

# 膜系引入偏振像差对投影光刻物镜设计的 影响与改进

尚红波 刘春来 张巍 陈华男

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

**摘要** 为了实现高成像要求,投影光刻物镜在设计时需要考虑膜层偏振效应的影响,并进行相应的分析和评价。首先介绍了基于琼斯矩阵的偏振像差理论,然后以一个数值孔径(NA)为0.75的投影光刻物镜为例,设计了相应膜系,系统分析了膜层引入的偏振像差,并在设计时对膜层引入的离焦项和球差项进行了间隔优化补偿,补偿前后标量波像差和质心畸变分别从68.92 nm和3.76 nm改善为1.08 nm和0.38 nm,偶极照明模式下90 nm密集线条对比度从0.082提高为0.876,在此基础上,提出在设计时根据不同表面的入射角分布情况,采用组合膜系,同时控制P光和S光的振幅和相位分离,减小膜系引入的延迟和二次衰减等偏振像差,使得线条对比度提高了1.1%。

**关键词** 光学制造;投影光刻物镜;膜系;偏振像差;对比度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0122003

## Effects and Improvements of Coating Induced Polarization Aberration on Lithography Lens Design

Shang Hongbo Liu Chunlai Zhang Wei Chen Hua'nan

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** In order to achieve high imaging requirement of projection lithography lens, the impact of polarization effects induced by coatings need to be considered and analyzed during the design process. Polarization aberration theory based on the Jones matrix is first described, then the polarization aberration of a numerical aperture (NA) of 0.75 projection lithography lens with corresponding coating is analyzed as an example. The large power and spherical aberrations induced by the coating are compensated with space and focus optimization. The scalar aberration and point spread function distortion are improved from 68.92 nm and 3.76 nm to 1.08 nm and 0.38 nm, respectively. The contrast of 90 nm dense line also increases from 0.082 to 0.876. Based on this, a method to reduce polarization aberration introduced by coating is represented, such as retardation and diattenuation. Combined films are used to control the magnitude and phase separation of the P and S component simultaneously. With this method, the contrast of the 90nm dense line is improved by 1.1%.

**Key words** optical fabrication; lithography lens; coating; polarization aberration; contrast

OCIS codes 220.3740; 310.1210; 260.5430

### 1 引言

投影光刻物镜对成像质量有着非常高的要求,随着物镜数值孔径(NA)的增大,不仅需要关注通常的标量波像差,还需要对系统的偏振像差进行分析和控制,而膜系对入射光偏振态的改变是引起偏振像差的一个重要原因。Chipman对偏振像差理论做了大量的工作<sup>[1-2]</sup>。他对膜系引入的偏振像差也进行过比较详细的

收稿日期: 2014-05-26; 收到修改稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 尚红波(1986—),男,硕士,助理研究员,主要从事极紫外光学系统设计方面的研究。

E-mail: silverbirchs@gmail.com

分析,并提出 NA 比较大,镜片数比较多,几何像差很小的光学系统容易受到膜系引入偏振像差的影响<sup>[3]</sup>。同时他也提出了一种通过合理优化膜系来设计低偏振像差显微物镜的方法<sup>[4]</sup>。D Doering 等<sup>[5]</sup>从点扩散函数和斯特列尔比等角度对不同膜系设计方案引入的偏振像差进行了对比分析。国内 Yanghui Li 等<sup>[6]</sup>也对光刻物镜中膜系引入的偏振像差进行了研究。在偏振像差补偿方面,涂远莹等<sup>[7-9]</sup>开展了比较深入的研究。

光刻物镜中偏振像差的分析和评价方法,主要有琼斯光瞳,泡利光瞳和穆勒光瞳三种方式, Gregory R. McIntyre 等<sup>[10]</sup>对这三种光瞳做了详尽的对比分析。目前投影光刻物镜的主要制造商 Nikon<sup>[11]</sup>和 Zeiss<sup>[12]</sup>公司均是在琼斯光瞳的基础上进行进一步的矩阵分解,以更好地理解光刻物镜的偏振像差并进行相应的光刻分析和仿真。本文首先介绍了基于琼斯光瞳的偏振像差理论,然后以一个深紫外(DUV)、NA 为 0.75 的投影光刻物镜为例,利用商业软件 CODE V 和自行编写的程序,分析了膜系对投影光刻物镜设计的影响,并提出了一种采用组合膜系降低偏振像差的方法。

