

极紫外投影光刻物镜设计

杨 雄 邢廷文

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 极紫外投影光刻用 14 nm 波长的电磁辐射,可以在实现高分辨率的同时保持相对较大的焦深,有希望成为制造超大规模集成电路的下一代光刻技术。极紫外投影光刻工作于步进扫描方式,采用全反射、无遮拦、缩小的环形视场投影系统。无遮拦投影系统的初始结构设计困难且重要。介绍了一种近轴搜索方法,该方法引入了像方远心、物方准远心、固定放大率、Petzval 条件和物像共轭关系等约束,通过计算确定第一面反射镜、最后一面反射镜、光阑所在反射镜的曲率,以及物距和像距。编写了近轴搜索程序,搜索出初始结构。从初始结构出发,优化得到两套物镜,一套由四反射镜组成的系统,数值孔径 0.1,像方视场 26 mm×1 mm,畸变 10 nm,分辨率优于 6000 cycle/mm。一套系统由六反射镜组成,数值孔径 0.25,像方视场 26 mm×1 mm,畸变 3 nm,分辨率优于 18000 cycle/mm。

关键词 光学设计;物镜;光刻;极紫外

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092909.2520

Design of Extreme Ultraviolet Lithographic Objectives

Yang Xiong Xing Tingwen

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Using radiation with a wavelength of 14 nm, Extreme ultraviolet lithography (EUVL) can reach a high resolution and remain relative large depth of focus, and it is a promising future-generation lithographic technique for manufacturing VLSI. EUVL operates in step-and-scan mode, and utilize all-reflective unobstructed reduction ring-field projection system. The starting configurations designing of unobstructed projection system is a nontrivial and important issue. A paraxial search method is introduced, which imposes constraints, such as rigorous telecentricity on the image side, quasi-telecentricity on the object, fixed magnification, Petzval condition and conjugated object-image. Curvatures of first mirror and last mirror, object distance and image distance are all solved consequently. And curvature of a reflecting surface coinciding with stop surface is solved. Paraxial search program is developed and some starting configurations are found. Two objectives are designed by optimizing two starting configurations. One is composed of four mirrors with the NA of 0.1, image field of 26 mm×1 mm, distortion of 10 nm, and the resolution better than 6000 cycle/mm. The other objective is composed of six mirrors with the NA of 0.25, image field of 26 mm×1 mm, distortion of 3 nm, and the resolution better than 18000 cycle/mm.

Key words optical design; objective; lithography; extreme ultraviolet

1 引 言

极紫外投影光刻(EUVL)采用 14 nm 波长的电磁辐射,可以用较小的 NA 制造出更细线宽,因此它更适合 16 nm 及以下线宽的光刻任务。近些年,国内也在积极开展光刻相关领域的研究工作^[1~3]。EUVL 物镜设计必须满足实现像方远心成像、物方准远心照明、放大率为 1/4 或 1/5 基本要求。为了实现高分辨率,成像光束除光阑外不能有遮拦,由此大大增加了 EUVL 物镜初始结构设计的难度。设计 EUVL 物镜

初始结构的方法有 $Y_Y \bar{\text{bar}}$ ^[4]、近轴搜索^[5]以及在已有结构上添加“反射镜对”^[6]等方法。添加“反射镜对”需要现有的结构, $Y_Y \bar{\text{bar}}$ 需要相当设计经验。近轴搜索法是一种自动的,系统性的设计方法,可以一次性获取多种类型的初始结构。但是近轴搜索的缺点是耗费时间长,当系统有 6 个以上反射镜时,做一次有效的搜索至少耗费一周以上时间。

