

极紫外光刻投影物镜中多层膜分析模型的建立及应用

王 君^{1,2} 金春水¹ 王丽萍¹ 郭本银¹ 喻 波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 极紫外光刻投影系统中高反膜厚度一般约 300 nm, 远大于 13.5 nm 的工作波长, 光能并不能完全穿透膜层入射到基底, 从而引入数倍于波长的额外光程差, 降低系统成像质量。从能量调制的角度提出了一种基于能量守恒定律的多层膜等效工作界面模型, 将光学薄膜中复杂的物理光学过程等效地转换为简单直观的几何光学过程, 获取可被常用光学设计软件识别的数据, 进而实现对有膜光学系统的分析。利用该模型对不同系统进行了分析优化, 获得了一套可实现衍射受限成像的有膜系统方案, 证明了基于能量守恒的等效工作界面的有效性, 指导后续系统的装调, 为多次反射系统的分析提供了一种方法。

关键词 成像系统; 光学设计; 极紫外光刻; 等效工作界面; 多层膜; 能量守恒

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0811002

Foundation and Application of Model for Multilayers Analysis in Extreme Ultra-Violet Lithography Projection

Wang Jun^{1,2} Jin Chunshui¹ Wang Liping¹ Guo Benyin¹ Yu Bo¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The thickness of multilayer coatings in extreme ultraviolet lithography (EUVL) projection system is about 300 nm which is much greater than the work wavelength of 13.5 nm. The most energy can not punch the substrate and optical path difference of dozens of wavelength is induced. Then the image degrades. A model named equivalent work surface (EWS) is built up for coating analysis based on the principle of energy conservation. From the point of energy modulation, the EWS model transforms the complex physical optics into brief and intuitive geometrical optics, getting recognizable data for commercial softwares. Finally with the aid of EWS, a diffraction-limited virtually-coated system is confirmed, proving the significance of the EWS model. The model can be used for the direction of following alignment and multi-reflection system optimization and coating analysis.

Key words imaging systems; optical design; extreme ultraviolet lithography; equivalent work surface; multilayers; energy conservation

OCIS codes 110.2960; 220.3620; 310.6805; 340.7480

1 引 言

极紫外光刻技术采用 13.5 nm 的极紫外光进行成像曝光, 被认为是最具潜力的下一代光刻技术之一而受到广泛关注。目前, 荷兰 ASML 公司已经

研制多套大视场、高数值孔径 (NA) 投影曝光测试系统, 正向极紫外光刻的产业化迈进^[1-2]; 美国的 LLNL 等实验室开展了面向 11 nm 技术节点的 0.5 NA 实验曝光装置研究^[3-4]。国内从 20 世纪 90

收稿日期: 2014-02-25; 收到修改稿日期: 2014-04-29

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX02501)

作者简介: 王 君(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事极紫外光刻投影系统光学设计方面的研究。

E-mail: wjciomp@gmail.com

导师简介: 金春水(1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事极紫外光学技术方面的研究。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

年代起开始关注极紫外光刻(EUVL)的研究进展,在过去的二十多年中,多个研究团队在光学系统设计集成^[5-8]、掩模优化制作^[9-11]、多层膜工艺^[12-13]、极紫外光源^[14-16],超高精度光学元件加工检测^[17-18]等多个关键技术开展研究并取得了多项技术突破,逐步缩小了与国外差距。

Mo/Si 多层高反射膜作为极紫外光刻系统中的一个不可或缺的因素^[9,19-20],其周期数一般为 40~60,总厚度达 300 nm 左右,光能并不能完全透过薄膜层入射到镜面基底,因此高反膜的引入会导致实际工作面数倍于工作波长的改变,引入额外波像差,且不能简单地处理为工作面的平移,这将严重影响高分辨率投影系统的成像质量^[21-23]。因此在进行极紫外光刻领域光学设计时必须定量地考虑光学薄膜对系统的影响,对镀制光学薄膜后的投影系统做出评估。常用光学设计软件如 Zemax 及 CODE V 等在使用光线追迹方法评价系统成像质量时对光学薄膜的处理一般采取薄膜向光学基底内部生长或忽略的方式,只考虑薄膜引入的相移及“透射率”^[24-26]。Bal 等^[26-27]从薄膜所产生相位变化的角度相互独立地推导建立了有效入射深度模型,该深度是光线入射角及薄膜参数的函数,正比于薄膜引入的相移对光线入射角的二阶偏导,并运用该模型成功地对薄膜可能引入系统的像差进行了分析,为极紫外光刻系统中光学薄膜的功能分析提供更为直观的思路。由于推导中采用了余弦函数的低阶近似,忽略了 4 阶及以上高阶项,以及薄膜中 p 光和 s

