

文章编号: 0253-2239(2010)s100109

基于琼斯矩阵的薄膜诱导偏振像差分析

李旸晖 沈伟东* 章岳光 郑臻荣 刘 旭

(浙江大学现代国家光学仪器重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 利用琼斯矩阵分析了大角度入射情况时薄膜诱导的偏振像差,通过理论推导提出了减小薄膜诱导偏振像差的膜系设计方法,即在满足最基本的透射率要求的前提下,将尽可能的减小任何入射角度的透射率差和相位差作为膜系优化的两个附加条件。为了验证所提出理论的正确性,分别以不同的附加优化条件设计了两个减反膜进行对比,这两个减反膜分别代表了透射率差和相位差较大和较小的两种不同情况。通过对这两个不同减反膜偏振像差的进一步数值模拟,得到了透射率差和相位差均小的减反膜引发的偏振像差较小的结果,这一结果验证了理论的正确性。

关键词 薄膜;偏振像差;琼斯矩阵;光刻术

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201030.s100109

Analysis of Coating-Induced Polarization Aberrations Based on Jones Matrix

Li Yanghui Shen Weidong Zhang Yueguang Zheng Zhenrong Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Coating-induced polarization aberrations of large incident angle are theoretically studied by Jones matrix. The method to reduce the aberrations is proposed through derivation, which is $\delta = 0$ and arbitrary incident angle should be appended as two additional optimization goals of optical coating design when the requirements of transmittance are met. Two different anti-reflection coatings which are designed through different optimization goals are compared to further verify the theory. The two anti-reflection coatings represent large and small transmittance and phase difference respectively. Numerical simulation of the two coating induced polarization aberrations is also performed to further verify the theory.

Key words thin films; polarization aberrations; Jones matrix; lithography

OCIS codes 310.1210; 310.5448; 310.6805; 220.3740

1 引 言

深紫外光刻机(DUV)是大数值孔径的光学系统,光线在其界面的入射角甚至可达 60° 。当光学系统中存在这种大角度入射的时候,光学元件表面的薄膜对 s 光和 p 光的透射振幅和相位调制的差异就不能被忽略,这种差异会导致光刻机成像质量的下降,即所谓的偏振像差^[1~3]。至今为止,对于薄膜诱导偏振像差的研究和分析都不是非常透彻,而且

相关领域大多关注在具体的全反射系统方面,这种研究结果无法排除光学系统本身所引起的像差,对于光学薄膜的设计和 optimization 没有指导性意义^[4,5]。

本文使用琼斯矩阵分析薄膜诱导的偏振像差,采用这种分析所得到的结果与光学系统本身无关^[6,7]。基于此分析,提出了减小薄膜诱导偏振像差的膜系设计方法,并通过两个典型减反膜的对比,验证了该方法的正确性。

收稿日期: 2010-08-15; 收到修改稿日期: 2010-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(60708013, 60778025)资助课题。

作者简介: 李旸晖(1985—),女,硕士研究生,主要从事深紫外光学薄膜方面的研究。E-mail: leokuandlee@hotmail.com

导师简介: 沈伟东(1977—),男,博士,副教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: adongszju@hotmail.com

(通信联系人)

2 理论分析

每个膜系可以被看作是一个没有聚焦能力的光

学透镜,因此该膜系的传输特性可以用一个 2×2 的琼斯矩阵来描述^[4,7,8~10]:

$$J = \frac{1}{2} \exp(i\Delta) \begin{bmatrix} A + B + [A - B] \cos 2\varphi & [A - B] \sin 2\varphi \\ [A - B] \sin 2\varphi & A + B - [A - B] \cos 2\varphi \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $A = T_p \exp(-i \frac{\delta}{2})$, $B = T_s \exp(i \frac{\delta}{2})$, $\varphi (0 \leq \varphi \leq 2\pi)$ 是薄膜所在表面的孔径角, T_s 和 T_p 分别是透射光场 s 光和 p 光的偏振分量, $\Delta = (\Delta_s + \Delta_p)/2$, $\delta = \Delta_s - \Delta_p$ 分别是 s 光和 p 光的透射平均相位值和相位差, 因此经过薄膜后的光场分布可以表示为

$$E'(x, y) = JE(x, y) = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} E(x, y) = E'_x \begin{bmatrix} \exp(i\Delta'_x) \\ \eta' \exp[i(\Delta'_x + \Gamma')] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