## 2 偏振像差理论

光波的偏振态可以用互相垂直的两个偏振矢量描述,通常用琼斯矢量来表示

$$\mathbf{E}'(x,y) = \begin{bmatrix} E_x \exp(i\Delta_x) \\ E_y \exp(i\Delta_y) \end{bmatrix} = E_x \begin{Bmatrix} \exp(i\Delta_x) \\ \eta \exp[i(\Delta_x + \Gamma)] \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $\Delta_x$  和  $\Delta_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向偏正光的振幅和位相,  $\Gamma = \Delta_y - \Delta_x$ ,  $\eta = E_x/E_y$  为两个振动方向的相位差和振幅比。

对于具有  $Q$  个光学表面的光学系统,光线在透镜界面间的传播可通过几何光线追迹实现,界面间介质对光的偏振态的影响可以表示为如下矩阵形式

$$\mathbf{J}_{q,q-1} = \exp\left(\frac{2\pi i n_{q,q-1} l_{q,q-1}}{\lambda}\right) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中  $n_{q,q-1}$ ,  $l_{q,q-1}$  分别为前后两个界面间的折射率和光线传播距离。

而界面处的膜层对电场的影响可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{J}_q = \frac{1}{2} \exp(i\Delta) \times \begin{Bmatrix} T_p \exp(-i\frac{\delta}{2}) + T_s \exp(i\frac{\delta}{2}) + [T_p \exp(-i\frac{\delta}{2}) - T_s \exp(i\frac{\delta}{2})] \cos 2\varphi & [T_p \exp(-i\frac{\delta}{2}) - T_s \exp(i\frac{\delta}{2})] \sin 2\varphi \\ [T_p \exp(-i\frac{\delta}{2}) - T_s \exp(i\frac{\delta}{2})] \sin 2\varphi & T_p \exp(-i\frac{\delta}{2}) + T_s \exp(i\frac{\delta}{2}) - [T_p \exp(-i\frac{\delta}{2}) - T_s \exp(i\frac{\delta}{2})] \cos 2\varphi \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $\varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ) 是极坐标下的方位角,  $T_s$ 、 $T_p$  表示 P 光和 S 光的透射率,  $\Delta = (\Delta_s + \Delta_p)/2$ ,  $\delta = (\Delta_s - \Delta_p)$  分别为 P 光和 S 光的平均相位和相位差。

根据(2)式和(3)式,  $\mathbf{E}(x,y)$  经过光学系统后在出瞳处的电场矢量可以表示为<sup>[14]</sup>

$$\mathbf{E}'(x,y) = \left[ \prod_{q=Q-1}^1 \mathbf{J}_q \mathbf{J}_{q,q-1} \right] \mathbf{E}(x,y) = E_x \begin{Bmatrix} \exp(i\Delta_x) \\ \eta' \exp[i(\Delta_x + \Gamma)] \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

令

$$\mathbf{J}_p = \prod_{q=Q-1}^1 \mathbf{J}_q \mathbf{J}_{q,q-1} = \begin{bmatrix} J_{p_{xx}} & J_{p_{xy}} \\ J_{p_{yx}} & J_{p_{yy}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

即所谓的琼斯光瞳,是一个  $2 \times 2$  的矩阵,每个元素有实部和虚部两个分量,总共对应 8 个光瞳函数。在忽略去偏效应后,琼斯光瞳能够完备地描述光学系统的偏振像差情况,但是其对应的物理意义不直观,因此为了更好地理解分析偏振效应对投影光刻物镜的影响, Bernd Geh 等<sup>[15]</sup>对琼斯矩阵进行了物理分解,在忽略了光刻物镜中很小的圆二次衰减后,琼斯光瞳可以近似表示为如下形式

$$\mathbf{J}_p = t \exp(i\phi) J_{pol}(d, \theta) J_{rot}(\alpha) J_{ret}(\varphi, \beta). \quad (6)$$

根据(5)式,琼斯光瞳可以由 5 个具有明确物理意义的光瞳函数进行描述,即光瞳切趾、标量波像差、二次衰减、旋转、延迟,分别对应(5)式中的  $t$ ,  $\phi$ ,  $J_{pol}(d, \theta)$ ,  $J_{rot}(\alpha)$  和  $J_{ret}(\varphi, \beta)$ , 其中  $d$  和  $\theta$  为二次衰减的幅值和方向