本文关注的设计仅限于采用旋转对称同轴设计的 EUVL 物镜系统,采用文献^[5]的近轴搜索思想设

计初始结构,做了少量改进,在相同的搜索条件下,显著减少了搜索时间。用搜索的结果进行优化,设计了一个四反射镜物镜和一个六反射镜物镜。

2 近轴搜索初始结构

近轴搜索包括两大步骤:1) 根据物镜设计要求,用近轴计算公式,求解部分参数;2) 遮拦判断,筛选出无遮拦物镜结构。对于全反射式系统,光束在反射镜每反射一次,反射镜间的距离正负符合改变一次,也就是说反射镜间距符号是确定的,而反射镜曲率的正负号不能确定。文献[5]求解了四个距离变量和光阑所在反射镜的曲率变量,共五个。本文仅计算两个距离变量,另外计算出三个曲率变量,虽然计算的变量数相同,但距离变量的变化范围相对曲率变量更小,因此能有效减少搜索时间。

2.1 参数计算

采用矩阵法的近轴计算,其传播矩阵 \mathbf{T} 和折射矩阵 \mathbf{R} 分别为

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & d_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c_i \frac{n_{i-1} - n_i}{n_i} & \frac{n_{i-1}}{n_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2c_i & -1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

d_i 是第 i 折射面跟 $i+1$ 折射面之间的距离, c_i 是第 i 折射面的曲率, n_i 是第 i 折射面之后的折射率。EUVL 用全反射系统,所以每个折射面的前后折射率符号相反,大小等于 1。

当光阑在反射镜上时,主光线入射到该反射镜的高度为零。根据远心成像要求,主光线以零度角入射到像面,在近轴近似下有

$$\mathbf{R}_n \mathbf{T}_{n-1} \mathbf{R}_{n-1} \cdots \mathbf{R}_{s+1} \mathbf{T}_s \begin{bmatrix} 0 \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中第 \mathbf{T} 和 \mathbf{R} 分别是传播矩阵和折射矩阵,下标 s 表示光阑所在反射镜,下标 n 表示紧邻像面的反射镜。 h 表示像高, u_s 是主光线从光阑面出射的角度,该角度刚好与入射到光阑面的入射角大小相等,正负相反。(3)式中 h 为已经选定的固定值,当给出 $\mathbf{T}_{n-1}, \mathbf{R}_{n-1} \cdots \mathbf{T}_s$ 等矩阵的值,就能够从(3)式求得第 n 反射镜的曲率 C_n 。

近轴近似下有

$$\mathbf{T}_{s-1} \mathbf{R}_{s-1} \cdots \mathbf{R}_1 \mathbf{T}_0 \begin{bmatrix} H \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -u_s \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 H, U 分别是物高和主光线的出射角的正切值。 \mathbf{T}_0 是从掩模到第一面反射镜的传播矩阵。因

为要求物方准远心照明,所以将 U 设定为是一个很小的值。当给出 $\mathbf{T}_{s-1}, \mathbf{R}_{s-1} \cdots \mathbf{T}_1$ 等矩阵的值,就能够从(4)式求得第一面反射镜的曲率 C_1 和物距 D_0 。

由于要求 EUVL 物镜满足“零”场曲成像,所以物镜各折射面的曲率满足 Petzval 条件,即场曲为零,用公式描述为

$$\sum_{i=1}^N (-1)^i C_i = 0, \quad (5)$$

根据(5)式能够求出光阑面的曲率 C_s 。另外,根据物像关系,可以求得像距 D_n 。到此,EUVL 物镜的一部分参数直接设定,另一部分参数通过引入约束求解得到,所有结构参数全部确定。

2.2 搜索实验

根据极紫外投影光刻的应用要求,确定了其初始结构的设计目标,如表 1 所示。

表 1 初始结构参数

Table 1 Specifications of the starting configuration

Object height 104 mm
Magnification 1/4
Image NA 0.1/0.2
Angle of the principal ray on object $-4^\circ/-4.5^\circ$
Total track <1500 mm
Telecentricity on the image side
Unobstructed
0.1 NA and -4° for four mirror designing
0.2 NA and -4.5° for six mirror designing