为了分析的简便,将入射光简化为 x 方向的线偏振光,利用(1),(2)式,可以计算得到出射光场

$$\begin{bmatrix} E'_x \exp(i\Delta'_x) \\ E'_y \exp(i\Delta'_y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \exp(i\Delta) \begin{bmatrix} T_p \exp(-i \frac{\delta}{2}) + T_s \exp(i \frac{\delta}{2}) + [T_p \exp(-i \frac{\delta}{2}) - T_s \exp(i \frac{\delta}{2})] \cos 2\varphi \\ [T_p \exp(-i \frac{\delta}{2}) - T_s \exp(i \frac{\delta}{2})] \sin 2\varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中所有的变量都与入射角度有关,和入射光场相比较,透过光学薄膜的出射光场偏振态明显发生了变化,引起薄膜诱导的偏振像差,影响成像质量。偏振像差可以从振幅和相位两个方面分别加以描述,即二次衰减和延迟。这里以入射光场为例,二次衰减定义为 $D = (|E_x|^2 - |E_y|^2) / (|E_x|^2 + |E_y|^2)$, 延迟定义为 $\zeta = \Delta_x - \Delta_y$ ^[11]。如果入射光场的 D, ζ 与出射光场的 D', ζ' 相同,那么光学元件对光场的偏振态没有造成任何影响,也就不会造成偏振像差。对于上述 x 方向的线偏振光而言, $D = 1, \zeta = 0$, 因此只要出射光场的二次衰减 $D' = D = 1$ 并且延迟 $\zeta' = \zeta = 0$, 那么就不会存在薄膜诱导的偏振像差。

从偏振像差的定义出发,分别分析光学薄膜对入射光场振幅和相位的影响。首先,考虑只存在相位差而没有透射率差的情况,即在满足 $T_p = T_s = T$ 的条件下,考虑相位对偏振态的影响。在这种假设下,经过一系列的化简,出射光场为

$$\begin{bmatrix} E'_x \exp(i\Delta'_x) \\ E'_y \exp(i\Delta'_y) \end{bmatrix} \approx T \exp(i\Delta) \begin{bmatrix} \exp(-i \frac{\delta}{2} \cos 2\varphi) \\ \frac{\exp(-i \frac{\delta}{2} \sin 2\varphi) - \exp(i \frac{\delta}{2} \sin 2\varphi)}{2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

从(4)式可以看出,括号外的透射率 T 是 p, s 分量的公共因子,因此在振幅方面不会改变入射光场的

二次衰减。括号里相位因子中有两个变量(φ 和 δ), 可能会引起入射光场延迟的改变,其中 φ 是孔径角,这是一个系统变量,不是光学薄膜设计所能改变的参量。但是通过光学薄膜的设计和优化,完全能通过控制 δ 来控制,来减小薄膜对入射光场延迟的改变。从上式很容易得出, δ 越小,出射光场的延迟越接近于 0, 偏振像差越小, $\delta = 0$ 时,无偏振像差。

其次,假设薄膜对所有角度入射光线的 $\delta = 0$, 仅考虑振幅对偏振像差的影响,那么出射光场可以简化为

$$\begin{bmatrix} E'_x \exp(i\Delta'_x) \\ E'_y \exp(i\Delta'_y) \end{bmatrix} \approx \frac{T_s + T_p}{2} \exp(i\Delta) \begin{bmatrix} 1 + \eta \cos 2\varphi \\ \eta \sin 2\varphi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\eta = (T_p - T_s) / (T_p + T_s)$, 反映了薄膜 s 光和 p 光透射率的差别。(5)式中,括号内没有相位因子,不会对入射光场的延迟造成影响,但是由于 η 的存在,入射光场的二次衰减势必会发生变化。如果要使得出射光场的二次衰减与入射光场相同,即 $D' = D = 1$, 那么就要使得 $\eta = 0$, 也就意味着对于所有入射角而言, s 光和 p 光透射率完全相同。然而,根据光学薄膜的理论, p 偏振的有效导纳随着角度的增加而增大, s 偏振有效导纳随角度的变化恰恰相反,因此 s 光和 p 光之间的透射率差将会随着角度的增加而增大。所以实际的光学薄膜设计中,这种由于透射率差所引起的偏振像差是比较难控制的。

