

# 实际高数值孔径光刻系统的偏振分析

罗红妹 岑兆丰 李晓彤 张鲁薇 张跃骞

(浙江大学光电信息工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 在光学系统偏振传输理论的基础上,对一高数值孔径(NA)的透射式光刻系统进行了偏振分析,分析中考虑了系统的实际特性——现有工艺水平可制备的增透膜、薄膜和基底材料的吸收作用以及偏振照明,以增加分析结果的可靠性。通过计算系统各光学界面的透射率、反射率、吸收率及二次衰减值等偏振参数,得到镀膜、吸收作用以及不同偏振照明对系统传输性能和成像性能的影响。结果表明镀膜能有效提高该光刻系统的性能及稳定性,并将不同偏振照明对该系统性能的影响减小至可忽略的水平;同时,显著的基底吸收作用是该系统能量损失的主因,但吸收引入的偏振作用相对总体而言较小。

**关键词** 光学设计;投影光刻;偏振分析;高数值孔径;实际系统;增透膜

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1122002

## Polarization Analysis of a Real High Numerical Aperture Optical Lithography

Luo Hongmei Cen Zhaofeng Li Xiaotong Zhang Luwei Zhang Yueqian

(Department of Photoelectric Information Engineering, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Based on the polarization transmission theory in optical system, the polarization analysis of a real high numerical aperture (NA) refractive optical lithography system is made, where the anti-reflection coating within current technology, the absorption in coating and base, and polarized illumination are taken into account to obtain a higher-reliability result. Several polarization parameters at every optical interface are calculated, such as transmission, reflection, absorptance and diattenuation, to achieve the effects of anti-reflection coating, absorption of the materials and polarized illumination on transmission performance and imaging performance. The results reveal that the anti-reflection coating can dramatically enhance the performance and stability of this sample system, while reducing the effects of varied polarized illumination to a negligible degree. Besides, the dramatic absorption in the base material plays a main role in the intensity loss, and the absorption has a small contribution to overall polarization effects.

**Key words** optical design; projection lithography; polarization analysis; high numerical aperture; real system; anti-reflection coating

**OCIS codes** 220.3740; 260.5430; 110.2960

## 1 引言

为满足半导体制造业生产更微小尺寸产品的需求,所用投影光刻物镜的数值孔径(NA)和分辨率的行业最高值不断地被刷新,同时也增加了光的偏振特性对提高光刻系统性能的重要性。高NA光刻

系统因其高分辨率、大视场和极低的像面不平整度而越趋复杂化,系统的像差通常都被很好地校正,各视场基本达到衍射极限,此时,偏振作用成为系统的一级效应而不可忽略<sup>[1]</sup>。已有研究<sup>[2-4]</sup>指出,对于高NA(大于0.6)光刻系统,沿用常规的标量分析法

收稿日期: 2013-05-31; 收到修改稿日期: 2013-06-24

基金项目: 应用光学国家重点实验室开放基金(Y1Q03FQK09)

作者简介: 罗红妹(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计及分析方面的研究。E-mail: lhmhit@yeah.net

导师简介: 岑兆丰(1957—),男,教授,主要从事光学系统设计和分析、设计软件等方面的研究。

E-mail: cenzf@zju.edu.cn(通信联系人)

已不能满足实际精度要求,必须考虑更为严格精确的矢量分析法。在一个实际高 NA 光刻系统中,各部分如照明模块、掩膜、物镜元件、薄膜和光刻胶等都可能引入直接影响实际性能的偏振作用。因此,偏振分析时若能尽可能地将系统的实际特性考虑在内,那么分析结果将具有更高的可靠性,对设计和制造行业将具有更高的参考价值。

## 2 系统实际特性

在以往的工作中,文献[3]分析了不同偏振态的入射光对高数值孔径系统的成像质量的影响,文献[4]提出对部分偏振光一种新的描述光束能量和偏振态的方法并应用于对高数值孔径系统的偏振效应分析。这些工作中用于分析的光学系统都较为理想,前者分析的为无像差系统,即“理想系统”,而后者虽考虑了像差,但没有考虑镀膜、材料吸收等对系统性能有着重要影响的实际因素。因此,本文在上述工作的基础上,对高 NA 光刻系统进行深入分析时,除考虑系统像差之外,主要考虑的实际特性还包括:现有工艺条件能制备的较高性能的薄膜、薄膜和基底材料的吸收作用以及偏振照明。

### 2.1 增透膜

元件光学表面所镀薄膜的厚度相对于元件厚度和空气间隙而言很小,通常为系统所用波长量级,因此并不影响光路。但薄膜会改变透射/反射光的偏振态,即引入偏振作用,这种作用的强弱与入射光的波长、入射角和偏振度有关。本文分析对象为波段 193 nm 的透射式光刻系统。不同于可见光波段,在深紫外波段(193 nm),大部分材料的透射率都不够高,只有少数氟化物和氧化物具有较好的光学特性,可作为基底材料和膜层材料<sup>[5]</sup>。在现有的可用材料中,因具有折射率差适中、电子带隙较大、吸收较低<sup>[6]</sup>的特征,可选择 LaF<sub>3</sub>、MgF<sub>2</sub> 分别作为高低折射率膜层材料,用于制备 193 nm 增透膜。

