

超大数值孔径光刻中掩模保护膜优化及偏振像差研究

周 远^{1,3} 李艳秋² 刘光灿^{1,3}

¹长沙学院电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003

²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(筹), 北京 100081

³长沙学院光电信息技术创新团队, 湖南 长沙 410003

摘要 超大数值孔径(NA)光刻成像中,掩模保护膜上的入射光线入射角范围增大,用传统方法优化掩模保护膜难以增大斜入射光的透射率。基于薄膜光学原理提出一种新的掩模保护膜优化方法,确保光线在整个入射角范围内的平均透射率最大。利用琼斯矩阵方法探讨膜层的透射属性和相位特征,得到相应的琼斯光瞳来分析膜层带来的偏振像差。结果表明,对比传统的掩模保护膜优化方法,新方法能有效提高斜入射光线的透射率,减小膜层引起的偏振像差。新的掩模保护膜优化方法能为超大 NA 光刻成像的掩模保护膜设置提供必要的理论基础和技术支撑。

关键词 成像系统;偏振像差;超大数值孔径光刻;掩模保护膜;琼斯矩阵方法;薄膜光学

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0407001

Study on Pellicle Optimization and Polarization Aberration Induced by Pellicle in Hyper Numerical Aperture Lithography

Zhou Yuan^{1,3} Li Yanqiu² Liu Guangcan^{1,3}

¹Department of Electronic and Communication Engineering, Changsha University,
Changsha, Hunan 410003, China

²State Key Laboratory of Opto-Electro Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of
Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China

³Optoelectronic Information Technology Innovative Research Team, Changsha University,
Changsha, Hunan 410003, China

Abstract In hyper numerical aperture (NA) lithography imaging, the incident angle of imaging rays on pellicle varies in a wide range, so it is difficult to enhance the transmittance of oblique incidence employing the conventional pellicle optimization methods. A novel pellicle optimization method is developed based on the film optics theory, which maximizes the average transmittance within the whole incident angles range. The transmission properties and phase characteristics of pellicle are studied using Johns matrix representation. The corresponding Johns pupil is obtained to analyze the polarization aberration induced by pellicle. The results show that, compared with the conventional pellicle optimization methods, the novel method enhances the transmittance of oblique incidence and decreases the pellicle-induced polarization aberration more effectively. The novel method provides the essential theoretical basis and technical support for pellicle setting in hyper NA lithography imaging.

Key words imaging systems; polarization aberration; hyper numerical aperture lithography; pellicle; Johns matrix representation; film optics

OCIS codes 260.0260; 310.0310; 160.0160; 100.0100; 110.3960

收稿日期: 2010-08-26; 收到修改稿日期: 2011-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003)、长沙学院引进人才科研启动基金(SF080102)和长沙学院光电信息技术创新团队科研基金(10700-99008)资助课题。

作者简介: 周 远(1976—),男,博士研究生,讲师,主要从事先进光刻方面的研究。E-mail: zhoyuan304@163.com

导师简介: 李艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事光学和微纳技术方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

光刻成像的分辨率很大程度制约了集成电路的集成度^[1~5]。目前,采用超大数值孔径(NA)光刻是继续提高光刻成像分辨率的有效手段^[6]。超大 NA 光刻正面临一系列挑战,而像差问题便是其中有待研究的课题之一^[7]。在以前的低数值孔径光刻成像中,一般用标量像差来衡量光刻成像系统的性能^[8]。对于超大 NA 光刻,光的矢量性变得重要,标量像差不足以描述光刻成像系统的性能,需要深入研究光刻成像系统各部分所引起的偏振像差^[9]。光刻成像中的偏振像差可能来源于器件材料的双折射、界面反射、透射等因素^[10, 11]。而掩模保护膜作为光刻曝光中的必要元件,也将影响光的透射率、相位及偏振状态,产生偏振像差,最终对光刻成像性能带来一定的影响。