光在大角度情况下相位变化的不一致,因此该模型在入射角较大时可能会出现某些不适,如 p 光和 s 光的有效入射深度发生较大分离,或出现负值等。

本文从基本的电磁场理论出发,从光学元件对能量的调制角度推导构造基于能量守恒定律的镀膜光学元件等效工作面模型。该模型将构造一个与镀制光学薄膜后的光学元件具有相同能量调制作用的虚拟工作面,将光学薄膜中复杂的物理光学过程转化为直观的几何光学过程,解决了基于薄膜引入相位变化的等效界面模型在大入射角情况下出现不适的问题;此外,该模型结合商用光学设计软件还可实现对镀膜光学系统的评估及优化设计。最后,将利用该模型,获得不同镀膜元件的等效工作面,通过对等效后的投影系统进行横向对比,确定一套可实现衍射受限成像的有膜光学系统设计方案,证明基于能量守恒的等效界面模型的有效性。

2 等效工作面模型

本节将从电磁场理论基本公式出发,简述光能在吸收介质中传播的能量变化规律;依据能量守恒定律建立光能有效入射深度与传播介质属性的关系,最终分析建立光学薄膜的等效工作面模型。

2.1 基本原理

根据电磁场理论,求解麦克斯韦方程组可知电磁波在均匀吸收介质中传播时,其电场分布为^[28]

$$E(z, \theta_0) = \epsilon \exp \left\{ i\omega t - \left[\frac{2\pi N(z)}{\lambda} \right] r(z, \theta_0) \right\} = \epsilon \exp \left\{ - \left[\frac{2\pi k(z)}{\lambda} \right] r(z, \theta_0) \right\} \exp \left\{ i\omega t - \left[\frac{2\pi n(z)}{\lambda} \right] r(z, \theta_0) \right\}, \quad (1)$$

式中介质深度 z 为原点位于介质入射面,并垂直于该面的坐标, r 为光在介质中的传播路径,是 z 和入射角 θ_0 及介质分布规律的函数, $N = n - ik$, 是介质的复折射率, n 为折射率, k 为消光系数。则光倾斜入射到介质中传播到一定距离后其对应的光强为

$$I_s(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(N) E E^* = I_{s0} \exp \left[- \frac{4\pi k(z)}{\lambda} r(z, \theta_0) \right], \quad (2)$$

式中 $I_{s0} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(N) \epsilon^2$ 为光进入介质后的初始光强,脚标 s 表示其光强为垂直于坡印廷矢量的平面内的值,这与利用特征矩阵法求解光学薄膜关于反射率

和透射率^[29]的定义一致。整理(2)式得:

$$I_s(z)/I_{s0} = \exp \left[- \frac{4\pi k(z)}{\lambda} r(z, \theta_0) \right]. \quad (3)$$

由此便建立了“出射”光强、“入射”光强与传播路径的关系,可经数值或解析的方法求解入射介质深度 z 。这便是等效工作面模型的理论基础。

2.2 等效工作面

本节将以理想光学薄膜为研究对象,以能量守恒定律为依据推导光学薄膜的有效入射深度,建立等效工作面模型。

在传统光学设计软件中,无论是光学设计还是像质评价阶段,系统中的各光学元件工作面总是唯

一的,而不能考虑光学薄膜中存在的多次反射和透射。为了达到利用现有光学设计分析资源对有膜光学系统进行优化评价的目的,从能量调制的角度,假设在多层膜中存在这样一个界面:入射光到达该界面后,其透射部分可以认为达到一稳定值,即薄膜的透射率;而其反射部分再次经过薄膜回到真空后,其值为薄膜的反射率。将该界面定义为该镀膜光学元件的等效工作界面(EWS),等效工作界面与薄膜表面间的距离为薄膜的有效入射深度,等效工作面与基底面的距离为薄膜的附加厚度。

如图 1 所示,图 1(a)表示光在真实膜系中的传播,图 1(b)表示引入等效工作界面模型后的光传播。此时,真实的光学薄膜被等效为一与其有相同反射率、透射率以及吸收的单一反射工作界面。在此需要特别说明一点,即等效后的透射光方向应与真实膜系相同,其方向应是真实膜系中光在硅基底中的传播方向。

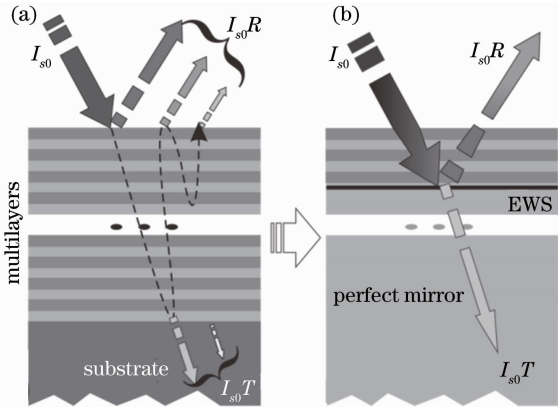


图 1 等效工作界面模型示意图。(a)光在真实膜系中的传播;(b)等效工作界面模型中的光传播

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent working surface model. (a) Energy transform in real multilayer; (b) energy transform in equivalent work surface model

