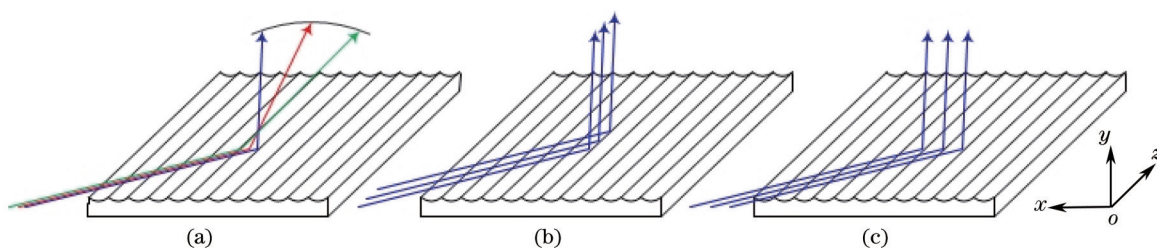


图4 平行光线入射到波纹板不同位置时的反射光线情况。(a)入射到同一波纹板通道x方向不同位置的光线及其反射光线;(b)入射到同一波纹板通道y方向不同位置的光线及其反射光线;(c)入射到不同波纹板通道相同位置的光线及其反射光线

Fig.4 Reflection of collimated incident light beams from the ripple plate mirror. (a) Reflection of incident light on a ripple plate at x direction; (b) reflection of incident light on a ripple plate at y direction; (c) reflection of incident light on different ripple plates at the same location

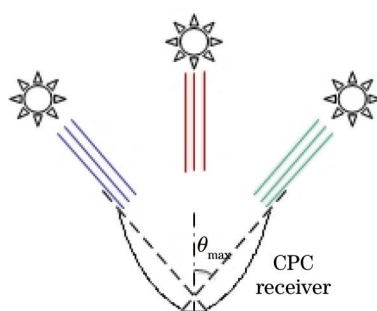


图5 CPC接收一天中不同时刻太阳光示意图

Fig.5 Schematic view of collecting sunlight at different moments in a day using a CPC

为了实现良好的叠加,需要对传统的CPC进行一定修正,使光源的子午像均叠加成像在抛物面的焦点上,抛物面需相对于光轴偏移一定的距离 d 。与传统的CPC结构不同,修正型CPC中 $d=l \cdot \sin\beta$,其中 l 是光源子午像经CPC所成的叠加像与二次光源的一次像之间的距离, $\beta=180^\circ-\theta-\gamma$, $\gamma/2$ 是主光线在CPC上的反射角, θ 为抛物面的倾斜角,这个角度由波纹板反射光线的角度决定,如图6所示。可以推导出经过倾斜和偏移后抛物线的方程为

$$\sin^2\theta_3 - 2\sin\theta_3\cos\theta_3 + y^2\cos^2\theta_3 + 2Rz\cos\theta_3 - 2dz\sin\theta_3 + 2Ry\sin\theta_3 + 2dy\cos^2\theta_3 + d^2\cos^2\theta_3 + 2dR\sin\theta_3 - R^2 = 0, \quad (3)$$

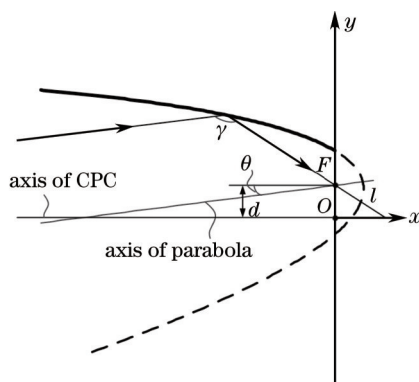


图6 修正型CPC设计示意图

Fig.6 Schematic view of modified CPC design

把得到的抛物线绕原轴线旋转,即可得到需要的CPC结构。

CPC的子午焦距 f_m 和弧矢焦距 f_s 不同,光线经过CPC后,其子午像和弧矢像将分别成像在不同位置。如果仅用一片CPC作为中继镜组,会导致整个照明系统长度过长[如果匹配数值孔径(NA)0.33投影物镜,系统长度在5 m左右]。而且,单片CPC不能同时对子午像放大倍率和弧矢像放大倍率进行控制,因此还需要其他的反射镜来控制整个系统的长度和放大倍率,具体作用是将叠加的子午像和二次光源的一次像分别成像在掩模和出瞳处,并同时控制其放大倍率。此时,可以选取一个二次曲面镜组,形成两组共轭关系。