掩模保护膜是指在掩模表面用铝框支起一层有机薄膜,目的是防止环境灰尘或者微粒粘落在掩模的图形面上而影响光刻性能^[12]。为了尽量增大膜层的透射率,该层薄膜一般采用无吸收材料。传统方法是将薄膜厚度设置为半波长的整数倍。目前使用最多的掩模保护膜采用折射系数为 1.4 的聚合体材料,对于 ArF 光源(波长为 193.368 nm),用传统方法对厚度优化的典型结果值约为 828 nm^[12]。

传统方法设置膜层厚度可以最大程度地增大垂直入射光的透射率。在系统 NA 不太高的情况下,入射到薄膜上光的入射角较小,传统方法可以有效减小掩模保护膜引起的偏振像差,减小其对成像性能的影响。但对于高分辨率光刻,需要采用 NA 成像系统,入射到薄膜上光入射角分布范围变大,斜入射光进入光瞳参与成像。按传统方法设置的薄膜厚度难以保证斜光线也具有大的透射率,掩模保护膜对成像性能的影响不可忽略。有必要针对超大 NA 光刻探讨掩模保护膜带来的偏振像差,并寻求有效方案增大膜层透射率,减小偏振像差,减弱膜层对光刻性能的影响。

本文提出一种新方法优化设置掩模保护膜厚度。根据系统 NA 和物镜倍缩率确定射入膜层光入射角的分布范围。再由薄膜反射和折射理论,结合膜层折射系数和厚度设置,求出膜层透射率随入射角变化的关系。由此在入射角范围内求透射率的积分,最终求出平均透射率。变化不同的膜层厚度值,得出平均透射率最大时对应的膜层厚度,即为优化的膜层厚度。然后针对优化的膜层厚度,得到光在入射角范围内膜层的透射率及带来的相位变化,并

根据琼斯理论得到膜层对应的琼斯光瞳来分析膜层所带来的偏振像差,并与传统方法优化膜层厚度后的相应结果对比,得到新方法相对传统方法的优点。

2 优化设置掩模保护膜厚度的新方法

2.1 确定膜层上入射光入射角范围

系统 NA(d_{NA})确定了射入硅晶片光线入射角的上限值 θ_{w_max}

$$\theta_{w_max} = \arcsin\left(\frac{d_{NA}}{n_t}\right), \quad (1)$$

式中 n_t 为浸没液体的折射系数。另外,根据阿贝正弦定律,可以由物镜的倍缩率 M 得到物方数值孔径 $d_{NA\ obj}$ 及入射到掩模保护膜上光入射角上限值 θ_{m_max}

$$\theta_{m_max} = \arcsin(d_{NA\ obj}) = \arcsin(Md_{NA}). \quad (2)$$

掩模保护膜上光线的入射角的具体分布决定于照明方式设置、光源相干因子 σ 设置以及掩模衍射,其分布必定在范围 $0 \sim \theta_{m_max}$ 之内。由于在同一曝光场内成像图形的空间周期可能不统一(导致掩模衍射角出现多值),再加上实际光刻系统大多采用部分相干照明,将导致掩模保护膜上光线的入射角在范围 $0 \sim \theta_{m_max}$ 内连续分布。需要说明的是,实际光刻系统中,光经过掩模衍射后,射入掩模保护膜的角度有可能大于入射角的上限 θ_{m_max} 。但入射角度超出 θ_{m_max} 的光线无法进入光瞳参加成像,成像光在掩模保护膜上的入射角仍在 $0 \sim \theta_{m_max}$ 的范围内。

2.2 确定膜层透射率随入射角变化的关系

光经掩模衍射后,以一定角度 θ 射入掩模保护膜,发生反射和透射(如图 1 所示),其透射率将依赖于入射角度 θ 以及光的偏振状态。由于膜层离掩模及物镜距离较大,在计算膜层透射率时可忽略膜层与掩模或物镜之间的多次反射,即可认为膜层上下空间是半无穷的。另外,由于膜层上下是真空(或空气),计算中可设定其折射系数为 1。计算中规定光从掩模到物镜的传播方向为正向(用上标“+”号表