如图 1 所示,一束光强为 I_{s0} 的光入射到多层膜,设处于有效入射深度内的膜层对光强的衰减系数为 C_{att} ,则对于图 1(b)所示整个光能传播过程有:

$$(I_{s0} \cos \theta_i C_{att} - I_{s0} T \cos \theta_t) C_{att} = I_{s0} R \cos \theta_r, \quad (4)$$

式中 $\theta_i, \theta_t, \theta_r$ 分别为入射角,透射角和反射角, I_{s0} 为入射总光强, R 为薄膜反射率, T 为光学薄膜透射率。以上各量均为已知量或可以能过膜系参数计算出的量。求解(4)式有:

$$C_{att} = \frac{T + \sqrt{T^2 + 4R}}{2}. \quad (5)$$

根据 2.1 节中所述有:

$$C_{att} = \exp \left[-\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^{D'} k(z, \theta_i) dz \right], \quad (6)$$

式中 λ 为工作波长, D' 为等效工作界面距薄膜表面的垂直厚度,即有效入射深度, z 为原点位于薄膜表面,并垂直于薄膜表面的坐标,与 2.1 节所述之介质深度一致, k 为光学薄膜中经入射角 θ_i 调制后的消光系数分布。根据(5)式和(6)式,针对不同膜系的消光系数分布可以通过数值或解析的方法求解得到 D' 。

2.3 模型修正

为了更清晰、高效地阐述该模型,从光在介质中的传播顺利地过渡到光在多层膜中的传播,后者较之于前者存在以下两点特殊性:

1) 光能在多层膜内膜层间发生的多次反射和透射;

2) 由于薄膜表面反射和透射的存在,部分光能提前返回真空中而不再继续与薄膜发生相互作用。

为此,需对 2.2 节中等效工作界面模型做出修正。从 2.1 节中的电磁场基础理论可知,出射能量随着光能传播路径的增加呈指数衰减。膜层间的反射率越大,则参与膜层间反射的光能和反射的次数也就越多,在保证具有相同能量衰减(即光传播的路径相等)的情况下,光所进入的几何距离也就越小,并且如同光能随传播距离之衰减一样,呈指数规律减小。因此需引入一个修正因子对上面求得的 D' 进行修正,得到考虑膜层间多次反射情况下的等效入射界面更准确的位置:

$$D = D' \exp(-R'), \quad (7)$$

式中 R' 为膜层间的反射率,它是入射角 θ_i 的函数。

另一方面,由于薄膜表面的反射,导致部分光能未与前述模型中假设的那样与 D' 内的所有薄膜材料进行作用,而提前返回真空中,这将会导致已经过一次修正的有效入射深度 D'' 仍然偏大,进而需再次对有效入射深度进行修正,该次修正与薄膜表面的反射率有关:

$$D = (1 - R_0) D' \exp(-R'), \quad (8)$$

式中 R_0 为光学薄膜表面介质在入射介质中的反射率。至此,完成了基于能量守恒定律的多层膜分析模型的建立和修正,得到了光在多层膜中的有效入射深度 D 。

当确定等效界面的具体位置,即求得有效入射深度 D 后,便可通过与光学基底数据进行高精度拟合得到适用于现有光学设计软件的新的工作面,即等效工作界面。由于该等效工作界面已经包含了光

学薄膜对系统能量传播的调制信息,因此在后续的系统兼容性优化设计等流程中便可利用该等效工作界面集中对镀膜后的光学系统像质进行分析评价。

3 等效工作界面的应用

等效工作界面模型实现了光学薄膜与系统的有机结合,从能量调制的角度将薄膜对系统的影响转换为单一工作界面的作用,进而满足了利用传统光学设计软件对有膜光学系统进行分析 and 优化的实际需求。该模型主要可用于光学系统设计方案与光学薄膜兼容性判断。

3.1 有膜光学设计方案兼容性判定

随着光学系统工作波长的不断拓展,光学薄膜成为当今光学系统必不可少的元素,在提高产率、增强系统性能及抑制杂光等方面起着至关重要的作用。然而,光学薄膜的引入势必会或大或小地影响系统成像性质。就极紫外光刻领域而言,如前所述,

其膜厚远大于工作波长,从时域有限差分(FDTD)算法求解得到电磁场分布可以明显地看出,光能所能进入薄膜的深度与光学薄膜总厚度存在数倍于工作波长的差异^[30],这对一个系统波像差均方根值需要达到亚纳米量级的高精度光刻系统是致命的。因此,需要对光学薄膜与系统设计是否兼容做出评估,指导后续加工优化,降低研发成本。