根据二次曲面的等光程原理和两组共轭关系,可以确定该镜组的二次曲面面形。当第一片反射镜M1为双曲面反射镜时,子午像的叠加像 r_1 和弧矢像的一次像 p_1 分别成像在 r_2 、 p_2 处,相对位置如图7所示。因为照明系统需要与投影物镜匹配,因此掩模和出瞳的相对位置是确定的,即 r_2 和 p_2 经过M2所成的像的相对位置确定。根据物像关系得到第二片反射镜M2为椭球面反射镜。同理,该二次曲面镜组也可以是M1为椭球面反射镜与M2为双曲面反射镜的组合。由于掠入射将引入较大的像差,因此二次曲面镜组为正入射。在实际计算过程中,为了很好地与投影物镜相匹配,采用逆向设计^[11],即以照明系统的出瞳为物,将掩模看作逆向系统的光阑,利用二次曲面的等光程原理及两组共轭关系,求解其面形参数和位置坐标。

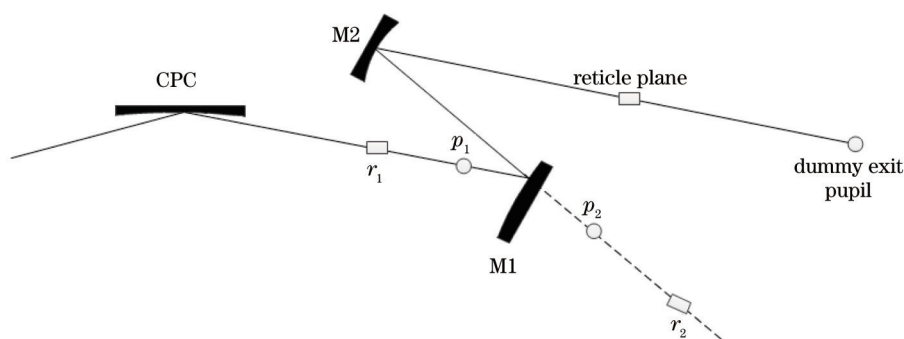


图7 二次曲面镜组设计图

Fig.7 Design of two conic mirrors

4 波纹板照明系统设计实例与结果分析

为了验证该结构的可行性,针对NA为0.33、放大倍率为1/4倍的投影物镜设计了一套极紫外光刻波纹板照明系统,照明系统的出瞳距离与投影系统的入瞳距离匹配,照明系统的出瞳尺寸与投影系统的入瞳尺寸匹配,出瞳相干因子为0.9。具体设计要求见表1,设计结果见表2。

表1 照明系统设计指标

Table 1 Specifications for the illumination system

Item	Value
Wavelength	13.5nm
NA of objective	0.33
Magnification of objective	1/4
Exit pupil diameter	220.4 mm
Exit pupil distance	1331.5 mm
Expose field size at mask	104 mm×6 mm

由于反射镜膜层的具体参数未知,在仿真过程将每一片反射镜设置为普通反射镜,根据参考文献[5]中多层反射膜正入射和掠入射的最大反射率分别为70%和90%,设置这些光学元件的表面光学参数,如表3所示。

由于中继镜组的三个元件均为连续的反射镜面,除了吸收率(透射未考虑)带来的光能损失外,没有其他光能损失,因此中继镜组的三个光学元件的光能利用率 η 即分别为70%,70%,90%。

使用光学设计软件LightTools进行仿真,追迹 10° 条光线。仿真结果如图8所示。

表 2 波纹板照明系统结构参数

Table 2 Parameters of the ripple plate illumination system

Item	Coordinate /mm			Incline angle /($^{\circ}$)	Radius /mm	Conic constant
	X	Y	Z	Alpha		
Ellipsoidal mirror	0.000	-595.85	1119.71	-13.66	-1274.21	-0.25
Hyperboloidal mirror	0.000	-464.79	425.03	1.61	2528.21	-21.64
CPC	0.000	-528.49	837.29	24.58	----	----
Central ripple plate	0.000	-905.88	2065.65	24.58	----	----

表 3 波纹板照明系统的表面光学属性参数

Table 3 Surface optical parameters of the ripple plate illumination system

Item	Reflectivity /%	Absorption /%	η /%
Ellipsoidal mirror	70	30	70
Hyperboloidal mirror	70	30	70
CPC	90	10	90
Central ripple plate	90	10	90

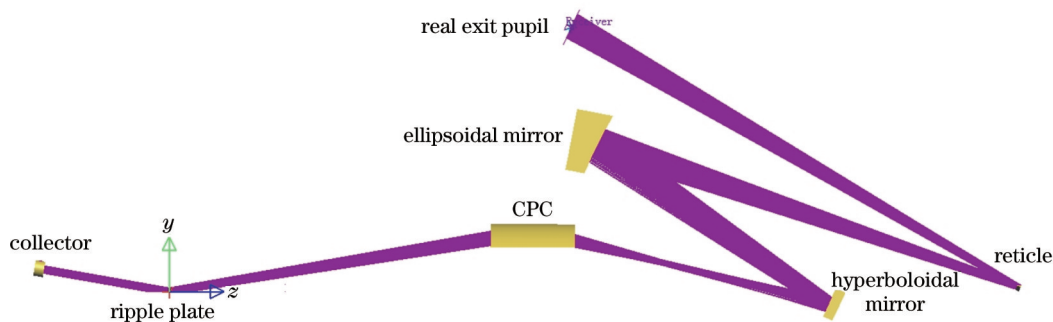


图 8 波纹板照明系统仿真图

Fig.8 Layout of the ripple plate illumination system

系统的光能利用率由波纹板的光能利用率 η_{ripple} ,CPC 的光能利用率 η_{CPC} 和二次曲面的光能利用率 η_{conic} 决定。整个系统的光能利用率 η_{sys} 定义为