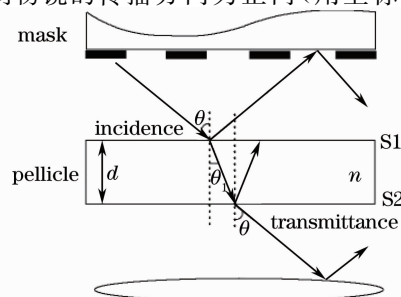


图 1 光通过掩模保护膜的光路图
Fig. 1 Ray path when light passes through pellicle

示,在图 1 中为向下方向),与此相反的方向则为反向(用上标“-”号表示,在图 1 中为向上方向)。

分析光在膜层上表面(S1)的界面反射和透射规律。令 S1 面上空间的正向和反向光矢量振幅为 \mathbf{E}_{S1T}^+ 和 \mathbf{E}_{S1T}^- , S1 面下空间的正向和反向光矢量振幅为 \mathbf{E}_{S1B}^+ 和 \mathbf{E}_{S1B}^- , 则根据界面反射和透射规律可得它们的相互关系为^[13]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S1T}^+ \\ \mathbf{E}_{S1T}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{S1}} \begin{bmatrix} 1 & r_{S1} \\ r_{S1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S1B}^+ \\ \mathbf{E}_{S1B}^- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 t_{S1} 和 r_{S1} 为光在 S1 面上的透射系数和反射系数。

光从 S1 面通过膜层射到膜层下表面(S2)的过

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S2T}^+ \\ \mathbf{E}_{S2T}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{S2}} \begin{bmatrix} 1 & r_{S2} \\ r_{S2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S2B}^+ \\ \mathbf{E}_{S2B}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{S2}} \begin{bmatrix} 1 & r_{S2} \\ r_{S2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S2B}^+ \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 t_{S2} 和 r_{S2} 为光在 S2 面上的透射系数和反射系数。由于计算中认为膜层上下空间是半无穷的,则 $\mathbf{E}_{S2B}^- = 0$ 。

联立(3),(4)和(5)式,可得方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S1T}^+ \\ \mathbf{E}_{S1T}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{S1} t_{S2}} \begin{bmatrix} \exp(-i\delta) + r_{S1} r_{S2} \exp(i\delta) & r_{S1} \exp(i\delta) + r_{S2} \exp(-i\delta) \\ r_{S1} \exp(-i\delta) + r_{S2} \exp(i\delta) & \exp(i\delta) + r_{S1} r_{S2} \exp(-i\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S2B}^+ \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

则整个掩模保护膜的透射系数 t 为

$$t = \frac{\mathbf{E}_{S2B}^+}{\mathbf{E}_{S1T}^+} = \frac{t_{S1} t_{S2}}{\exp(-i\delta) + r_{S1} r_{S2} \exp(i\delta)}, \quad (7)$$

式中 t 是一个复数,其模表示膜层对光振幅的衰减,其复角代表膜层对光相位的延迟。由 t 可得膜层的透射率 T 为

$$T = |t|^2 = \left| \frac{\mathbf{E}_{S2B}^+}{\mathbf{E}_{S1T}^+} \right|^2 = \left| \frac{t_{S1} t_{S2}}{\exp(-i\delta) + r_{S1} r_{S2} \exp(i\delta)} \right|^2, \quad (8)$$