此外,还出现了运用新技术制备的高性能增透膜。例如,根据 Nikon 公司官网<sup>[7]</sup>的介绍,Nikon 公司开发了一种纳米粒子薄膜,可应用于深紫外光刻镜头和一些照相镜头,构成薄膜的粒子尺寸在 1~10 nm 量级。就目前所知,193 nm 下常规材料的最低折射率为 1.38,而该纳米粒子薄膜通过控制其构成粒子的尺寸(1~10 nm)来减小低折射率膜层材料的折射率(1.18),从而有效提高大入射角时的增透性能。这种性能被称为角性能,目前该薄膜具有最好的角性能,特别适用于存在大入射角的折射系

统。此外,该薄膜对减小斜入射光引起的眩光和鬼像的作用也是常规增透膜无法比拟的。

本文分析所用的增透膜为 MgF<sub>2</sub>/LaF<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub> 三层结构的薄膜,各膜层的光学厚度为 1/4 波长,这种具有低损耗性能的增透膜已由尚淑珍等<sup>[8]</sup>用热舟蒸发法制备得到,并使用光谱测试仪进行测量,其测量结果与理论计算结果非常接近。由此说明,该增透膜是现有工艺条件下能制备的。

### 2.2 吸收作用

吸收作用指光通过材料时与材料中的原子(离子)、电子相互作用而引起的光能衰减现象,光强通常随所通过材料厚度的增大而呈指数衰减。在实际系统中吸收是不可忽略的,特别是在一些复杂的光学系统中,光通过的材料总厚度往往较大,导致最终输出的光强较弱,同时可能因材料对 s 光和 p 光的吸收率不同而改变光的偏振态,即引入一些偏振作用。本文主要考虑了基底材料与薄膜材料的吸收作用。利用薄膜光学理论,可计算得到薄膜的透射率、反射率,剩余部分即认为是薄膜的吸收部分。基底材料的透射率则可用 Beer 定律计算:

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha l), \quad (1)$$

式中  $l$  为通过基底的物理长度; $\alpha$  为吸收系数,由材料的消光系数和光源的真空波长共同决定,计算公式为  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ 。这里作简化处理,认为基底的吸收  $A = 1 - T$ 。计算所需的基底和薄膜材料的光学常数(折射率  $n$  和消光系数  $k$ ),来自于对深紫外波段下的材料光学特性的研究<sup>[8-12]</sup>,大多是采用以下方法:制备特定薄膜→实验测量透射率/反射率曲线→计算  $n$  和  $k$ 。

### 2.3 偏振照明

随着 NA 的不断提高,偏振效应对系统性能的影响也越来越明显。非偏振光下,像的对比度因横磁(TM)偏振分量的弱干涉作用而降低,且随着到像面的入射角的增大而急剧下降<sup>[13]</sup>。与此同时,光的横电(TE)偏振分量不受上述入射角影响,始终形成高对比度的像(如图 1 所示)。研究证实<sup>[14-15]</sup>,使用 TE 偏振光照明是提升高 NA 光刻系统的成像质量的有效方法。

目前高 NA 光刻系统常用照明除使用 TE 偏振技术之外,大多还采用离轴照明(OAI)技术,主要有图 2 所示的偶极偏振照明和环形偏振照明,分别适用于模式单一和模式复杂的掩膜,相比于常规照明可有效提高系统的焦深、分辨率和对比度<sup>[16]</sup>。目前

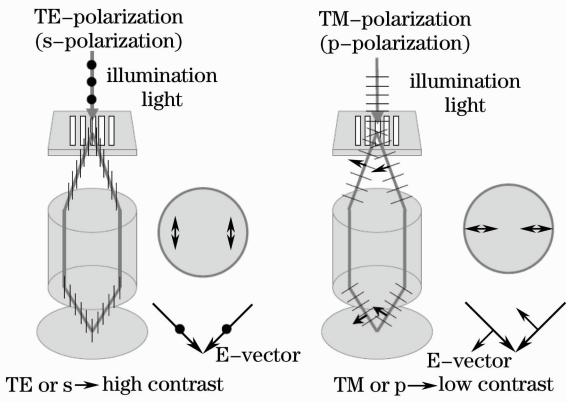


图1 高 NA 系统在 TE、TM 偏振光下的成像情况  
Fig. 1 Image formation in high NA system with TE and TM polarization

实现离轴照明的主流方式为衍射光学元件(DOE)<sup>[17]</sup>,相比于早期使用不同形状的光阑,可实现高效、均匀的照明。此外,还出现自由曲面取代衍射光学元件的新型方式<sup>[18]</sup>,具有较大的潜力。