参数,  $\alpha$  为旋转的方向参数,  $\varphi$  和  $\beta$  为延迟的幅值和方向参数。

### 3 实例分析

为了说明膜层引入的偏振像差对投影光刻物镜设计的影响,基于一个 NA 为 0.75 的投影光刻物镜<sup>[16]</sup>进行了分析评价,其中心波长为 193.368 nm,像方视场为 26 mm×10.5 mm,倍率为 0.25,如图 1 所示,在不考虑偏振效应时其波像差和质心畸变(PSF)分别为 0.55 nm 和 0.32 nm,系统像差得到了很好的矫正。

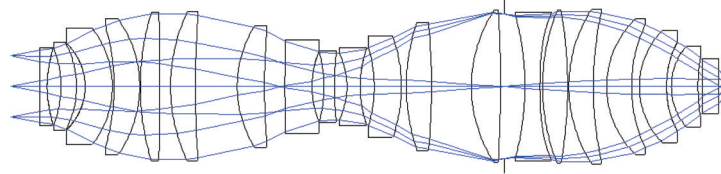


图1 投影光刻物镜系统

Fig.1 Projection lithography lens system

下面将分析膜系引入偏振像差对光刻物镜的影响,材料透射率假设为 100%,在计算光刻线条对比度时光源假设为 Y 向线偏振光,采用偶极照明方式,内外相干因子分别为 0.6 和 0.9。另外需要说明的是,对于光刻线条需要从多方面评价,还包括线条均匀性,水平和竖直线条偏差等,为了分析简便,仅从对比度方面进行说明,其他方面的研究将随着工作的深入进一步开展。