式中界面反射系数和透射系数 $t_{S1}, t_{S2}, r_{S1}, r_{S2}$ 以及相位延迟 δ 依赖于入射角 θ 以及入射光的偏振状态。若 TE 偏振光和 TM 偏振光对应的透射率为 T_{TE} 和 T_{TM} , 则非偏振光对应的透射率 T_{unpol} 是两者平均

$$T_{unpol} = \frac{T_{TE} + T_{TM}}{2}. \quad (9)$$

2.3 优化掩模保护膜的厚度

针对某偏振态的光,在 $0 \sim \theta_{m_max}$ 入射角范围内,求掩模保护膜透射率的均值 \bar{T}

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{\theta_{m_max}} T(\theta) d\theta}{\theta_{m_max}}. \quad (10)$$

在膜层折射系数一定的情况下,透射率均值 \bar{T} 与膜层厚度 d 一一对应。图 2 展示了 $d_{NA} = 1.35, 4$ 倍缩率的系统,针对非偏振光(ArF 光源),假设膜层

程属于在同一介质中的自由传播, $\mathbf{E}_{S1B}^+, \mathbf{E}_{S1B}^-$ 与 S2 上空间的正向和反向光矢量振幅 \mathbf{E}_{S2T}^+ 和 \mathbf{E}_{S2T}^- 的相互关系可用传播矩阵方程来表示^[13]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S1B}^+ \\ \mathbf{E}_{S1B}^- \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S2T}^+ \\ \mathbf{E}_{S2T}^- \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix}$, $\delta = K_z^+ d$, \mathbf{P} 为膜层传播矩阵, δ 为光在膜层中的相位延迟。 K_z^+ 为膜层中正向光波矢量的法向分量, d 为膜层厚度。

同样,在 S2 上, $\mathbf{E}_{S2T}^+, \mathbf{E}_{S2T}^-$ 与 S2 面下空间的正向和反向光矢量振幅 \mathbf{E}_{S2B}^+ 和 \mathbf{E}_{S2B}^- 的相互关系为

折射系数为 1.4 的情况下膜层透射率均值 \bar{T} 随膜层厚度 d 的变化关系。

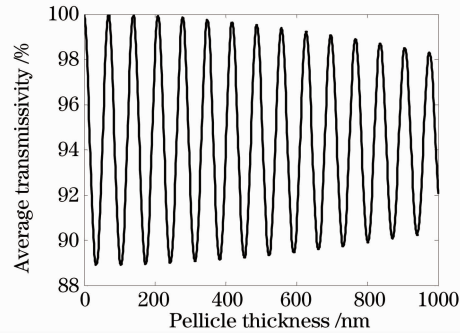


图 2 掩模保护膜透射率均值与膜层厚度的对应关系

Fig. 2 Average transmission variation of pellicle with thickness for unpolarized light

可以看出, \bar{T} 随 d 是波动变化的。表 1 列出了几个波峰处所对应的膜层厚度及膜层透射率。膜层越厚 (d 越大), 能获得的最大透射率均值越小。波峰处所对应的膜层厚度值就是用该方法得到的优化值。

表 1 各波峰处对应的膜层厚度及膜层透射率

Table 1 Thickness and transmission of film corresponding to the peaks

Number of the peak	3	5	7	9	12
d / nm	209	349	488	627	836
\bar{T}	0.9991	0.9975	0.9953	0.9923	0.9870

3 掩模保护膜引起的偏振像差

偏振像差是指光的振幅、相位、偏振和延迟在光学系统各部分光路中的变化^[14]。这里依据光学光刻成像中偏振像差的处理方法^[11],用标量透射率和二次衰减来描述掩模保护膜的透射属性,用标量相位和延迟来描述掩模保护膜的相位特征。

对于不同偏振状态的光,掩模保护膜的透射属性和相位特征存在差异。这种差异可描述为

$$\begin{pmatrix} E_{TM}^{out} \\ E_{TE}^{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{TM} \exp(i\varphi_{TM}) & 0 \\ 0 & A_{TE} \exp(i\varphi_{TE}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{TM}^{in} \\ E_{TE}^{in} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