利用等效工作界面模型可以从能量调制的角度将薄膜虚拟为单一的工作界面,实现与传统光学设计软件的结合。以下将以一套 Schwarzschild 形式的两镜非球面微缩投影系统及其调制传递函数(MTF)(如图 2 所示)为例分析在主镜(M1)分别镀制均匀膜和梯度膜,次镜(M2)镀制均匀膜前后的波前像差变化情况,以能否通过调节前后工作距达到或接近裸光学系统成像水平为判据,判定两种光学薄膜与系统的兼容性。

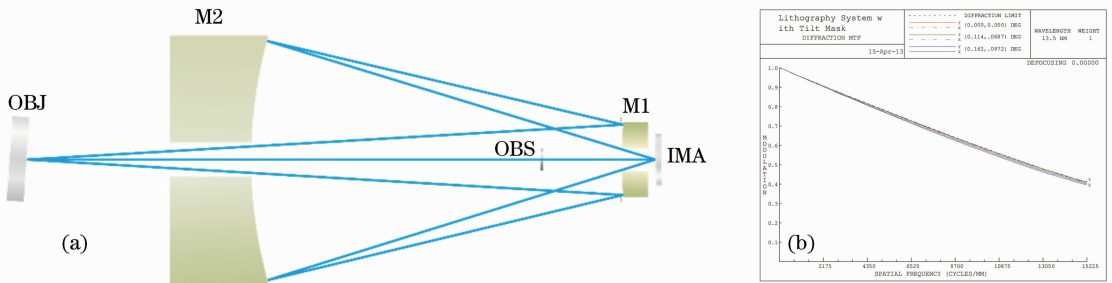


图 2 (a)反射式掩模投影光学系统及(b)其调制传递函数曲线

Fig. 2 (a) Projection optical system with reflective mask and (b) its MTF curve

3.2 两镜薄膜实验参数

通过真实光线追迹,如图 3(a)所示,M1 的有效工作区域内入射角带宽 Δ_1 达 6° ,分布于 $2.5^\circ \sim 8.5^\circ$ 间,在这种入射角分布范围内不可能通过镀制均匀

膜同时实现镀膜元件的高反射率和高均匀性;而全视场的光入射到 M1 上同一位置的入射角带宽 δ_1 较窄,其全口径内最大值约为 0.38° ,因此在 M1 上添加薄膜周期厚度随镜面位置变化而变化的梯形膜

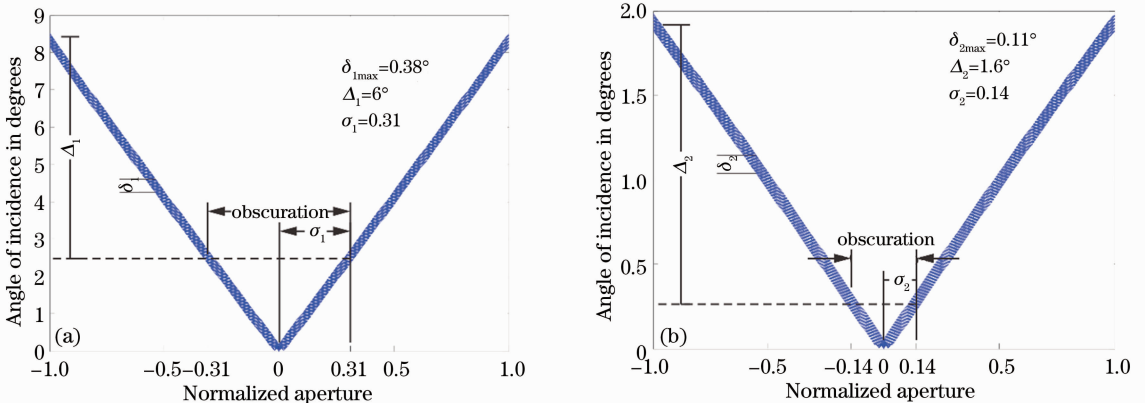


图 3 投影系统镜面入射角分布。(a)主镜 M1; (b)次镜 M2

Fig. 3 Angle of incidence on mirrors in projection system. (a) Primary mirror, M1; (b) secondary mirror, M2

可以同时实现元件的高反射率和高均匀性,此为方案一。作为其对照组,方案二将在 M1 上添加周期厚度恒为一常量的均匀光学薄膜,其周期厚度由全视场在 M1 镜全口径内的平均入射角决定。