### 3 偏振分析结果

在考虑上述实际特性后,利用软件对系统进行

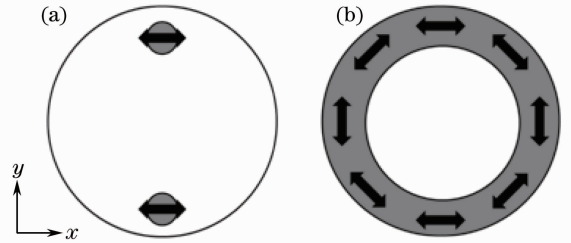


图2 光刻系统常用的偏振照明。(a)偶极线偏振;  
(b)环形偏振  
Fig. 2 Common polarized illumination in optical lithography.  
(a) Dipole linear polarization; (b) annular azimuthal polarization

偏振分析。本文所用实例为图3所示的 ArF 激光(193 nm)透射式投影光刻物镜,其主要特征参数及调制传递函数(MTF)曲线分别如表1和图4所示,可见该系统的像差已被很好地校正,各视场 MTF 曲线基本达到衍射极限。该系统是以文献[19]中一个 NA=0.75 的光刻物镜为初始结构,将所有透镜材料统一为熔石英后进行优化得到。该系统包含28个透镜元件,共56个光学界面。下文主要分析了增透膜、吸收作用及偏振照明三因素对系统传输性能和成像性能的影响。

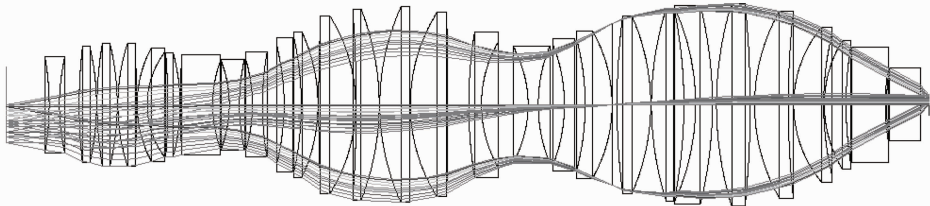


图3 投影光刻物镜结构图(NA=0.75)  
Fig. 3 Layout of the projection lithography lenses (NA=0.75)

表1 投影光刻物镜的主要特征参数

Parameter	Value
Central wavelength /nm	193
NA	0.75
Resolution /nm	140
Field of image /mm	28×28
Magnification	0.25
Wavefront aberration (RMS) /λ	0.0446

#### 3.1 偏振对传输性能的影响

##### 3.1.1 增透膜对传输性能的影响

未镀膜时,在各界面处使用菲涅耳公式计算偏振参数;镀膜后,利用薄膜光学理论进行计算。主要计算了透射率、反射率、吸收率及二次衰减值等偏振参数,其数值都与入射角密切相关。使用离轴照明,

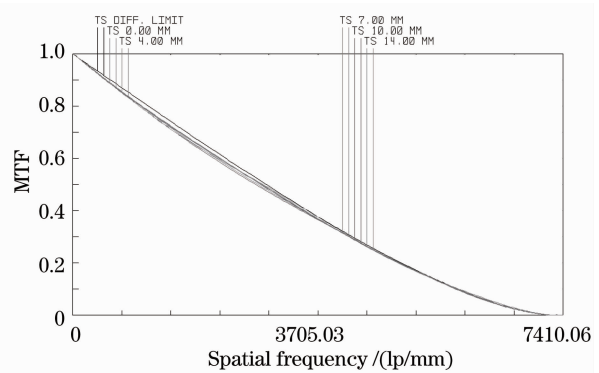


图4 投影光刻物镜的 MTF 曲线(NA=0.75)  
Fig. 4 MTF curves of the projection lithography lenses (NA=0.75)

通过光线追迹计算得到多数面的入射角小于 35°,只有少数几个面接近 50°。因此,各光学界面的偏

振参数在入射角为  $0^\circ \sim 50^\circ$  的范围内进行计算。

图 5(a) 为镀膜/未镀膜的光学界面处 s 光和 p 光的透射率随入射角变化的对比图。可以观察到未镀膜时 s 光和 p 光的透射率差异随入射角的增大而明显增大, 在  $50^\circ$  时达到最大差值 12.38% ( $T_p = 99.51\%$ ,  $T_s = 87.19\%$ ); 而镀膜后入射角大于  $32^\circ$  时才出现明显的差异, 最大差值降为 4.42% ( $T_p = 98.45\%$ ,  $T_s = 94.10\%$ )。同时, 通过计算得到未镀膜/镀膜时 s 光和 p 光在  $0^\circ \sim 50^\circ$  范围内平均透射率分别为 94.90% 和 98.86%。上述分析表明增透膜能显著提高该系统的透射率并减小 s 光和 p 光的透射率差异。