式中 E_{TM}^{out} 和 E_{TE}^{out} 为出射光的 TM 和 TE 分量, E_{TM}^{in} 和 E_{TE}^{in} 为入射光的 TM 和 TE 分量, A_{TM} , A_{TE} , φ_{TM} 和 φ_{TE} 表示由膜层引起的相应偏振分量的振幅衰减和相位延迟,是(7)式中所求得的膜层透射系数 t 的模和复角。改写(11)式得

$$\begin{pmatrix} E_{TM}^{out} \\ E_{TE}^{out} \end{pmatrix} = \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} E_{TM}^{in} \\ E_{TE}^{in} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式中

$$\mathbf{D}_1 = \begin{pmatrix} A_{TM} & 0 \\ 0 & A_{TE} \end{pmatrix}, \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \exp(i\varphi_{TM}) & 0 \\ 0 & \exp(i\varphi_{TE}) \end{pmatrix},$$

\mathbf{D}_1 为对角矩阵,描述振幅变化。 \mathbf{R} 为幺模对角矩阵,描述相位变化。由文献[7]可得标量透射率 T , 二次衰减 D , 标量相位 Φ 以及延迟 φ 可以表示为^[11]

$$T = \frac{A_{TM}^2 + A_{TE}^2}{2}, D = \frac{A_{TM}^2 - A_{TE}^2}{A_{TM}^2 + A_{TE}^2},$$

$$\Phi = \frac{\varphi_{TM} + \varphi_{TE}}{2}, \varphi = \varphi_{TM} - \varphi_{TE}. \quad (13)$$

可得到掩模保护膜对应的琼斯矩阵 \mathbf{J}_p ^[11]

$$\mathbf{J}_p = (\mathbf{U}\mathbf{D}_1\mathbf{U}^+)(\mathbf{W}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{W}), \quad (14)$$

式中幺正矩阵 \mathbf{U} 和 \mathbf{W} 为旋转矩阵

$$\mathbf{U} = \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (15)$$

式中 α 为光瞳点矢径与光瞳坐标横轴的夹角。

利用新的优化方法和传统优化方法所得的厚度优化值设置膜层,比较两者所对应的偏振像差。用于比较的传统方法所得的优化厚度为 828 nm,新方法所得的优化厚度为 836,627,488,349 和 209 nm。针对系统的 NA 为 1.35,物镜倍缩率为 0.25,曝光波长为 193.368 nm。首先,对于每一个膜层厚度,根据(7)式算出 TE 偏振光和 TM 偏振光所对应的透射系数,得到各自的模和复角 A_{TM} , A_{TE} , φ_{TM} 和 φ_{TE} 。再根据(13)式可求得膜层的标量透射率 T ,二次衰减 D 、标量相位 Φ 以及延迟 φ 。最后,由(14)和(15)式给出两者对应的琼斯光瞳。

4 结果分析

图 3(a)展示了不同厚度优化值下膜层的标量透射率,可以看出,在传统方法所得的优化厚度下(828 nm),虽然对于垂直入射光(入射角为 0°),其透射率接近 1,但对斜入射光,膜层透射率减小得较快。对于边缘光线(对于 $d_{NA} = 1.35$,边缘光线的入射角接近 20°),膜层透射率下降超过 10%。但是,在新方法所得的优化厚度下,虽然不能保证垂直入射光的透射率最大,但对于入射角较大的光线,却能使膜层透射率有较明显的增加。且膜层越薄,斜入射光线所能达到的膜层透射率越大。在膜层厚度为 349 nm 的条件下,可保证在整个入射角范围内所有光线对应的膜层透射率都保持在 99% 以上。图 3(b)展示了不同厚度优化值下膜层引起的二次衰减。相对于传统方法,在新方法所得的优化厚度下,对于斜入射光线,膜层所引起的二次衰减较小。对于厚度 349 nm 的膜层,二次衰减小于 0.2%。