同理,如图 3(b)所示,M2 的有效工作区域内其入射角带宽 Δ_2 约为 1.6° ,分布于 $0.3^\circ \sim 1.9^\circ$ 间,接近正入射。在现有光学薄膜设计制造水平下,光学薄膜在该入射角范围内可同时具备高反射率和高均匀性,综合薄膜工艺的易实现性及成像等方面的考虑,确定在两种对比方案中 M2 均添加均匀膜,其周期厚度由全视场在 M2 全口径内的平均入射角决定。以上所述各薄膜的 Γ 值均为 0.4,其定义如下^[31]:

$$\Gamma = \frac{\Delta t_H}{\Delta t_H + \Delta t_L} = \frac{\Delta t_H}{d}, \quad (9)$$

式中 Δt_H 和 Δt_L 分别是高、低 Z 原子序数材料的厚度, d 为薄膜周期厚度。薄膜具体参数如图 4 所示,分别给出了不同镜面上,不同类型光学薄膜规一化周期厚度随镜面规一化口径的分布曲线。

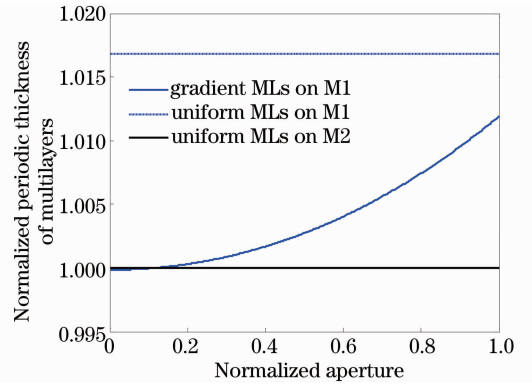


图 4 规一化薄膜周期厚度随规一化镜面口径的变化曲线

Fig. 4 Normalized periodic thickness of different multilayers versus normalized aperture of mirrors

3.3 薄膜附加厚度计算

本节在 3.2 节所述光学薄膜参数的基础上,采用所述之光学薄膜等效界面模型对两种镀膜方案中光学薄膜的附加厚度进行了计算。如图 5 所示,其中红色圆圈分别标明了镜面有效工作区域的内、外径,灰度表示了薄膜附加厚度的大小,其正负表示了等效工作界面在全局坐标中相比于镜面基底的改变。

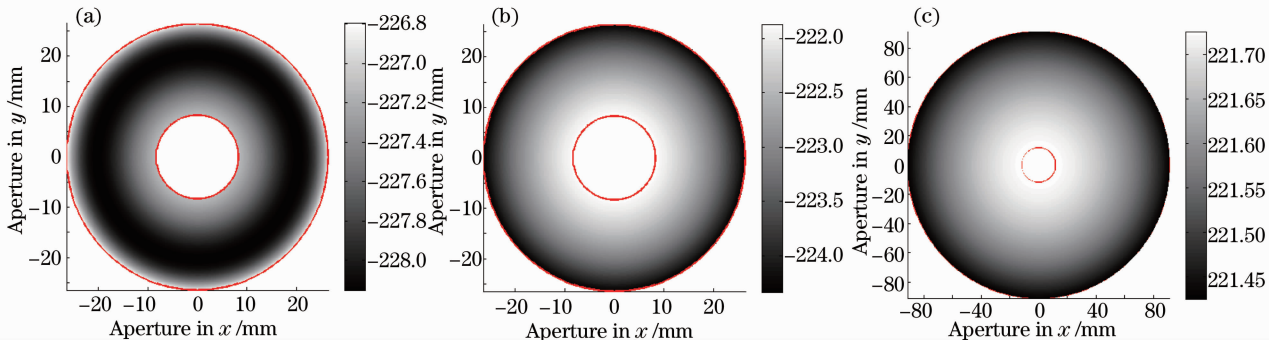


图 5 不同镜面不同膜系的附加厚度分布。(a)均匀膜在主镜(M1)上;(b)梯度膜在主镜(M1)上;
(c)均匀膜在次镜(M2)上

Fig. 5 Additional thickness distribution of different multilayers on different mirrors, respectively. (a) Uniform multilayers on M1; (b) gradient multilayers on M1; (c) uniform multilayers on M2

3.4 有膜光学系统成像比较

在 3.3 节的基础上,通过将薄膜的附加厚度与裸光学系统参数高精度拟合,构造出一新的等效光学系统以替代有膜光学系统,并利用传统光学设计软件等效地实现对有膜光学的像质评价。在此,将两种镀膜光学系统及裸光学系统在典型视场点的成像水平及全视场综合成像水平进行横向对比。

结合生产实际及加工水平,对该比较需作以下说明:1)处于工作状态的投影系统,基底、薄膜及镜面间距等参数既定,仅允许对系统的物、像距做一定调节;2)优化调节过程中,系统放大倍率精度控制在

1×10^{-6} 内;3)在查看像质[复合均方根(RMS)值, Zernike Fringe 系数等]时,均对几何量精度进行降级处理(使软件计算时所使用的数据精度低于或等于装调、加工等过程中所能达到的精度),以便更贴近工程实际。