#### 3.1 膜系引入偏振像差的影响

在考虑实际膜系的影响前,为方便对比分析,假设透镜表面镀有“理想膜系”,即膜系透射率为 100%,P 光和 S 光的相位,振幅分离均为 0,此时界面的琼斯矩阵为

$$J_q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

计算得到(6)式中的 5 个光瞳函数和 90 nm 密集线条图像如图 2 所示,在计算时采用了 21 个视场点,如无

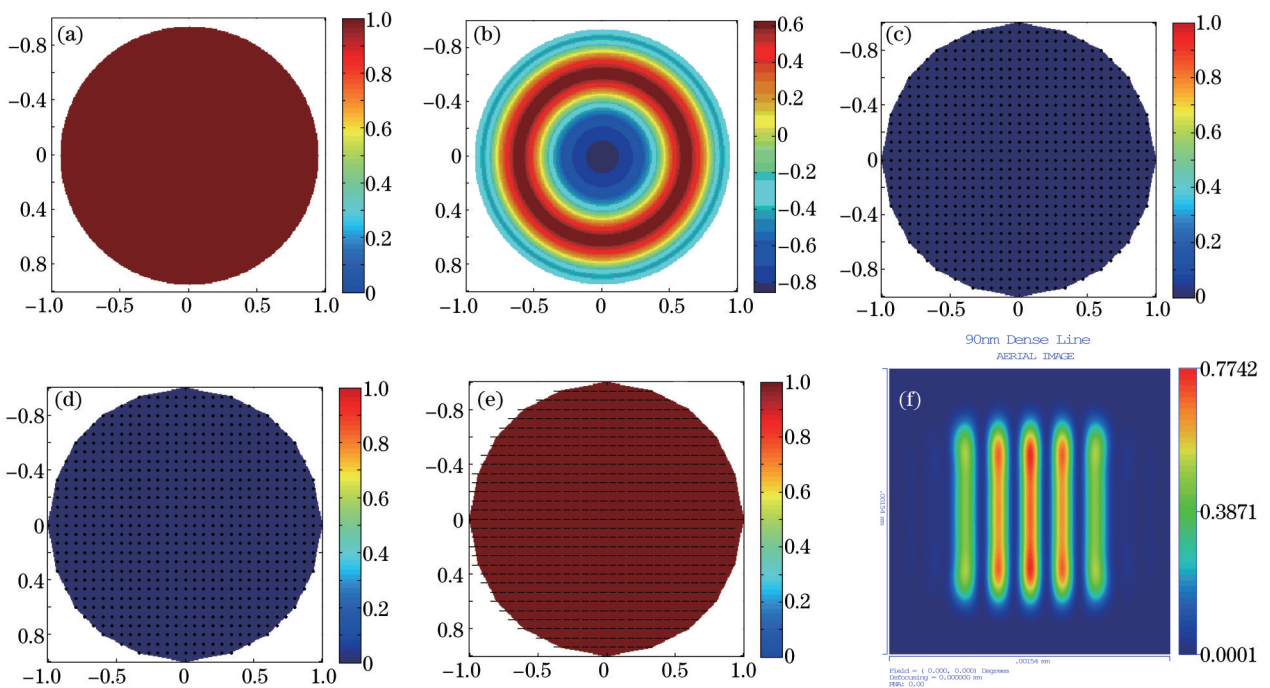


图2 理想膜系的光瞳函数和 90 nm 线条对比度。(a) 切趾分布;(b)标量波像差分布;(c)延迟分布;(d)二次衰减分布;(e)旋转分布;(f) 90 nm 密集线条

Fig.2 Pupil map and 90 nm dense line with ideal coatings. (a) Apodization map; (b) scalar wavefront map; (c) retardation map; (d) diattenuation map; (e) rotation map; (f) 90 nm dense line

特殊说明,图示仅给出中心视场的光瞳分布,表格中波像差、畸变、延迟、二次衰减、旋转和对比度为全视场最差值,下同。

此时光刻物镜的偏振像差及光刻线条对比度数值如表1所示(RMS为均方根)。和预期一样,理想膜系没有引入偏振像差。

表1 理想膜系的系统指标

Table 1 System specifications with ideal coating

Specification	Value
Wavefront error /(RMS, nm)	0.55
PSF distortion /nm	0.32
Apodization uniformity	1
Retardation /(RMS, nm)	0
Diattenuation (RMS)	0
Rotation /(RMS, °)	0
Transmission	1
90 nm dense line contrast	0.890

下面分析实际膜系的影响。通常在进行膜系设计时,需要参考镜片表面的最大入射角进行优化,以获得系统最大的透射率。图1中光刻物镜各表面的最大入射角分布如图3所示。

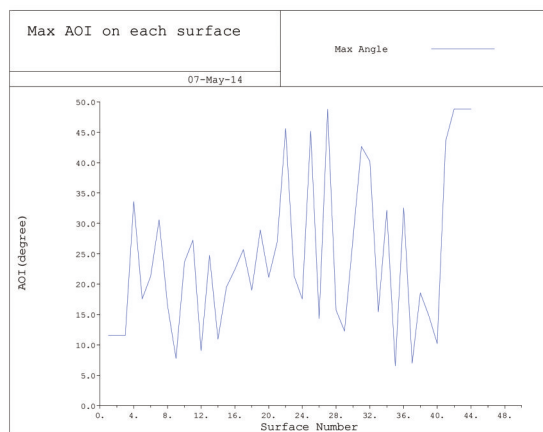


图3 光学系统各面最大入射角

Fig.3 Maximum incident angle on each surface of optical system

其中表面25的最大入射角为49.1°,为系统最大值,据此设计了一组减反膜系(为5层膜,高低折射率材料分别为LaF<sub>3</sub>和MgF<sub>2</sub>,下同),称为膜系一,其对P光和S光的偏振特性如图4所示。

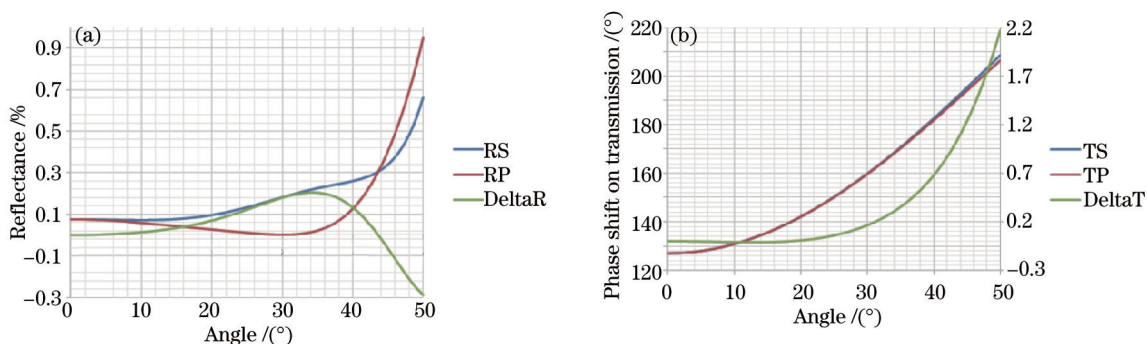


图4 膜系一的反射和相位特性

Fig.4 Reflectivity and phase property of coating one

在光学系统中加载该膜系,各光瞳函数和线条对比度如图5所示,由图5(b)可见膜系引入了较大的标量离焦和球差,光刻物镜的最佳焦面位置发生了较大变化,导致无法进行线条曝光。