与此同时, 由图 5(b) 可知, 增透膜也不可避免地吸收了小部分的光, 且随着入射角的增大有所增加,

但比例相对较小, 仅  $4.0 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-3}$  量级。图 5(c) 则显示了另一个重要的偏振参量——二次衰减值  $D$  的变化, 对于透射式系统, 其计算公式为<sup>[20]</sup>

$$D = \left| \frac{T_s - T_p}{T_s + T_p} \right|, \quad (2)$$

式中  $T_s$ 、 $T_p$  分别表示 s 光和 p 光的透射率,  $D$  表征 s 光和 p 光经过单个光学界面后透射率的差异程度。从图 5(b) 可看出镀膜引入的吸收作用因对 s 光的吸收稍大于 p 光, 对增大  $D$  有十分微小的贡献。就总体而言, 镀膜后二次衰减值明显减小, 特别是入射角在  $0^\circ \sim 27^\circ$  时, 其值几乎为 0, 而系统中绝大多数光学界面处的入射角都在  $0^\circ \sim 27^\circ$  内。说明该系统所用的增透膜具有较好的性能, 可有效降低系统中产生的偏振效应。

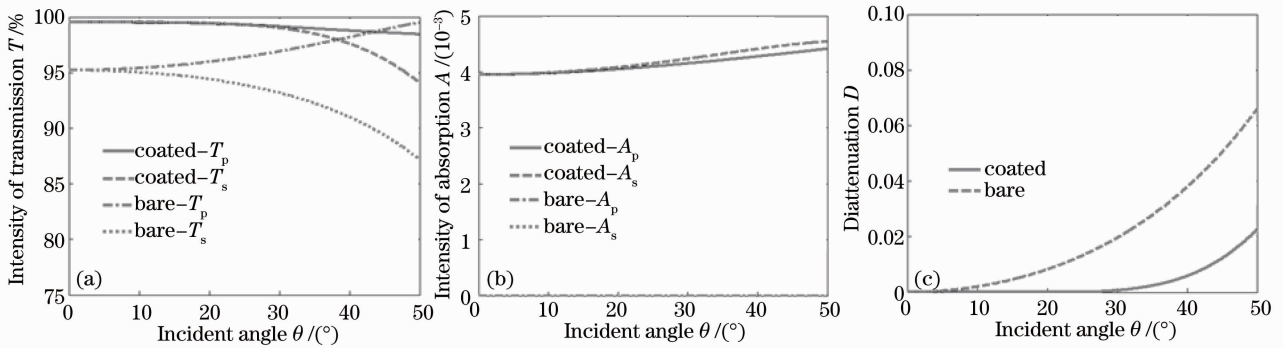


图 5 镀膜和未镀膜时单个光学界面上的偏振参数的对比图。(a) s 光和 p 光的透射率; (b) s 光和 p 光的吸收率; (c) 二次衰减值

Fig. 5 Comparisons of the polarization parameters at optical interface when coated and bare. (a) Transmittance of s- and p-polarization light; (b) absorbance of s- and p-polarization light; (c) diattenuation

### 3.1.2 三因素对传输性能的综合影响

结合增透膜、吸收作用和不同偏振照明三个因素分析对系统传输性能的影响。因所分析的系统为旋转对称系统, 用于对比的偏振照明使用图 6 中位

于  $y$  方向上的偶极照明。分别使用线偏振光、圆偏振光和一般椭圆偏振光作系统偏振照明, 比较不同照明条件下系统性能的变化。

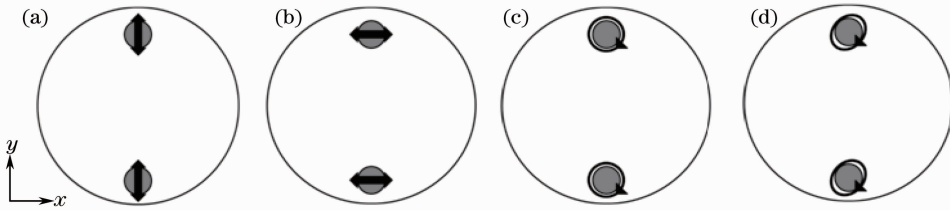


图 6 分析时所用的偏振照明。(a) 偶极,  $y$  偏振; (b) 偶极,  $x$  偏振; (c) 偶极, 圆偏振; (d) 偶极, 椭圆偏振  
Fig. 6 Polarized illumination for analysis. (a) Dipole,  $y$ -linear polarization; (b) dipole,  $x$ -linear polarization; (c) dipole, circular polarization; (d) dipole, elliptical polarization

表 2 列出了综合镀膜、基底吸收及不同偏振照明三个因素对传输参数的影响。其中,  $T_{AVG}$ 、 $A_{AVG}$  和  $R_{AVG}$  分别表示经过每个透镜元件的平均透射率、吸收率和反射率,  $I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_{cir}$ 、 $I_{elli}$  及  $I_{AVG}$  分别表示图 6