计算结果如图 6 和图 7 所示,从图 6 中可以直观地看出,在 M1 上添加均匀膜后,同时以物、像距作为优化参数,典型视场的 MTF 难以恢复到添加薄膜前的衍射受限水平,且其下降幅度不可接受,表明在 M1 上添加均匀膜所引入的像差不可通过简单的物、像距调整得到补偿,对后续生产过程中的系统

像质提高带来巨大挑战;另一方面,当在 M1 上添加梯度膜时,在同等优化约束下,仅通过调整像面位置便使系统恢复到衍射受限水平,表明在 M1 上添加

梯度膜既保证了全口径的高反射率、照明高均匀性,又极大地降低了生产过程中装调的难度。

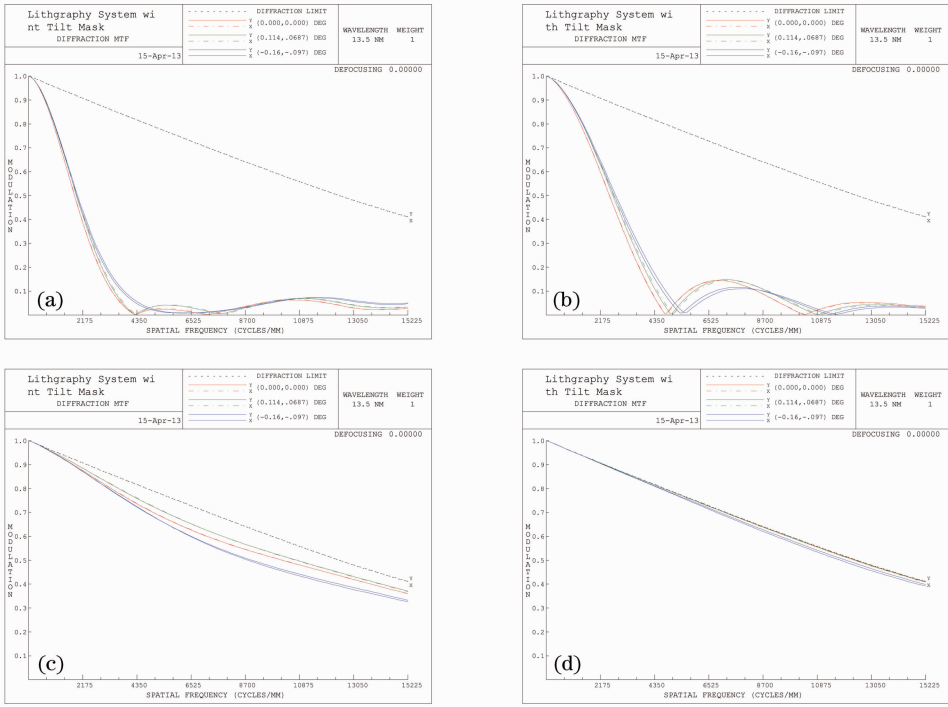


图 6 添加不同光学薄膜优化前后系统的 MTF 曲线。(a),(c) M1,M2 均添加均匀膜; (b),(d) M1 添加梯度膜, M2 添加均匀膜

Fig. 6 MTF of differently multilayered systems before and after optimization. (a), (c) M1 and M2 with uniform multilayers; (b), (d) M1 with gradient multilayer and M2 with uniform multilayer