通过上面的分析可以得出这样的结论,在光学薄膜的设计中,如果对于所有的入射角 $\delta=0$ 和 $T_s = T_p$ 都得到满足,那么光场的二次衰减和延迟将不会发生变化,也不会有薄膜诱导的偏振像差。然而实际的膜系设计过程中,这种要求是很难达到的,但可以将 $\delta=0$ 和 $T_s = T_p$ 作为膜系设计中的辅助优化条件来减小薄膜诱导的偏振像差。

3 数值模拟

为了进一步证明上述分析的正确性,设计了两个中心波长为 193 nm 的典型减反膜,对比两者引起的偏振像差。这里分别选择在深紫外波段透明的 Al_2O_3 和 MgF_2 作为高、低折射率材料来组成多层膜,在 193 nm 处 MgF_2 , Al_2O_3 的折射率分别是 1.6 和 2.08^[12],同时选择在 193 nm 处折射率为 1.58 的紫外石英 JGS1 作为基底材料。两个膜系分别是基

底 |29.02 nm Al_2O_3 153.55 nm MgF_2 |空气和基底 |6.39 nm Al_2O_3 123.82 nm MgF_2 44.87 nm Al_2O_3 54.79 nm MgF_2 |空气。为了方便,分别称这两个膜系为 2 层减反膜和 4 层减反膜。

图 1 为设计的两个减反膜的透射率和相位差曲线,从图中很容易看出,在 2 层减反膜中,s 光和 p 光透射率差异随入射角度增加变化明显,在入射角度是 60° 的时候,达到了 27.74%。与 2 层减反膜形成对比的是,当入射角从 $0\sim 60^\circ$ 的变化过程中,4 层减反膜引起的 s 光和 p 光透射率差别都小于 1%。同时,当入射角是 60° 时,2 层减反膜的相位差达到了 -5.64° ,而 4 层减反膜的只有 -1.52° ,远小于 2 层减反膜。因此与 2 层减反膜相比,4 层减反膜的透射率差和相位差随角度变化都更小。按照前面的理论分析,经过 4 层减反膜的出射光场,其二次衰减和延迟的改变应该更小,即产生的偏振像差更小。

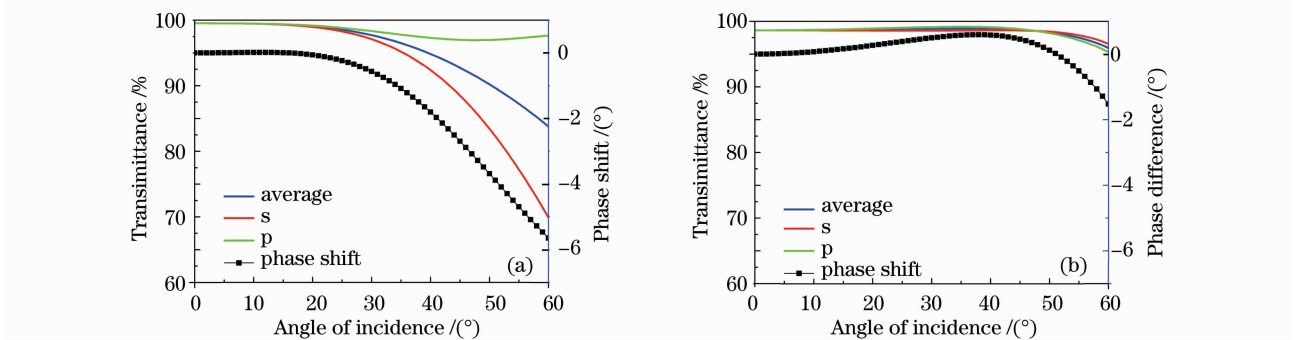


图 1 透射率和相位差曲线。(a)2 层减反膜,(b)4 层减反膜

Fig. 1 Transmittance and phase difference on transmission, (a) 2-layer anti-reflection coating, (b) 4-layer anti-reflection coating