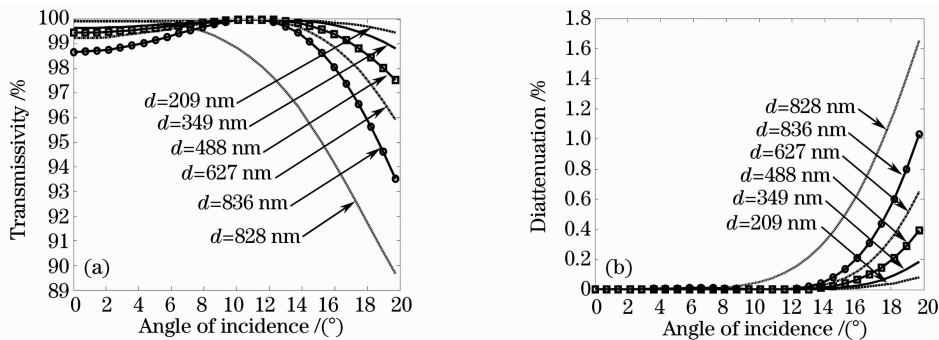


图 3 膜层引起的光透射率的变化。(a)标量变迹,(b)二次衰减

Fig. 3 Transmission loss induced by pellicle. (a) apodization, (b) diattenuation

图 4(a)和(b)展示了不同厚度优化值下膜层引起的标量相位和延迟。需要说明的是,为了表示膜层引起的相位变化,图中纵坐标所表示的是存在膜层时的相位延迟与不存在膜层时相位延迟之差。分析结果可知,相对于传统方法所得的优化厚度(828 nm),在新方法所得的优化厚度下,膜层引起

的标量相位和延迟相对较小,这对于斜入射光线表现得更加突出。同样,膜层越薄,所带来的标量相位和延迟越小。对于厚度为 349 nm 的膜层,膜层带来的标量相位小于 10° 。由图 4(b)也可看出,不管用什么方法来优化膜层,膜层所引起的延迟都较小(小于 1°)。

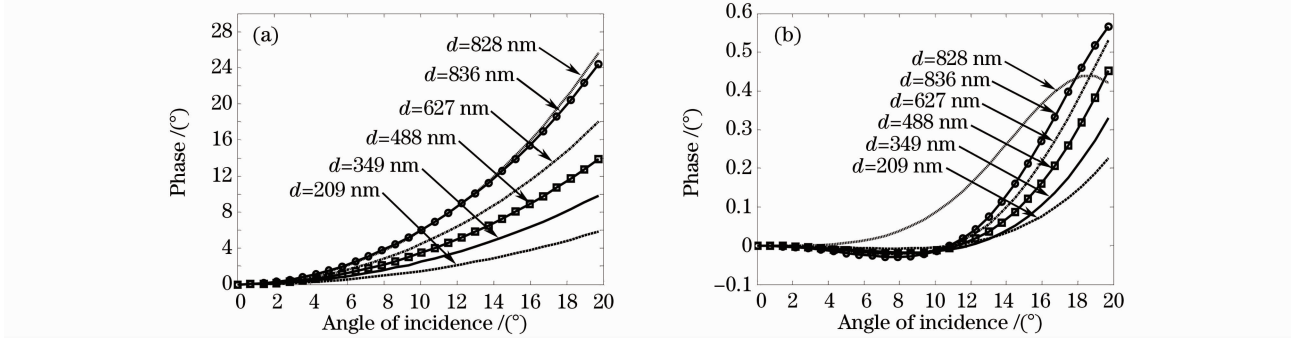


图 4 膜层引起的光相位的变化。(a)标量像差,(b)相对相位延迟

Fig. 4 Phase variation induced by pellicle. (a) aberration, (b)retardence

一般情况下,光刻成像系统的 NA 可在一定范围内变化。如 ASML 出产的 TWINSCAN NXT:1950i 型浸没式光刻设备实现 0.85~1.35 的 NA,为目前产业上能达到的最高 NA。由(2)式可知,系统采用的 NA 越大,掩模保护膜上光入射角上限值越大。由图 3,4 可以看出,新方法对偏振像差的改善效果越明显。另外,设定的膜层越薄,斜入射光的