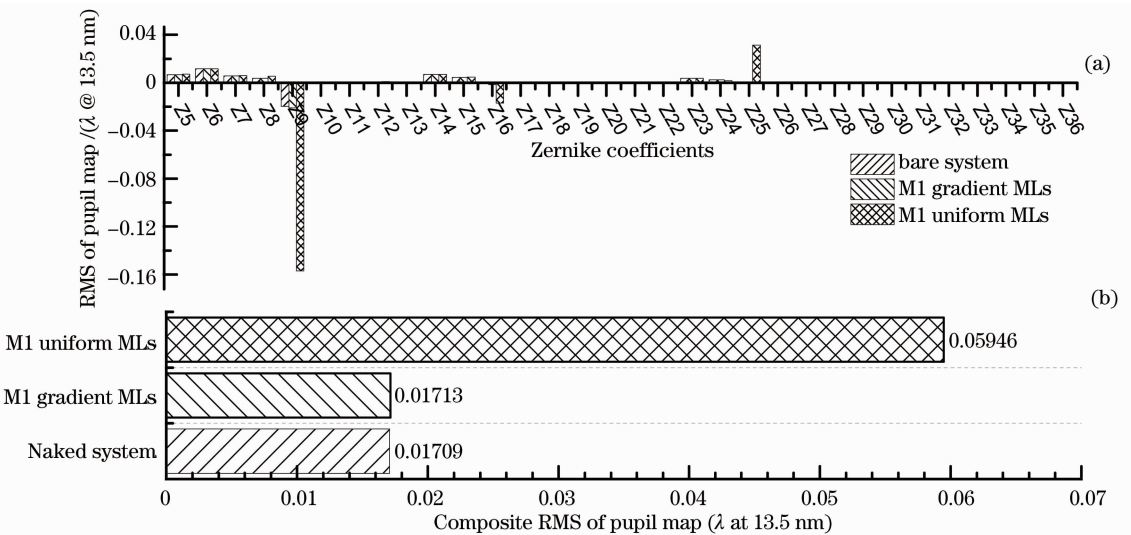


图 7 裸光学系统及不同有膜光学系统成像对比。(a) 0.7 视场成像质量对比; (b) 全视场综合成像质量对比

Fig. 7 Imaging qualities of projection systems with different types of multilayers (including no coating) on M1. (a) Imaging quality of 0.7 view point; (b) imaging qualities of different systems over the full aperture

图 7 将图 6 中所述的优化后的有膜系统进行量化处理,并与裸光学系统进行对比。当向 M1 添加周期厚度一定的均匀膜时,在保证微缩倍率约束精

度高于 1×10^{-6} 时,薄膜向系统引入的较大的高次球差项无法通过调整系统的物距、像距等得到补偿,其全视场复合均方根值约为 $0.06\lambda @ 13.5 \text{ nm}$

(0.8 nm),这极大地占用了加工检测、装调以及环境控制等其他影响投影系统成像质量的因素的公差配额,使得系统无法在现有生产水平下满足成像曝光要求。而当向 M1 添加优化得到的梯度膜时,在同等约束条件下,仅通过对像距数百纳米的调节便能迅速使像质恢复到衍射受限水平,与裸光学系统相比,其各视场点成像的 Zernike 系数及全视场复合均方根值均无明显增加,这极大地简化了测试装调过程,降低了工程难度和加工成本,表明方案一与前述之光学系统具有更好的兼容性。同时,还可以看出在 M2 上添加均匀膜并未给系统造成明显影响,因此印证了在 3.2 节中关于为什么在 M2 上添加均匀膜的论述。

综上所述,出于成像质量要求及加工成本两方面考虑,确定所述两镜投影系统主镜 M1 镀制薄膜周期厚度随镜面位置变化的梯度膜,次镜 M2 上添加周期厚度恒定的均匀膜,以实现系统在具备良好成像水平的前提下,具有更高的出射能量及全视场成像均匀性。

4 结 论

建立了基于能量守恒定律的多层膜等效工作界面模型。该模型将极紫外光刻技术中多层膜内复杂的物理光学传播过程等效地转换为简洁直观的几何光学过程,有效地克服了基于薄膜引入相位变化的等效界面模型在大入射角情况下的不足。并以 Swartzschild 系统为例,运用基于能量守恒的等效工作界面模型获得了不同镀膜元件的等效工作面,构造了不同的等效系统并进行横向对比,结果表明,当主镜镀制薄膜周期厚度随入射角变化的梯形膜、次镜镀制均匀膜时,仅通过调整优化像面位置便使系统达到了衍射受限水平,为后续系统装调提供了理论上的依据,证明了该模型的有效性。由于该模型基于基本的能量守恒定律和电磁场理论,因此在适用性上更具广泛性;同时它有效地克服了基于相位的等效界面的不足,将为入射角分布更为复杂的六反投影系统中光学薄膜的分析优化提供一种方法。

参 考 文 献

- 1 H Meiling, W de Boeij, F Bornebroek, *et al.*. From performance validation to volume introduction of ASML's NXE platform [C]. SPIE, 2012, 8322: 83221G.
- 2 M Lowisch, P Kuerz, O Conradi, *et al.*. Optics for ASML's NXE:3300B platform [C]. SPIE, 2013, 8679: 86791H.
- 3 M Goldstein, R Hudyma, P Naulleau, *et al.*. Extreme-ultraviolet microexposure tool at 0.5 NA for sub-16 nm

