

# 光学薄膜诱导偏振像差对大数值孔径光学系统聚焦特性的影响\*

李旻晖<sup>1)2)†</sup> 郝翔<sup>3)</sup> 史召邑<sup>1)</sup> 帅少杰<sup>1)</sup> 王乐<sup>1)</sup>

1)(中国计量学院, 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

2)(浙江大学, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

3)(爱德华兹路 132 号, 纽黑文 06511)

(2015 年 1 月 9 日收到; 2015 年 2 月 19 日收到修改稿)

大数值孔径光学系统表面光线的入射角较大, 会导致薄膜的偏振分离, 诱发偏振像差, 影响光学系统的聚焦特性. 本文利用矢量光衍射理论, 建立了光学薄膜各参量与光学系统聚焦光场的模型. 利用该模型分析了线偏振光入射时, 光学薄膜对光学系统聚焦光斑的扰动. 在此基础上, 探讨了应用了不同约束条件下得到的光学薄膜对最终聚焦光场的影响, 确定了减小薄膜扰动光学系统光斑的设计方法, 即额外添加透射率差和位相差的约束条件, 并且适当增加位相差约束的权重. 利用该方法优化设计的薄膜, 相比于普通减反膜而言, 对系统聚焦光场中心强度的提升可达约 12.5%.

**关键词:** 光学薄膜, 偏振像差, 大数值孔径

**PACS:** 42.79.Wc, 42.81.Gs, 42.15.Fr

**DOI:** 10.7498/aps.64.154214

## 1 引言

随着超分辨荧光显微技术获得 2014 年诺贝尔化学奖, 包括浸没式光刻技术、生物显微技术等在内的大数值孔径光学系统也引发了越来越多关注. 大数值孔径光学系统广泛的应用领域伴随着相关元器件设计和加工制造的复杂化, 许多的关键参数都是传统光学设计中所不曾涉及的. 在此类光学系统中, 为了获得更高的分辨率, 通常采用偏振光照明技术<sup>[1-3]</sup>. 由于此类光学系统本身对偏振态的要求较高, 因而无论是入射光场偏振态的分布、位相差还是光学系统像差都会导致入射光偏离原来的偏振态, 改变原有的聚焦特性<sup>[1,4-7]</sup>.

目前, 对此类系统聚焦特性的研究比较火热: Hao 等研究了不同偏振态的入射光对聚焦尺寸的影响, 并指出利用径向偏振光通过  $0-2\pi$  的涡旋

位相板, 可以获得更锐利的聚焦光斑<sup>[8-10]</sup>. 对于受激发射损耗显微技术 (STED) 中系统的初级球差、彗差和像散, Deng 等研究了它们对三束擦除光聚焦形状的影响<sup>[11]</sup>. Boruah 等利用傅里叶变换的方法, 对任意偏振态的聚焦光场各个因素进行了详细的计算, 并用 Zernike 多项式的形式给出了结果<sup>[12,13]</sup>. Roichman 等针对 STED 系统中界面间的折射率失匹, 讨论了其对擦除光形状和激发光尺寸的影响<sup>[14]</sup>. 但是目前的工作中, 几乎没有涉及到光学薄膜对最终聚焦特性影响的研究. 实际上, 大数值孔径光学系统中存在较大曲率的物镜, 其表面光线的入射角较大, 会导致薄膜 s 光和 p 光在强度和位相方面的分离, 产生薄膜诱导的偏振像差, 最终影响光学系统的聚焦特性. 针对这种情况, 本文建立了光学薄膜琼斯矩阵和入射光场偏振态的关系. 利用矢量光衍射理论, 系统分析了薄膜对光学系统聚焦光斑形状的影响, 明确了此类光学系统中薄膜

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61405183, 61177050) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lyh@cjlu.edu.cn

诱导偏振像差对聚焦特性的影响, 提出了相应的优化方法. 利用此方法进行了减反膜设计, 并展开了相关的分析.

## 2 理 论

对于一般的光学系统, 通常采用标量衍射理论就可以较为精确地建立物镜结构参数和聚焦光斑的联系. 然而, 随着光学系统数值孔径的增加, 光线在物镜表面的入射角也随之增大, s 光和 p 光的透/反射特性差异开始增加, 偏振效应已经无法忽略. 仅仅采用标量衍射理论已无法准确分析光学系统的聚焦情况, 这种情况下, 引入矢量衍射理论计算显得极其必要. 目前, 在矢量衍射理论中, 较为系统、精确, 同时运用也较为广泛的模型是 Debye 积分公式<sup>[15,16]</sup>:

$$\begin{aligned} & \bar{E}(r_2, \varphi_2, z_2) \\ &= -\frac{ik}{2\pi} \iint_{\Omega} \sin(\theta) \cdot A_1(\theta, \varphi) A_2(\theta, \varphi) \cdot S(\theta, \varphi) \\ & \quad \times P(\theta, \varphi) \cdot e^{i\Delta\vartheta} \\ & \quad \times e^{ikn(z_2 \cos \theta + r_2 \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_2))} d\theta d\varphi, \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $\bar{E}(r_2, \varphi_2, z_2)$  是焦点处的光强,  $(r_2, \varphi_2, z_2)$  是以焦点为原点的柱坐标系,  $\theta, \varphi$  分别是光束孔径角、入射光束截面内滚转角.  $A_1(\theta, \varphi), A_2(\theta, \varphi)$  分别是系统像差系数以及入射光在光束截面内的光强分布系数,  $S(\theta, \varphi)$  是聚焦系统结构系数,  $P(\theta, \varphi)$  是入射光偏振分布系数,  $\Delta\vartheta$  是相位编码系数.

在进一步研究光学薄膜对偏振特性的影响中, 为了简化理论模型, 我们对假设整个光学系统没有系统像差; 入射光为高斯分布的平面波; 在计算过程中, 选择广泛使用的平场消色差透镜为聚焦元件<sup>[17]</sup>. 此时,

$$A_1(\theta, \varphi) = 1, \quad (2)$$

$$A_2(\theta, \varphi) = E_0, \quad (3)$$

$$S(\theta, \varphi) = \cos^{1/2} \theta. \quad (4)$$

由于大数值孔径光学系统的表面, 存在较大的光线入射角. 对于一般的光学薄膜而言, 大的入射角会引起 s, p 光的偏振分离, 从而改变入射光场原有的偏振态. 这种情况, 也就意味着 (1) 式中的入射光偏振分布系数会发生变化, 从而导致焦点处的光强分布产生偏移, 改变原有系统的聚焦特性.

由于任意偏振态均可以视为正交线偏振态的叠加, 因此在本文中仅考虑线偏振光的情况. 对于  $x$  方向的线偏振光, 入射光场的琼斯矩阵可以表达为

$$J(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

但当光学系统表面引入光学薄膜后, 薄膜的 s 光、p 光透射率和位相分布会改变入射光场的琼斯矩阵. 值得注意的是, 光学薄膜设计过程中所定义的 s 光和 p 光的电场振动方向是针对于入射面而言的, 但是矢量衍射理论中、实际系统中照明用的偏振光的电场振动是针对直角坐标系来定义的, 因此计算中存在坐标转换的过程.

首先要将  $x$  方向的线偏振光入射光场划归到 s 光和 p 光方向, 经过光学薄膜后 s 光和 p 光方向的透过率和透过率位相都会受到光学薄膜相应的调制, 因此透过薄膜后 s 光和 p 光方向光场的琼斯矩阵为

$$J_{\text{coating}} = \begin{bmatrix} J_s \\ J_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{T_s(\theta)} e^{i\Delta_s(\theta)} \sin \varphi \\ \sqrt{T_p(\theta)} e^{i\Delta_p(\theta)} \cos \varphi \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由于上式是 s 光和 p 光方向分布的琼斯矩阵, 在后续计算的过程中还需转换到直角坐标系, 得到入射光场经过薄膜后的  $x, y$  方向的琼斯矩阵表达式,

$$J(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \sqrt{T_p(\theta)} e^{i\Delta_p(\theta)} \cos^2 \varphi + \sqrt{T_s(\theta)} e^{i\Delta_s(\theta)} \sin^2 \varphi \\ (\sqrt{T_p(\theta)} e^{i\Delta_p(\theta)} - \sqrt{T_s(\theta)} e^{i\Delta_s(\theta)}) \cos \varphi \sin \varphi \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中  $T_s, T_p$  是光学薄膜在 s 光、p 光方向的透过率,  $\Delta_s, \Delta_p$  是光学薄膜在 s 光、p 光方向的位相延迟. 通过引入转置矩阵

$$P(\theta, \varphi) = V(\theta, \varphi) \cdot J(\theta, \varphi), \quad (8)$$

可以将琼斯矩阵与入射光偏振分布系数相关联<sup>[7]</sup>. 综合 (3) 式和 (4), 即可以得到入射光偏振分布系数  $P(\theta, \varphi)$  的表达式. 将其代入 (1) 式即可分析薄膜对于系统聚焦状态的影响.