偏振像差越小。但膜层制备和安装中,过薄的膜层容易弯曲变形。实际工艺中一方面应该平衡各种因素,选定实际中能实现的尽量小的优化值,另一方面也可研发适合的膜层材料和工艺,减小变形,增加薄膜层的实际可行性以尽可能地减小掩模保护膜带来的偏振像差。

图 5 为传统优化方法和新优化方法所得的膜

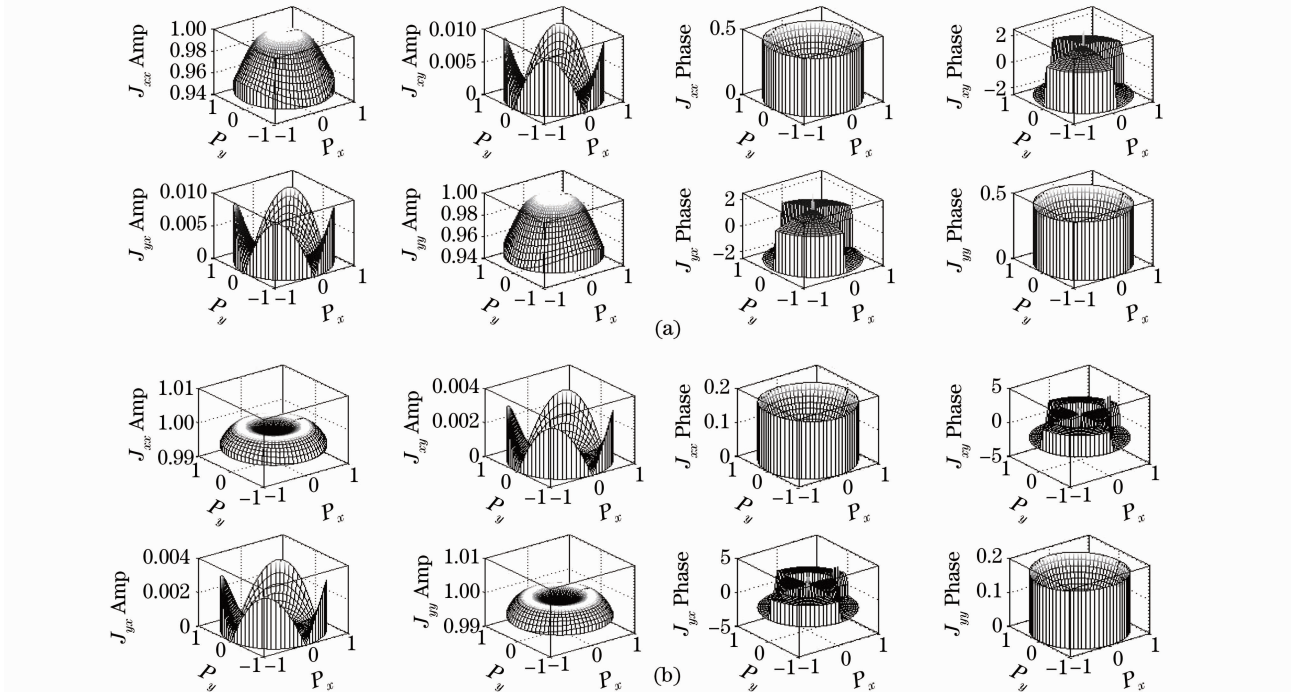


图 5 掩模保护膜所对应的琼斯光瞳。(a)传统优化方法($d=828$ nm),(b)新的优化方法($d=349$ nm)

Fig. 5 Johns pupil representation of pellicle. (a) conventional optimization method ($d=828$ nm), (b) new method ($d=349$ nm)