对这两个减反膜所引起的偏振像差进行了进一步的数值模拟。所建立的入射光场模型如下:入瞳直径归化为一,边缘最大入射角为 60° ,入射光场的每一点的入射光都为 s 方向的线偏振光,因此入射光场的二次衰减和延迟分别是 1 和 0。图 2(a),(b)

分别是 2 层减反膜和 4 层减反膜的二次衰减,可以很明显地看出,2 层减反射膜的二次衰减在整个入瞳面上在 0.95~1 之间变化,而 4 层减反膜的二次衰减几乎为 1,与入射光场非常接近,因此 4 层减反膜在振幅方面产生的偏振像差确实比较小。

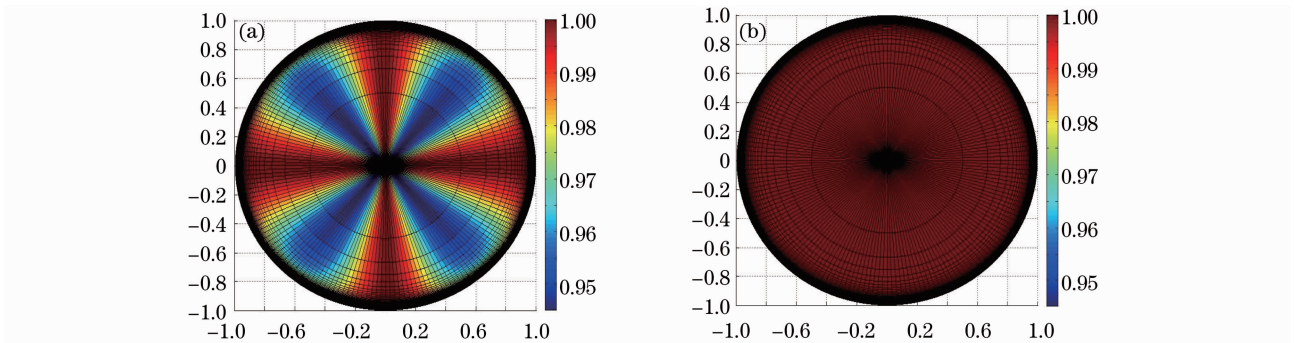


图 2 出射光场的二次衰减。(a)2 层减反膜,(b)4 层减反膜

Fig. 2 Diattenuation of outgoing. (a) 2-layer anti-reflection coating, (b) 4-layer anti-reflection coating

图 3(a),(b)分别是 2 层减反膜和 4 层减反膜出射光场的相位延迟数值模拟结果,其相位的变化范围是 $0\sim 2\pi$ 。由于入射光为线偏振光,导致因式 $\cos 2\varphi$ 和 $\sin 2\varphi$ 分别独立存在于出射光场的 x, y 分量中,这就是图 3 中出现 4 象限的原因。如果入射光场不是线偏振光,那么出射光场将会是 x, y 方向综合作用的结果,即 x 和 y 方向的出射光场同时包含因式