变量的取值范围太小,可能无法获得全面的搜索结果,反之又将耗费太多时间。变量取值范围需要结合实际情况,再通过一些搜索实验确定。最终选取曲率变量范围为 $[-1/2500, 1/2500]$, 距离变量绝对值为 1000, 正负号由反射次数决定,物距设定为正号。跟文献[5]类似,光阑面与反射镜重合,但不在第一面反射镜和最后一面反射镜上。物方视场仅考虑单点而不是环行视场,是为了减少计算量,缩短搜索时间,作为初始结构设计,这样的处理方式可行。

3 设计实例

从近轴搜索得到的结果中,通过追迹光线进行筛选,找出理想的初始结构设计。利用 Codev 光学设计软件进行优化,优化目标主要包括远心成像,准远心照明,无遮拦,放大率 1/4,畸变小于临界线宽(CD)的 1/10。下面给出两个设计结果。

3.1 四反射镜设计

从近轴搜索的结果中挑选了一个四镜结构,添

加 4,6,8 级非球面系数并优化,得到了如下的四镜设计,放大率 1/4,像方数值孔径 0.1,物像共轭距 886 mm。图 1 是四反射镜设计的光路图,图 2 是畸变视场曲线,图 3 是该设计的方波衍射调制传递函数(MTF)曲线。物方视场 102~106 mm,视场内畸变小于 10 nm,波像差均方根 0.048 λ 。主光线在各反射面的入射角分别是 3.15°,3.50°,9.33°,4.67°,第三面的入射角比专利^[7]小 2.5°以上,减轻了镀制高反射 Mo/Si 多层膜的困难。该设计可用于工程化实验装置。

加 4,6,8,10 级非球面系数并优化,得到了如下设计,放大率 1/4,像方数值孔径 0.25,物像共轭距 782 mm,物方视场 102~106 mm,视场内畸变小于 3 nm,波像差均方根小于 0.019 λ 。图 4 是六反射镜设计的光路图,图 5 是畸变视场曲线,对称的畸变曲线将使得光刻系统的动态畸变保持最小。图 6 是该设计的方波衍射 MTF 曲线,从曲线可以看到,该物镜的分辨率优于 30 nm。