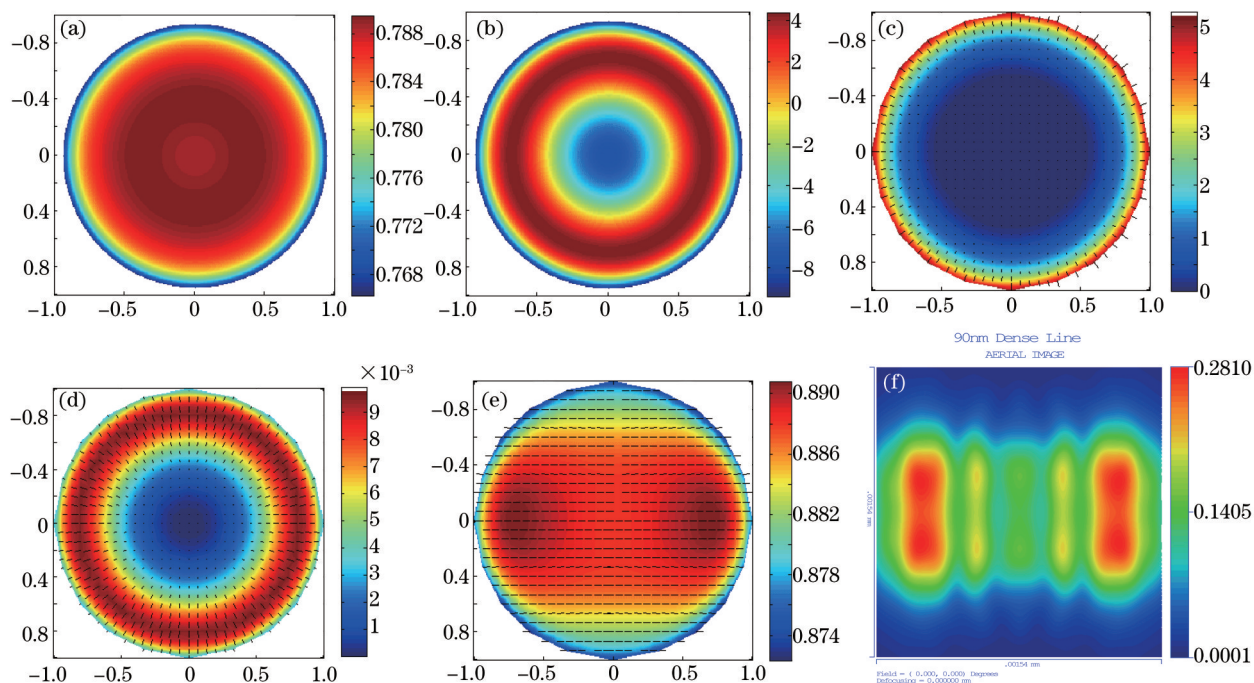


图5 优化前膜系一对应的瞳函数和90 nm线条对比度。(a)切趾分布;(b)标量波像差分布;(c)延迟分布;(d)二次衰减分布;(e)旋转分布;(f)90 nm密集线条

Fig.5 Pupil map and 90 nm dense line with coating one before optimization. (a) Apodization map; (b) scalar wavefront map; (c) retardation map; (d) diattenuation map; (e) rotation map; (f) 90 nm dense line

因此光刻物镜在设计时需要考虑膜系的影响,重新优化间隔和最佳焦面位置。经过间隔调整后系统的光瞳函数和线条对比度如图6所示,此时最佳焦面改变了770 nm。调整前后的计算结果列于表2中。从表2