中 4 种偏振照明下的输出光强及其平均光强, 其值为相对强度。经计算, 当考虑镀膜和基底吸收的影响时, 透射率与文献[8]中所提到的单面镀 193 nm 增透膜的 3 mm 熔石英的实际测量透射率为

93.50%这一结果保持一致。表中数据表明：

1) 镀膜后确实引入了少部分的吸收,但透射率提高的比率更大,因此系统最终输出的光强获得十分明显的提高;

2) 通过对比表 2,可以发现,镀膜还可以减小该系统在不同偏振态照明下的透射率及输出光强之间的差异,即可提高该系统的性能稳定性。由最接近实际系统情况的第 4 组数据来看,该系统输出光强

受入射偏振态的影响非常小;

3) 考虑基底吸收后降低了每个透镜元件的平均透射率,进而导致最终输出光强降至不考虑基底吸收时的 22.85%。这说明系统中采用的基底材料吸收偏高仍是阻碍折射式光刻系统提高光能利用率的关键因素。对此,可以采用折反射结构或某些特殊结构,如 Schwarzschild 结构<sup>[21]</sup>。

表 2 镀膜、基底吸收及不同偏振照明对传输参数的影响

Table 2 Effects of coating, base absorption and different polarized illuminations on transmission parameters

Parameters	bare, no base absorption	bare, base absorption	coated, no base absorption	coated, base absorption
$T_{AVG}/\%$	90.7842	86.1189	98.8687	93.7914
$R_{AVG}/\%$	9.2158	9.2158	0.3507	0.3507
$A_{AVG}/\%$	0	4.6653	0.7806	5.8579
$I_x$	0.04933	0.01089	0.7226	0.1650
$I_y$	0.08455	0.01958	0.7318	0.1674
$I_{cir}$	0.06630	0.01523	0.7272	0.1662
$I_{elli}$	0.06672	0.01511	0.7273	0.1661
$I_{AVG}$	0.06672	0.01523	0.7272	0.1662

### 3.2 偏振对成像性能的影响

在高 NA 系统中,由于矢量效应,形成的像随着入射光偏振态和不同级数衍射光角度的变化而不同,这很可能与使用标量法得到的结果差异甚大。通过偏振分析,可以获知系统各部分产生的偏振效应及对成像性能的影响等信息,可为后续的偏振补偿作参考。本文主要分析了偏振对几个重要的成像性能参数包括光斑形状、MTF 和分辨率的影响。

#### 3.2.1 光斑形状的变化

通过观察点扩展函数(PSF)子午方向(即  $y$  方向)和弧矢方向(即  $x$  方向)轮廓图的变化,分析不同偏振照明对光斑形状的影响。图 7 为系统未镀膜时,轴外 PSF 在  $x$  和  $y$  方向上的轮廓图在不同入射偏振态下的变化。图中可以清楚地观察到使用偏振

照明前后 PSF 轮廓的改变,其中尤以线偏振光下的变化程度最大。图 8 为在  $x$  线偏振照明下,轴上和轴外的 PSF,与使用非偏振光时相比,PSF 均在  $x$  方向变窄,同时在  $y$  方向变宽(其中非偏振光下轴上 PSF 在  $x$  和  $y$  方向是重合的,图中未画出),这与文献[3]中理论计算结果一致。图 9 为系统镀膜后,在不同偏振照明下轴外 PSF 在  $x$  和  $y$  方向上的轮廓,由图 9 可知轮廓基本重合,甚至要局部放大 50 倍后才能看到曲线间的细微差别,以  $x$  和  $y$  方向上 PSF 峰值的一半为例,不同偏振态间最大的间距为  $2.7 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ,且该间距在越靠近峰值点时越小。说明镀膜减小了不同偏振照明对该系统的 PSF 的影响,提高了系统成像性能的稳定性的。

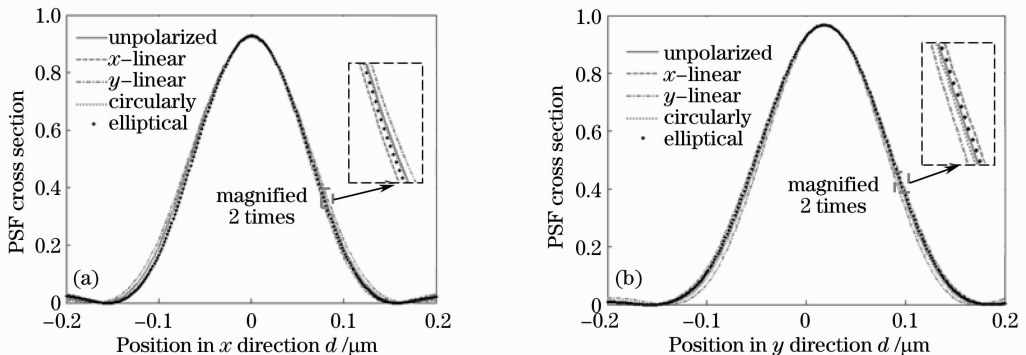


图 7 不同偏振态照明下轴外 PSF 在(a)  $x$  方向和(b)  $y$  方向上的轮廓(未镀膜)