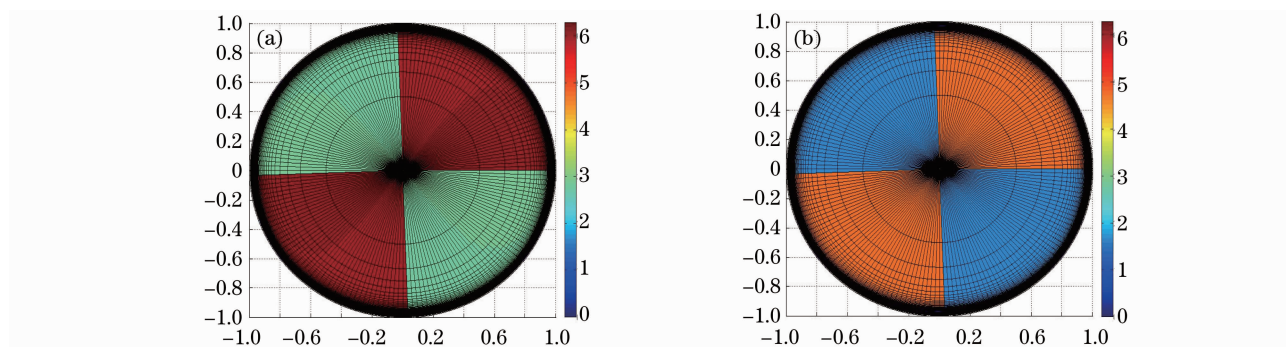


图 3 出射光场的延迟。(a)2 层减反膜,(b)4 层减反膜

Fig. 3 Retardance of outgoing optical. (a) 2-layer anti-reflection coating, (b) 4-layer anti-reflection coating

通过以上的数值模拟,4 层减反膜无论在振幅的二次衰减方面还是相位的延迟方面,对入射光场的改变都比较小,因此产生的偏振像差也比较小。这样的结果验证了文中所提出的方法,即合理优化所有入射角度上 s 光和 p 光的透射率和相位差,薄膜引起的偏振像差将会有效地得到控制。

4 结 论

由于 DUV 光刻机中大角度入射的存在,薄膜诱导的偏振像差不能被忽略。本文分析了薄膜引起偏振像差的机理,提出了通过合理的膜系设计减小偏振像差的方法,即在透射率要求得到满足的前提下,将 $\delta=0$ 和 $T_s = T_p$ 作为优化膜系的附加条件。通过利用琼斯矩阵的数值模拟验证,所提出的方法得到了验证。

参 考 文 献

- 1 M. Totzeck, P. Graupner, T. Heil *et al.*. Polarization influence on imaging [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2005, **4**(3): 31108~31131
- 2 Polarizing Optical Systems [P]. US patent 2936673, 1960
- 3 D. Flagello, B. Geh, S. Hansen *et al.*. Polarization effects

$\cos 2\varphi$ 和 $\sin 2\varphi$,那么四象限的情况就不会存在。分别在同一象限内对比 2 层减反膜和 4 层减反膜的延迟:第一和第三象限内 4 层减反膜的延迟更接近于 0,远远小于 2 层减反膜的结果,同样的情况也出现在第二和第四象限。因此整个光瞳面,4 层减反膜的延迟都比 2 层减反膜更接近于 0,4 层减反膜在偏振像差的相位延迟方面也有更好的表现。

- associated with hyper-numerical-aperture (>1) lithography [J]. *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2005, **4**(3): 31104~31131
- 4 Daniel J. Reiley, Russell A. Chipman. Coating-induced wavefront aberrations:on-axis astigmatism and chromatic aberration in all-reflecting systems [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33** (10): 2002~2004
- 5 DavidG. Crandall, Russell A. Chipman. Polarization aberrations of crossed folding mirrors [C]. *SPIE*, 1995, **2537**: 85~86
- 6 Norihiro Yamamoto, Jongwook Kyeb, Harry J. Levinson. Polarization aberration analysis using Pauli-Zernike representation [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 65200Y1~65200Y12
- 7 R. Clark Jones. A new calculus for the treatment of optical systems, I. description and discussion of the calculus [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(7): 488~493
- 8 A. L. Sokolov. Matrix method for calculating polarization aberrations [J]. *J. Opt. Technol.*, 2008, **75**(2): 79~84
- 9 A. L. Sokolov. Calculation of polarization aberrations by the method of polarization-wave matrices [J]. *Opt. Spectrosc.*, 2007, **103**(4): 640~645
- 10 Michael Shribak, Shinya Inoue, Rudolf Oldenbourg. Polarization aberrations caused by differential transmission and phase shift in high numerical-aperture lenses: theory, measurement, and rectification [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(5): 943~945
- 11 Jongwook Kyea, Gregory McIntyre, Yamamoto Norihiro *et al.*. Polarization aberration analysis in optical lithography systems [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61540E1~61540E11
- 12 Shang Shuzhen, Shao Jianda, Liao Chunyan *et al.*. High-reflectance 193 nm $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ mirrors [J]. *Applied Surface Science*, 2005, **249**(1-4): 157~161