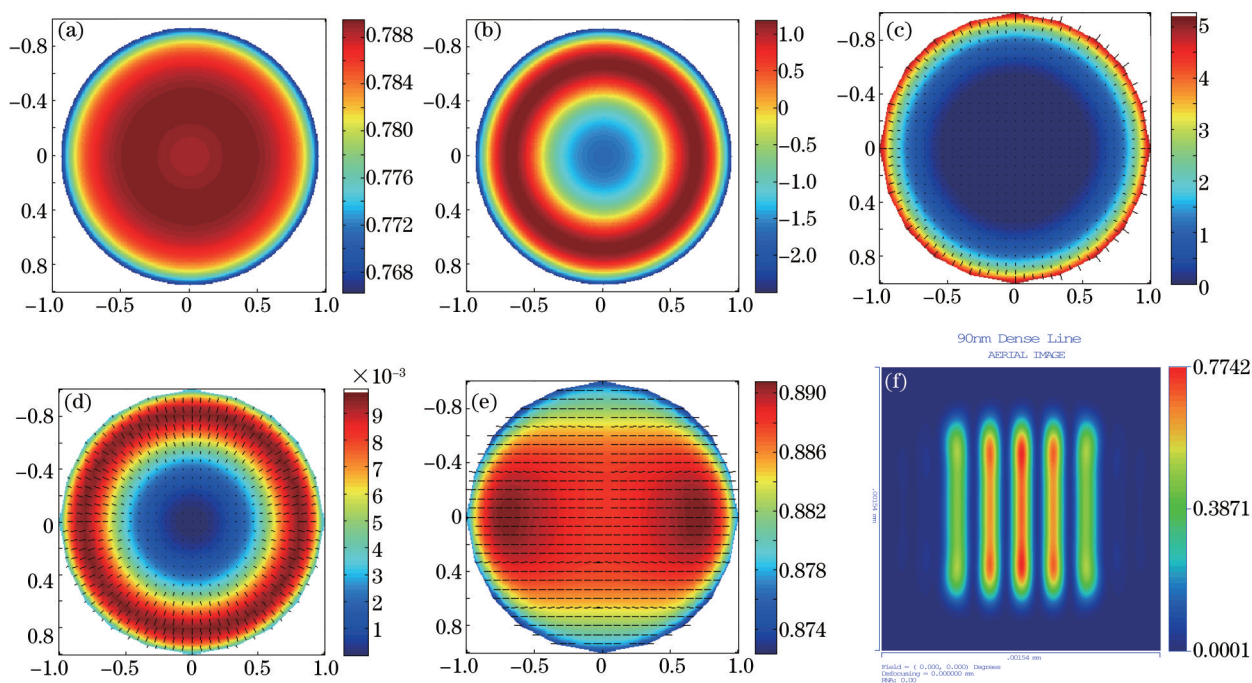


图6 优化后膜系一对应的瞳函数和90 nm线条对比度。(a)切趾分布;(b)标量波像差分布;(c)延迟分布;(d)二次衰减分布;(e)旋转分布;(f)90 nm密集线条

Fig.6 Pupil map and 90 nm dense line with coating one after optimization. (a) Apodization map; (b) scalar wavefront map; (c) retardation map; (d) diattenuation map; (e) rotation map; (f) 90 nm dense line



用于最大入射角小于 30° 的表面,平衡膜系二引起的二次衰减。同时,与延迟的情况类似,膜系二和膜系三在 50° 和 30° 时的平均反射率也比膜系一低,因此切趾均匀性也会有所改善。

三种膜系对 P 光和 S 光的平均偏振分离情况如表 3 所示

表 3 三种膜系的平均偏振分离

Table 3 Average polarization separation of each coating

	0°~50° delta phase / (°)	0°~30° delta phase / (°)	0°~50° delta reflectivity / %	0°~30° delta reflectivity / %
Coating one	0.366	0.028	0.096	0.056
Coating two	0.278	0.023	0.102	0.058
Coating three	NA	0.038	NA	0.017