### 3 光学薄膜对聚焦光场扰动的分析

#### 3.1 减反膜对聚焦光斑影响的分析

为了更加直观、清晰地确定各参数对光场扰动的强弱,我们进行了进一步的分析计算. 计算分析过程中,为简化讨论,本文均以如下光学系统参数为例:数值孔径为1.4,像方折射率为1.518,中心波长为755 nm,入射光线为 $x$ 方向线偏振光. 首先不考虑光学薄膜的影响,当 $x$ 方向线偏振光通过光学系统后,聚焦光斑的图样如图1(a)所示. 从图中不难看出,聚焦光斑呈现出长轴在 $X$ 轴的椭圆形光斑分布, $X$ 轴方向的能量分布强度高于 $Y$ 方向. 同时从图1(b)中可以看出, $X$ 、 $Y$ 轴旁瓣强度约为中心强度的2%和3.2%. 为了便于分析,本文中所有的

$x$ 、 $y$ 轴方向的强度分布均以图1中聚焦光斑中心强度最高点归一化.

针对该系统,在中心波长755 nm处,我们进行了相应的减反膜设计. 采用 $\text{TiO}_2$ 为高折射率材料( $H$ , 折射率2.53), $\text{MgF}_2$ 为低折射率材料( $L$ , 折射率1.38),以中心波长处反射率0为优化目标,利用Tfcalc商用软件进行膜系设计. 最终膜系为252.6 nm  $L$ /34.6 nm  $H$ /21.3 nm  $L$ /107.8 nm  $H$ /129.0 nm  $L$ (这里称为减反膜1. 该膜系透过率曲线如图2(a)所示,可以明显看出在720—780 nm的波长范围内,透过率近乎为100%. 图2(b)中可以看出,当入射角增大时, $s$ 、 $p$ 光的透射率发生了明显的分离,并且位相差在入射角为 $75^\circ$ 时达到最大,接近 $11^\circ$ .

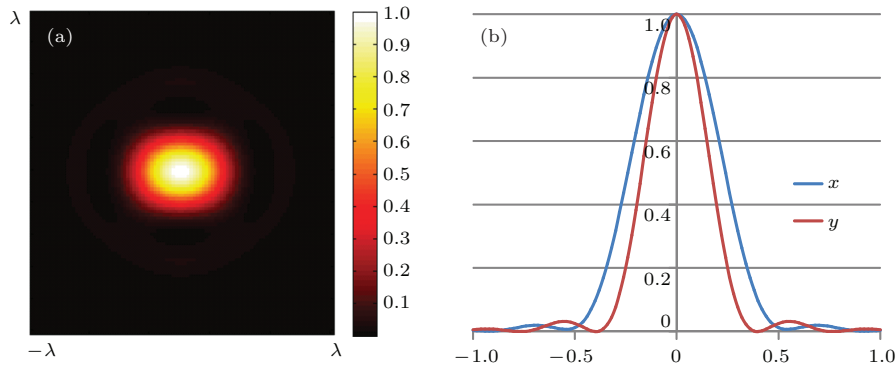


图1 (网刊彩色)  $x$ 方向线偏振光通过光学系统后的聚焦光斑强度分布 (a)  $xy$ 面聚焦光斑形貌(本文中聚焦光斑均以中心强度最高点为归一化目标); (b) 焦平面 $X$ 、 $Y$ 方向的强度分布

Fig. 1. (color online) (a) Normalized intensity distribution of  $x$  linearly polarized direction at the focal spot in the horizontal ( $xy$ ) plane. (b) The normalized intensity distribution of  $x$  linearly polarized direction at the focal spot along the  $x$  and  $y$  axes, respectively.

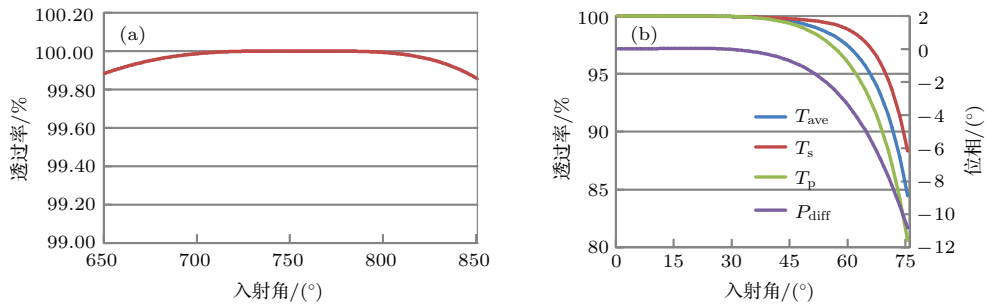


图2 (网刊彩色) (a) 减反膜1的透射率光谱; (b) 减反膜1的 $s$ 、 $p$ 光的透射率、位相差随入射角度增加的变化特性

Fig. 2. (color online) (a) The transmittance of anti-reflection (AR) coating 1; (b) Transmittance and phase shift on transmission for AR coating 1.