Fig. 7 Off-axis PSF cross section in (a)  $x$  and (b)  $y$  directions with varied polarized illumination (bare)

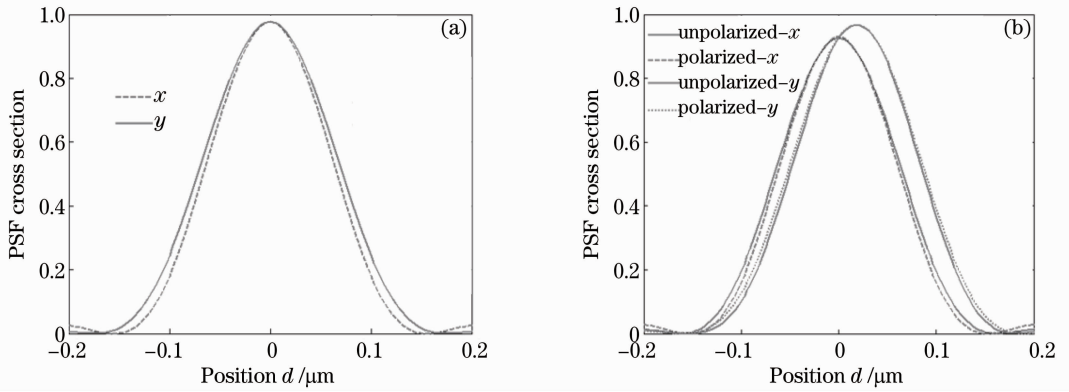


图 8  $x$  线偏振照明下(a)轴上和(b)轴外 PSF 在  $x$  和  $y$  方向的轮廓(未镀膜)

Fig. 8 (a) On-axis and (b) off-axis PSF cross section in  $x$  and  $y$  directions with  $x$ -linear polarized illumination (bare)

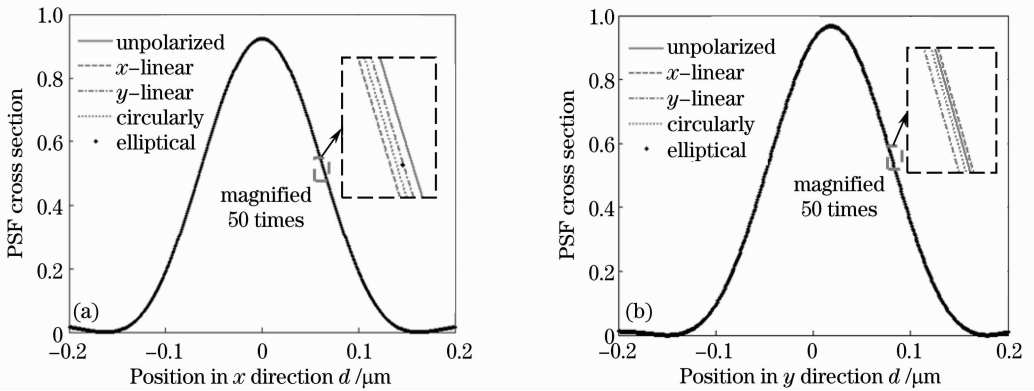


图 9 不同偏振态照明下的轴外 PSF 在(a)  $x$  和(b)  $y$  方向上的轮廓(镀膜)

Fig. 9 Off-axis PSF cross section in (a)  $x$  and (b)  $y$  directions with varied polarized illuminations (coated)

### 3. 2. 2 调制传递函数及分辨率的变化

MTF 是个十分重要的成像性能参数,对于光刻系统,一般可取曲线下降到 0.4 时的空间频率值(或称线对数)来计算系统的分辨率<sup>[21]</sup>,该线对数越大,则对应的分辨率越小,即分辨率越高。分析结果(如图 10 所示)表明:在轴外非偏振照明下,系统的 MTF 曲线表现出旋转对称的特征,即  $y$  视场在子午、弧矢方向的曲线分别与  $x$  视场在弧矢、子午方向的曲线重合;在轴外圆偏振照明下,仍能保持基本相同的对称特征;但在一般轴外椭圆偏振和轴外线偏振照明下,MTF 曲线出现失对称现象,上述 4 条曲线都分离开,下面将重点讨论。

以 MTF 为 0.4 作为分析参考值在图中作辅助线。系统未镀膜时:图 10(c)为  $x$  线偏振照明下的 MTF 曲线,弧矢(即  $x$ )方向参考点对应的线对数变大,即  $x$  方向分辨率提高,同理  $y$  方向分辨率降低;图 10(b)为一般椭圆偏振照明(非圆偏振或线偏振)下的 MTF 曲线,表现为长轴方向分辨率提高,短轴