层厚度优化值对应的琼斯光瞳。可以明显看出,相对于传统方法所得的优化厚度($d=828\text{ nm}$),在新方法所得的优化厚度下($d=349\text{ nm}$),琼斯光瞳各矩阵元的模相对较大,复角相对较小。这一优点在斜入射光线情况下(对应靠近琼斯光瞳边缘坐标点)表现尤为突出。说明新方法能针对斜入射光线有效提高膜层透射率,减小膜层引起的偏振像差。

5 结 论

针对超大 NA 光刻成像,提出一种新的掩模保护膜优化方法。首先根据系统的 NA 及倍缩率确定膜层上入射光的入射角范围;然后由薄膜光学理论分析膜层透射率随入射角的变化关系;最后通过比较膜层透射率的均值得到掩模保护膜的厚度优化值。针对新方法和传统方法的优化结果,通过分析光在整个入射角范围内膜层的透射率及带来的相位变化,应用琼斯理论得到膜层对应的琼斯光瞳来分析掩模保护膜所带来的偏振像差。结果表明,新方法能针对斜入射光线有效提高膜层透射率,减小膜层引起的偏振像差。新的掩模保护膜优化方法能为超大 NA 光刻成像的掩模保护膜设置提供必要的理论基础和技术支撑。

参 考 文 献

- 1 Ronse, Kurt. Optical lithography—a historical perspective[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, **7**(8): 844~857
- 2 Liao Feihong, Li Xiaoping, Chen Xuedong *et al.*. Probe spot position error on the accuracy of focusing and leveling measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1041~1045
- 廖飞红, 李小平, 陈学东 等. 调焦调平探测光斑位置误差对测量
- 准确度影响的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1041~1045
- 3 Ma Bin, Li Lin, Chang Jun *et al.*. Refractive projection lens for 90 nm resolution lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 211~215
- 马 斌, 李 林, 常 军 等. 高分辨率折射式投影光刻物镜的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 211~215
- 4 Yang Xiong, Xing Tingwen. Design of extreme ultraviolet lithographic objectives[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2520~2523
- 杨 雄, 邢廷文. 极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2520~2523
- 5 Zhou Yuan, Li Yanqiu. Performance analysis of double-fluid-layer achromatic ArF immersion interference lithography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3007~3012
- 周 远, 李艳秋. 双液体层消色差氟氦浸没干涉光刻性能分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3007~3012
- 6 D. G. Flagello, B. Arnold. Optical lithography for nanotechnology[C]. *SPIE*, 2006, **6327**: 63270D
- 7 P. Graeupner, R. B. Garreis, A. Goehnermeier *et al.*. Impact of wavefront errors on low k1 processes at extremely high NA [C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 119~130
- 8 T. A. Brunner. Impact of lens aberrations on optical lithography [J]. *IBM J. Res. Develop.*, 1997, **41**(1-2): 57~67
- 9 J. Kye, G. McIntyre, Y. Norihiro *et al.*. Polarization aberration analysis in optical lithography systems [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61511~61540
- 10 G. R. Mc, J. Kye, H. Levinson *et al.*. Polarization aberrations in hyper-numerical-aperture projection printing: a comparison of various representations [J]. *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2006, **5**(3): 33001
- 11 M. Totzeck, P. G. Totzeck, T. Heil *et al.*. How to describe polarization influence on imaging (Invited Paper) [C]. *SPIE*, 2004, **5754**: 23~37
- 12 K. Bubke, B. Alles, E. Cotte *et al.*. Pellicle induced aberration and apodization in hyper NA optical lithography [C]. *SPIE*, 2006, **6283**: 628312
- 13 S. Yu. Thin-film optimization strategy in high numerical aperture optical lithography, part 1: principles[J]. *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2005, **4**(4): 043003
- 14 R. A. Chipman. Polarization Aberrations[D]. Ann Arbor MI: University of Arizona, 1987, 9