采用膜系二和膜系三的组合对系统进行分析,光瞳函数和线条对比度如图 9 所示。

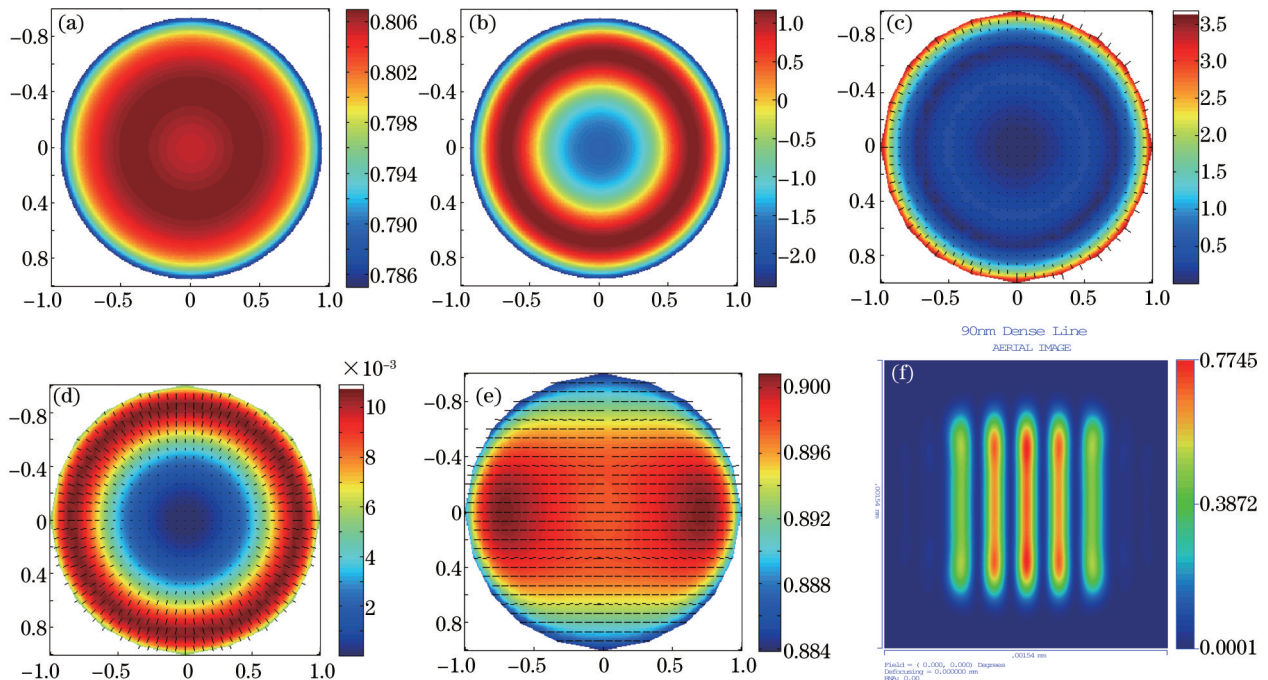


图 9 组合膜系对应的光瞳函数和 90 nm 线条对比度。(a) 切趾分布;(b)标量波像差分布;(c) 延迟分布;(d) 二次衰减分布;(e) 旋转分布;(d) 90 nm 密集线条

Fig.9 Pupil map and 90 nm dense line with combined coatings after optimization. (a) Apodization map; (b) scalar wavefront map; (c) retardation map; (d) diattenuation map; (e) rotation map; (d) 90 nm dense line

为方便比较,现将采用理想膜系、膜系一、膜系二和组合膜系时的系统指标同时列于表 4 中,可见采用组合膜系时,相比单独采用膜系一和膜系二时系统的切趾均匀性,延迟和二次衰减等偏振像差都能得到比较好的控制,线条对比度相对于膜系一提高了 1.1%,已经非常接近采用理想膜系时的对比度值。

表 4 不同膜系对应的系统指标

Table 4 System specifications with different coatings

Specification	Ideal coating	Coating one	Coating two	Combined coating
Wavefront error / (RMS, nm)	0.55	1.08	1.08	1.06
PSF distortion / nm	0.32	0.38	0.38	0.38
Apodization uniformity	1	0.982	0.983	0.984
Retardation / (RMS, nm)	0	1.55	1.08	1.2
Diattenuation (RMS)	0	0.0034	0.0039	0.0035
Rotation / (RMS, °)	0	0.182	0.199	0.172
Transmission	1	0.786	0.781	0.803
90 nm dense line contrast	0.890	0.876	0.877	0.886

从分析也可以看出,对于NA0.75投影光刻物镜来说,由于各表面的入射角并不大,膜系引入的偏振像差及对光学系统的影响较小,这也是NA0.75投影光刻物镜不需要特别关注偏振像差的原因。但是对于更高NA的投影光刻物镜,例如NA为1.35的浸没式投影光刻物镜,透镜表面的最大入射角可以达到 $70^\circ$ ,这时膜系造成的偏振像差的影响将会非常明显,需要严格的分析和控制<sup>[17]</sup>。