方向分辨率降低,且分辨率变化程度总小于线偏振照明下的情况(参考两图中竖直辅助线的间距)。图 10(d)为镀膜后在  $x$  线偏振照明下的 MTF 曲线,其  $x$ 、 $y$  视场的曲线仍不完全对称,但在实际中可认为基本与图 10(a)相同,其他偏振照明下的 MTF 也基本如此。

结合 3. 2. 1 节的分析,可知对于本文所分析的 NA 为 0.75 的光刻系统而言,光源偏振态对上述三个系统成像性能参数的影响都因镀膜的作用而降至非常小的程度。但这并不表示光刻系统在实际使用时不需要偏振照明,尤其是当 NA 进一步提高时,镀膜并不能有效地降低偏振照明对性能的影响。Köhler 等<sup>[14]</sup>研究指出,NA 大于 0.9 时,需要使用偏振照明提高成像质量。这一结论在实际光刻产品中有所体现,例如,ASML 公司的 TWINSCAN XT-1450H 型光刻机为 NA 为 0.93 的 193 nm 系统,在使用 AERIAL-P 偏振照明选项时,分辨率可从 65 nm 提高至 57 nm。

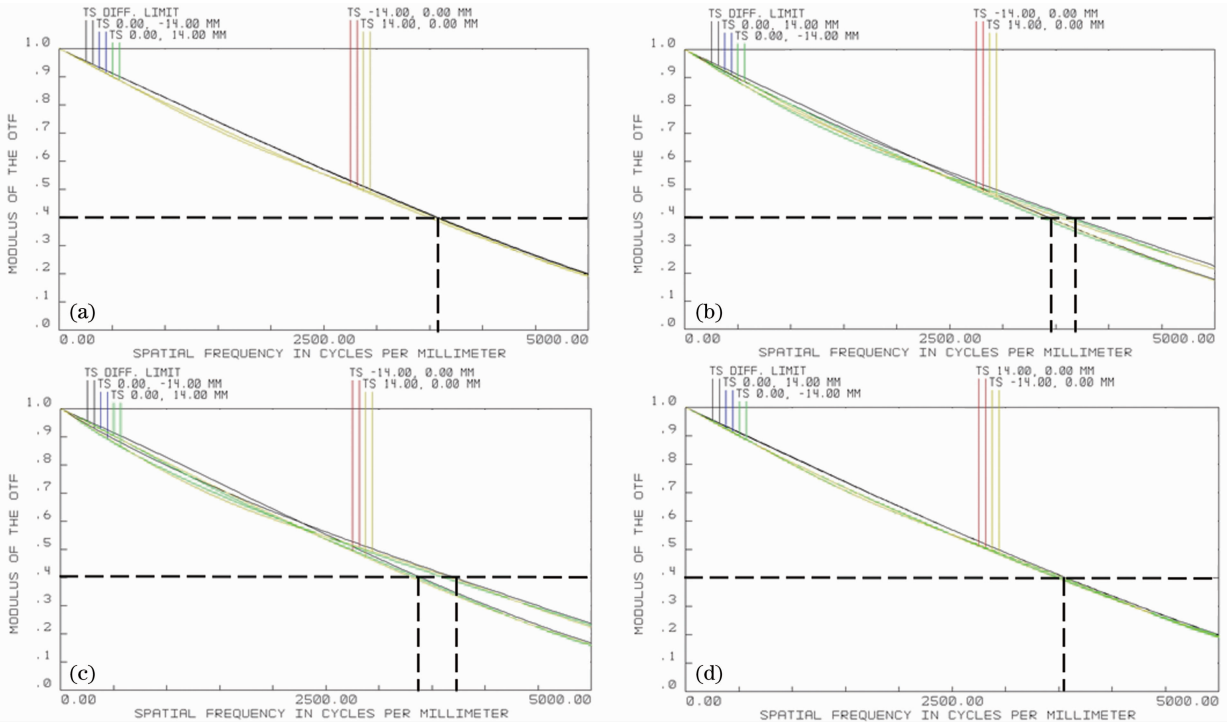


图 10 不同轴外偏振照明下 MTF 曲线。(a)非偏振照明和圆偏振照明;(b)椭圆偏振照明,未镀膜;  
(c)  $x$  线偏振照明,未镀膜;(d)  $x$  线偏振照明,镀膜

Fig. 10 Off-axis MTF curves with varied polarized illuminations. (a) Unpolarized and circular illumination; (b) elliptical polarized illumination, bare; (c)  $x$ -linear polarized illumination, bare; (d)  $x$ -linear polarized illumination, coated