- lithography [J]. Opt Lett, 2008, 33(24): 2995.
- 4 H Glatzel, D Ashworth, M Bremer, *et al.*. Projection optics for extreme ultraviolet lithography (EUVL) micro-field exposure tools (METs) with a numerical aperture of 0.5 [C]. SPIE, 2013, 8679: 867917.
- 5 Wang Liping. Optical system of extreme ultraviolet lithography [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(5): 452-461.
王丽萍. 极紫外投影光刻光学系统[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 452-461.
- 6 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222003.
刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222003.
- 7 Wang Jun, Jin Chunshui, Wang Liping, *et al.*. Study on the off-axis illumination for extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211003.
王 君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻离轴照明技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211003.
- 8 Wang Hui, Zhou Feng, Wang Liping, *et al.*. Analysis and metrology of reproducibility of high-precision optic mount [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208001.
王 辉, 周 烽, 王丽萍, 等. 高精度光学元件支撑装置面形复现性分析与测量[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208001.
- 9 Du Yuchan, Li Hailiang, Shi Lina, *et al.*. Integrated development of extreme ultraviolet lithography mask at 32 nm mode [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1034002.
杜宇禅, 李海亮, 史丽娜, 等. 32 nm 节点极紫外光刻掩模的集成研制[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1034002.
- 10 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebing, *et al.*. Micro- and nano-metal structures fabrication technology and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.
- 11 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Qiu Zicheng, *et al.*. Simplified model for mask diffraction in extreme-ultraviolet projection lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405001.
曹宇婷, 王向朝, 邱自成, 等. 极紫外投影光刻掩模衍射简化模型的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0405001.
- 12 Zhu Wenxiu, Jin Chunshui, Kuang Shangqi, *et al.*. Design and fabrication of the multilayer film of enhancing spectral-purity in extreme ultraviolet [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1031002.
祝文秀, 金春水, 匡尚奇, 等. 提高极紫外光谱纯度的多层膜设计及制备[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1031002.
- 13 Qin Juanjuan, Dong Weiwei, Zhou Shu, *et al.*. Recent advances in multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2014, 31(1): 1-11.
秦娟娟, 董伟伟, 周 曙, 等. 应用于极紫外光刻系统多层膜的研究进展[J]. 量子电子学报, 2014, 31(1): 1-11.
- 14 Zhao Yongpeng, Xu Qiang, Li Qi, *et al.*. Influence of plasma size on discharge extreme ultraviolet source [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2631-2635.
赵永蓬, 徐 强, 李 琦, 等. 等离子体尺寸对放电极紫外光源影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2631-2635.
- 15 Dou Yinping, Sun Changkai, Lin Jingquan. Laser-produced plasma light source for extreme ultraviolet lithography [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2013, 6(1): 20-33.
窦银萍, 孙长凯, 林景全. 激光等离子体极紫外光源[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 20-33.
- 16 Zhao Yongpeng, Xu Qiang, Xiao Delong, *et al.*. Time behavior and optimum conditions for the Xe gas extreme ultraviolet source [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(24): 245204.

- 赵永蓬, 徐 强, 肖德龙, 等. Xe 介质极紫外光源时间特性及最佳条件研究[J]. 物理学报, 2013, 62(24): 245204.
- 17 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei. Rigorous vector analysis of the effect of illumination objective lens aberration on the quality of far-field diffracted wave front [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0812001.
卢增雄, 金春水, 马冬梅. 照明物镜像差对远场衍射波前质量影响的严格矢量分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0812001.
- 18 Zhang Yu. Research of Measuring Technology for Wavefront Error of EUVL Objective System [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
张 宇. 极紫外光刻物镜系统波像差检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- 19 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222003.
刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222003.
- 20 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Manufacturable design of 16~22 nm extreme ultraviolet lithographic objective [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922005.
曹 振, 李艳秋, 刘 菲. 16~22 nm 极紫外光刻物镜工程化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922005.
- 21 E Tejnil, K A Goldberg, J Bokor. Phase effects owing to multilayer coatings in a two-mirror extreme-ultraviolet schwarzschild objective [J]. Appl Opt, 1998, 37(34): 8021-8029.
- 22 C Liang, M R Descour, J M Sasian, *et al.*. Multilayer-coating-induced aberrations in extreme-ultraviolet lithography optics [J]. Appl Opt, 2001, 40(1): 129-135.
- 23 S Edlou, L Sun, C Synborski. Coating induced phase aberration in a Schwarzschild objective [C]. SPIE, 2008, 7067: 706709.
- 24 ORA. Defining Coating and Cement Data [CP]. in Code V Electronic Document Library, Optical Research Associates, 2009, Vol. II: 7-28-7-29.
- 25 ZEMAX. Defining coatings in ZEMAX [CP]. in ZEMAX Optical Design Program User's Guide, ZEMAX Development Corporation, 2009, Ch. 20: 583-597.
- 26 M F Bal, M Singh, J J M Braat. Optimization of multilayer reflectors for extreme ultraviolet lithography [J]. J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2004, 3(4): 537-544.
- 27 J Wesner, F Eisenkramer, J Heil, *et al.*. Improved polarization ray tracing of thin-film optical coatings [C]. SPIE, 2004, 5524: 261-272.
- 28 H A Macleod. Thin-Film Optical Filters (4th Edition) [M]. BocaRaton: CRC Press, 2010. 73-103.
- 29 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Press of Zhejiang University, 2006. 11-36.
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 11-36.
- 30 T Pistor. HyperLith [CP]. Panoramic Technology, 2012. <http://panoramictch.com/index.php/products/hyperlith>.
- 31 D T Attwood. Soft X-Ray and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

栏目编辑: 韩 峰