## 4 结 论

首先介绍了基于琼斯矩阵的偏振像差理论,然后以一个NA0.75物镜为例,计算了膜系引入的偏振像差,分析结果表明投影光刻物镜在设计时需要考虑膜系的影响,并对膜系引入的波像差进行补偿,最后提出了一种提高对比度的方法,即根据表面入射角分布,采用组合膜系的方法,合理控制膜层对P光和S光造成的偏振分离,减少膜系引入的偏振像差,从而提高投影光刻物镜的成像对比度。对于更高NA的投影光刻物镜,随着镜片表面入射角度的增大,膜系引入的偏振像差将更加显著,这对光学设计和膜系设计都提出了更高的要求,需要两者协同进行,才能够满足更小线宽的投影光刻需求。分析和提出的方法对高NA投影光刻物镜的设计及偏振像差的分析和控制具有一定的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 James P McGuire, Jr, Russell A Chipman. Polarization aberrations. 1. Rotationally symmetric optical systems [J]. Appl Opt, 1994, 33(22): 5081-5100.
- 2 James P McGuire, Jr, Russell A Chipman. Polarization aberrations. 2. Tilted and decentered optical systems [J]. Appl Opt, 1994, 33(22): 5101-5107.
- 3 Daniel J Reiley, Russell A Chipman. Coating-induced wavefront aberrations [C]. SPIE, 1992, 1746: 139-146.
- 4 Brian Daugherty, Russell Chipman. Low polarization microscope objectives [J]. SPIE, 2010, 7652: 7652S1.
- 5 D Doering, K Forcht. Coating-induced wave front aberrations [C]. SPIE, 2008, 7100: 7100E1.
- 6 Yanghui Li, Weidong Shen, Zhenrong Zheng, *et al.*. Reduction of coating induced polarization aberrations by controlling the polarization state variation [J]. J Opt, 2011, 13: 055701.
- 7 Tu Yuangying, Wang Xiangzhao. Polarization aberration compensation method for lithographic projection lens based on a linear model [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622002.  
涂远莹, 王向朝. 一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622002.
- 8 Lu Jinjun, Zhu Weibing, Sun Xueping. Effect of Jones matrix elements on the polarization aberrations in schmidt prism [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0208001.  
卢进军, 朱维兵, 孙雪平. 施密特棱镜 Jones 矩阵元对偏振像差的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0208001.
- 9 Lu Jinjun, Yang Kai, Sun Xueping, *et al.*. Effect of polarization aberration on the image quality of schmidt prism [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1108001.  
卢进军, 杨 凯, 孙雪平, 等. Schmidt 棱镜偏振像差对成像质量的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 1108001.
- 10 Gregory R McIntyre, Jongwook Kye, Harry Levinson. Polarization aberrations in hyper-numericalaperture projection printing: a comparison of various representations [C]. SPIE, 2006, 5(3): 033001.
- 11 Toru Fujii, Yuji Kudoa, Yasuhiro Ohmuraa. Polarization properties of state-of-art lithography optics represented by first canonical coordinate of Lie group [C]. SPIE, 2007, 6520: 65204W.
- 12 M Totzeck, P Gräupner, T Heil, *et al.*. How to describe polarization influence on imaging [C]. SPIE, 2005, 5754: 23-37.
- 13 Michael Shribak, Shinya Inoue, Rudolf Oldenbourg. Polarization aberrations caused by differential transmission and phase shift in highnumerical-aperture lenses: theory, measurement, and rectification [J]. Opt Eng, 2002, 41(5): 943-954.
- 14 Alan E Rosenbluth, Gregg Gallatin, Kafai Lai, *et al.*. Topics in polarization ray tracing for image projectors [C]. SPIE, 2005, 5857: 587503.
- 15 Bernd Geh, Johannes Ruoff, Jörg Zimmermann. The impact of projection lens polarization properties on lithographic process at hyper-NA [C]. SPIE, 2007, 6520: 65200F.
- 16 Yasuhiro Omura. Projection exposure methods and apparatus, and projection optical systems: US patent application 6,864,961B2 [P]. (2005-03).
- 17 Toru Fujii, Jun Kogo, Kosuke Suzuki, *et al.*. Polarization characteristics of state-of-art lithography optics reconstructed from on-body measurement [C]. SPIE, 2008, 6924: 69240Z.

栏目编辑: 韩 峰