## 4 结 论

深紫外高 NA 光刻系统中各部分产生的偏振作用不可忽略,传统的标量分析法不再适用。利用矢量分析法,对 NA 为 0.75 实际透射式光刻系统进行了偏振分析,分析中考虑了系统的实际特性:增透膜、材料吸收作用及偏振照明,通过计算偏振参数和具体的仿真分析,讨论了实际系统中存在的偏振作用对传输性能和成像性能的影响。随着光刻系统 NA 的不断提高,系统中的偏振作用对系统性能的重要性也将越来越大,因此在进行此类光学系统的设计和 analysis 时,必须采用更严格准确的矢量分析法,其分析结果对于系统的设计优化、偏振补偿设计、实际加工装调过程都具有非常重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 R A Chipman. Polarization analysis of optical systems [C]. SPIE, 1989, 28(2): 90-99.
- 2 D G Flagello, A E Rosenbluth, C Proglar, *et al.*. Understanding high numerical aperture optical lithography [J]. Microelectronic Engineering, 1992, 17(1): 105-108.
- 3 Pang Wubin, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, *et al.*. The effects of polarization light on optical imaging system [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 234202.
- 庞武斌, 岑兆丰, 李晓彤, 等. 偏振对光学系统成像质量的影响

- [J]. 物理学报, 2012, 61(23): 234202.
- 4 Liu Chao, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, *et al.*. Ray ellipse method of analyzing the power and polarization state of partially polarized light [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 134201.
- 刘超, 岑兆丰, 李晓彤, 等. 关于部分偏振光能量传递和偏振态的光线椭圆分析方法[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 134201.
- 5 J Ullmann, M Mertin, H Lauth, *et al.*. Coated optics for DUV-excimer laser applications [C]. SPIE, 2000, 3902: 514-527.
- 6 S Günster, D Ristau, S Bosch. Spectrophotometric determination of absorption in the DUV/VUV spectral range for MgF<sub>2</sub> and LaF<sub>3</sub> thin films [C]. SPIE, 2000, 4099: 299-310.
- 7 Nano Particle Coating [OL]. 2008. [http://www.nikon.com/about/technology/rd/core/material/nano\\_particle/](http://www.nikon.com/about/technology/rd/core/material/nano_particle/).
- 8 Shang Shuzhen, Shao Jianda, Fan Zhengxiu. Low-loss 193 nm anti-reflection coatings [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1946-1950.
- 尚淑珍, 邵建达, 范正修. 低损耗 193 nm 增透膜[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1946-1950.
- 9 M C Liu, C C Lee, M Kaneko, *et al.*. Microstructure-related properties at 193 nm of MgF<sub>2</sub> and GdF<sub>3</sub> films deposited by a resistive-heating boat [J]. Appl Opt, 2006, 45(7): 1368-1374.
- 10 D Ristau, S Günster, S Bosch, *et al.*. Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF<sub>2</sub> and LaF<sub>3</sub> coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation [J]. Appl Opt, 2002, 41(16): 3196-3204.
- 11 Xue Chunrong, Yi Kui, Qi Hongji, *et al.*. Optical constants of fluoride films in the DUV range [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 5035-5040.
- 薛春荣, 易葵, 齐红基, 等. 氟化物材料在深紫外波段的光学常数[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 5035-5040.
- 12 Chang Yanhe, Jin Chunshui, Li Chun, *et al.*. Optical characterization and structure properties of ultraviolet LaF<sub>3</sub> thin

- films by thermal evaporation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1007002.
- 常艳贺, 金春水, 李 春, 等. 热蒸发紫外 LaF<sub>3</sub> 薄膜光学性能和结构表征 [J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1007002.
- 13 S Owa, H Nagasaka, Y Ishii, *et al.*. Update on 193 nm immersion exposure tool [C]. Litho Forum, International SEMATECH, Los Angeles, 2004: 1–51.
- 14 C Köhler, W de Boeij, K van Ingen-Schenau, *et al.*. Imaging enhancements by polarized illumination: theory and experimental verification [C]. SPIE, 2005, 5754: 734–750.
- 15 M Totzeck, P Gräupner, T Heil, *et al.*. Polarization influence on imaging [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2005, 4(3): 031108.
- 16 C Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography: the Science of Microfabrication [M]. West Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd, 2008, 429–434.
- 17 Zhang Wei, Gong Yan. Vector analysis of diffractive optical elements for off-axis illumination of projection lithographic system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005002.
- 张 巍, 巩 岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件的矢量分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005002.
- 18 Xing Shasha, Wu Rengmao, Li Haifeng, *et al.*. Freeform surface design of off-axis illumination in projection lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 032202.
- 邢莎莎, 吴仍茂, 李海峰, 等. 应用于投影光刻离轴照明的自由曲面设计[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 032202.
- 19 Y Omura. Projection Exposure Method and Apparatus and Projection Optical System [P]. European Patent: 1139138, 1999.
- 20 Zemax Development Corporation. Zemax Optical Design Program User's Guide [M]. Michigan: Focus Software Inc, 2010, 592.
- 21 Hu Dawei, Li Yanqiu, Liu Xiaolin. Optical design of hyper numerical-aperture schwarzschild projection lithographic lens [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122004.
- 胡大伟, 李艳秋, 刘晓林. 超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122004.

栏目编辑: 张 腾