$$\eta_{sys} = \eta_{ripple} \times \eta_{CPC} \times \eta_{conic}^2 \quad (4)$$

则可以得出该系统的光能利用率为 39.7% ,与现有波纹板照明系统(32.1%^[9])相比,光能利用率提高了 23.7%。

极紫外光刻照明区域的不均匀度即掩模扫描方向的光强线积分不均匀度,定义为

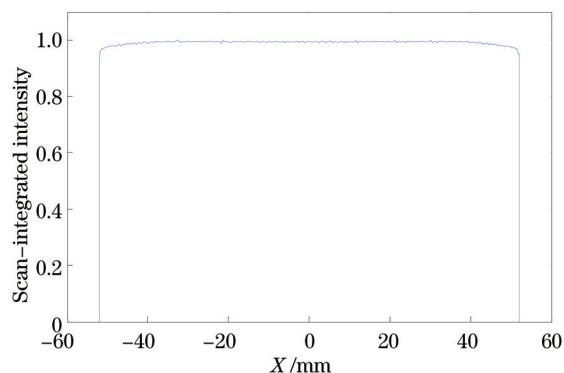


图 9 掩模面弧形照明区域扫描方向积分能量分布

Fig.9 Scanning energy distribution on the reticle plane

$$U = \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\%, \quad (5)$$

其中 E_{\max} 和 E_{\min} 分别代表掩模扫描方向的光强线积分的最大值和最小值。仿真结果表明,目标照明区域的不均匀度为 2.7%,如图 9 所示。上述仿真结果表明,提出的结构能够满足极紫外光刻照明系统的设计要求,同时可以极大地提高系统光能利用率。

5 结 论

设计了一种具有高光能利用率的极紫外光刻波纹板照明系统。该系统采用掠入射波纹板作为匀光元件,中继镜组由三片反射镜构成且其中一片为掠入射,系统结构紧凑,与传统照明系统相比,光能利用率显著提高。为了验证该结构的可行性,针对一套 NA 为 0.33 投影物镜,设计了与之相匹配的波纹板照明系统,仿真结果为该系统掩模上弧形照明区域扫描方向的积分非均匀度小于 2.7%。系统的光能利用率可以达到 39.7%,与现有系统相比,不仅提高系统能量利用率,同时降低了系统加工难度。设计结果表明,提出的波纹板照明系统结构不仅能够满足极紫外光刻照明系统的设计要求,而且能够大幅度提高光能利用率,缓解极紫外光刻光源的研发压力,为极紫外光刻的产业化发展提供一种思路。

参 考 文 献

- 1 Christian Wagner, Noreen Harned. Lithography gets extreme [J]. Nature Photonics, 2010, 4(1): 24-26.
- 2 David C Brandt, Igor V Fomenkov, Nigel R Farrar, *et al.*. LPP EUV source readiness for NXE 3300B [C]. SPIE, 2014, 9048: 90480C.
- 3 Michael Goldstein, Vivek Bakshi. Optical design for affordable EUV lithography optical lithography [C]. International EUVL Symposium, 2007 -10-28, Sapporo, Japan.
- 4 Jens Ossmann, Martin Endres, Ralf Stuetzle. Illumination Optical System for Microlithography: U.S., 8,174,677 [P]. 2012-05-08.
- 5 Henry N Chapman, Keith A Nugent. Novel condenser for EUV lithography ring-field projection optics [C]. SPIE, 1999, 376.7: 225-236.
- 6 Toshihiko Tsuji. Illumination System, Projection Exposure Apparatus and Device Manufacturing Method: U.S.,2003/0031017[P]. 2003-02-13.
- 7 Toshihiko Tsuji. Illumination Optical System and Exposure Apparatus: U.S.,2005/0057737 [P]. 2005-03-17.
- 8 Toshihiko Tsuji. Illumination Optical System and Exposure Apparatus:U.S.,2005/0057738 [P]. 2005-03-17.
- 9 Kazuhiko Kajiyama, Toshihiko Tsuji. Illumination Optical System and Exposure Apparatus Including the Same: U.S., 7538856 B2 [P]. 2009-03-26.
- 10 William L Eichhorn. Generalized conic concentrators [J]. Appl Opt, 1982, 21 (21): 3887-3890.
- 11 Qiuli Mei, Yanqiu Li, Fei Liu. A reverse design method for EUV lithography illumination system [C]. SPIE, 2013, 8679: 867923.

栏目编辑: 韩 峰