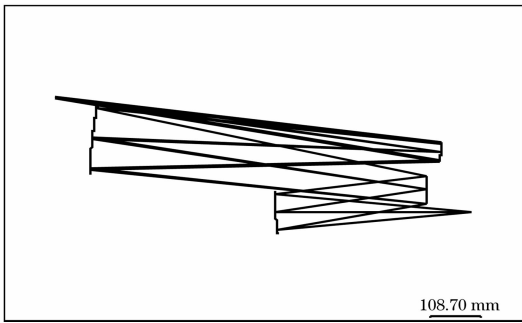


图 1 四镜设计的光路图

Fig. 1 Layout of 4-mirror optics of EUVL

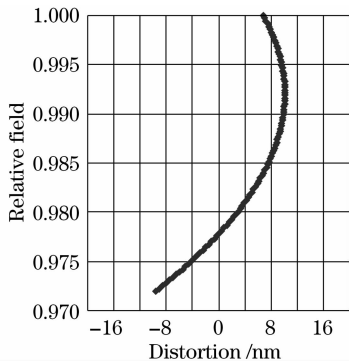


图 2 畸变曲线

Fig. 2 Distortion dependence of relative field

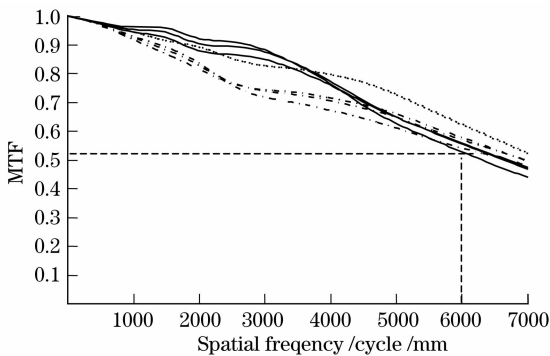


图 3 调制传递函数与空间频率的关系

Fig. 3 Spatial frequency dependence of FMT

3.2 六反射镜设计

从近轴搜索的结果中挑选了一个六镜结构,添

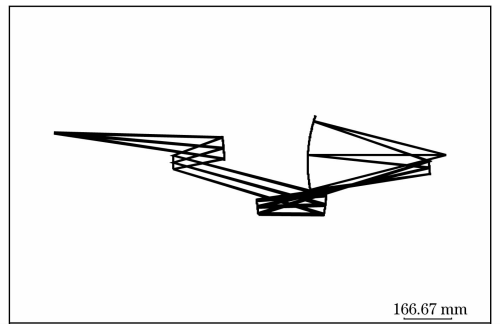


图 4 六镜设计的光路图

Fig. 4 Layout of 6-mirror optics of EUVL

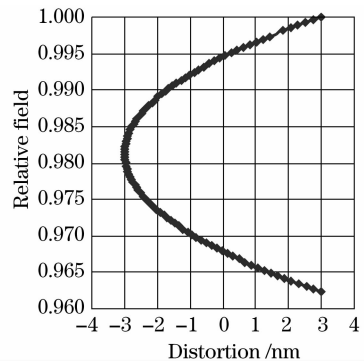


图 5 畸变曲线

Fig. 5 Distortion dependence of relative field

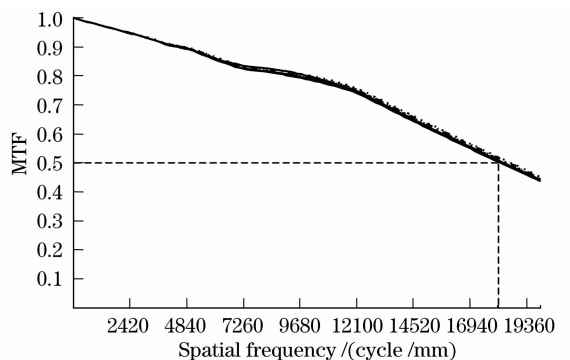


图 6 调制传递函数与空间频率的关系

Fig. 6 Spatial frequency dependence of FMT

4 结 论

介绍了一种近轴搜索设计方法并做了少量改进,在相同的搜索条件下,显著减少了搜索时间。利

用搜索的结果进行优化,设计了两套物镜系统,四镜系统分辨率达到 6000 cycle/mm,适合作为工程化实验装置,六镜系统分辨率达到 18000 cycle/mm,基本满足 30 nm 以上线宽的光刻产业化要求。

参 考 文 献

- 1 Li Yanqiu. Optical performance of extreme-ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 865~868
李艳秋. 50 nm 分辨率极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 865~868
- 2 Jin Chunshui, Ma Yueying, Pei Shu *et al.*. Development of elementary arrangement for extreme ultraviolet projection lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 852~857
金春水, 马月英, 裴 舒 等. 极紫外投影光刻原理装置的集成研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 852~857
- 3 Wang Liping, Jin Chunshui, Zhang Lichao. Two-mirror system design study of reduced projection optics for EUV lithography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12):113~117
王丽萍, 金春水, 张立超. 极紫外投影光刻两镜微缩投影系统的光学设计[J]. *光电工程*, 2007, **34**(12):113~117
- 4 Scott A. Lerner, Jose M. Sasian, Michael R. Descour. Design approach and comparison of projection cameras for EUV lithography[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(3):792~802
- 5 Matthieu F. Bal, Florian Bociort, Joseph J. M. Braat. Analysis search and classification for reflective ring-field projection systems [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13):2301~2311
- 6 Florian Bociort, Oana Marinescu. Designing lithographic objectives by constructing saddle points[C]. *SPIE*, 2006, 6324, TuA3
- 7 Hudyma, Russell M.. Reflective optical imaging systems with balanced distortion[P]. *US Patent*, 2001, 6226346