将减反膜1应用于上述光学系统中,并对其聚焦光斑进行计算. 从图3(a)中不难发现,旁瓣的强度较图1(a)有了增加. 而图3(b)中焦平处 $x$ 、 $y$ 轴方向的强度分布更明显地体现了这种变化趋势,

中心强度相比图1(b),下降到81.6%,而 $Y$ 轴方向的旁瓣最高峰接近6%,近乎为理想状态时的2倍, $x$ 、 $y$ 轴方向聚焦光斑的半高全宽也有所增加(表1). 由此可见,减反膜1虽然在透过率方面进行了较好

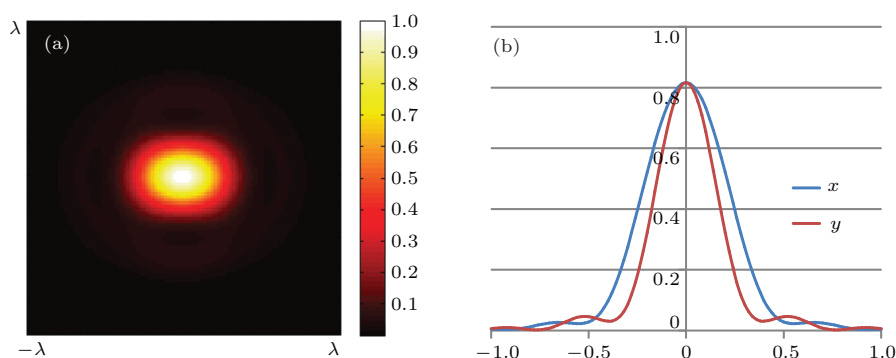


图3 (网刊彩色)  $x$  方向线偏振光通过光学系统后的聚焦光斑强度分布 (a) 为通过减反膜 1 后聚焦光斑形貌; (b) 焦平面  $X, Y$  方向的强度分布

Fig. 3. (color online) (a) With the Application of AR coating 1, the normalized intensity distribution of  $x$ -linear polarized direction at the focal spot in the horizontal ( $xy$ ) plane; (b) The normalized intensity distribution of  $x$  linearly polarized direction at the focal spot along the  $x$  and  $y$  axes, respectively.

的优化, 在中心波长处薄膜的设计透射率达到了近乎 100%, 但并不代表它对光学系统聚焦面的光强、光斑形貌没有影响. 实际上, 从图 3 中可以看出, 这种只针对透射率进行设计的普通减反膜, 对聚焦光场的扰动是非常明显的.

### 3.2 透射率差、位相差对偏振像差影响的评估

薄膜的琼斯矩阵造成入射光场偏振态的变化, 产生了薄膜诱导的偏振像差. 通过简单的分析, 从 (2) 式中可以得出, 这种偏振像差是薄膜  $s, p$  光的透射率、位相综合作用的结果. 理想情况下, 当  $T_s = T_p, \Delta_s = \Delta_p$  时, 就可以保持原有的  $x$  方向的线偏振态<sup>[18]</sup>. 进一步的分析中, 我们分别从薄膜的透射率差和位相差两方面着手, 分别评估这两者对聚焦光斑的影响.

首先, 只考虑薄膜透射位相差对聚焦光场的影响. 光学薄膜的设计过程中仍然采用  $\text{TiO}_2$  为高折射率材料 ( $H$ ),  $\text{MgF}_2$  为低折射率材料 ( $L$ ), 除了考

虑中心波长的透射率以外, 还对各个入射角度下薄膜的透射率差进行了额外的约束. 以反射率 0 为优化目标, 同时控制在各个入射角下, 透射率差为 0. 最终的膜系为  $292.1 \text{ nm } L/34.3 \text{ nm } H/121.9 \text{ nm } L/97.6 \text{ nm } H$ , 这里称为减反膜 2. 减反膜 2 的光谱特性如图 4 所示, 从图 4(b) 中可以看出随着角度的增大,  $s, p$  光的透射率位相差增加较为明显. 在  $75^\circ$  时, 透射率位相差达到了约  $-18^\circ$ . 与之相对应的是, 伴随着  $s, p$  光透射率的下降, 透射率差几乎没有增加, 变化趋势几乎一致.

针对减反膜 2 的优化考虑到了  $s, p$  光的透射率差, 因此与减反膜 1 相比, 在透射率差方面的表现较好. 但是, 伴随而来的是减反膜 2 在位相差方面表现比减反膜 1 下降了约 50%. 从图 5 中可以看出, 应用了该膜系的光学系统聚焦光斑的中心强度和旁瓣并没有太多的改善, 系统聚焦光斑中心强度下降到 80%, 低于反膜 1 聚焦光斑的中心强度, 聚焦光斑  $Y$  轴方向半高全宽也有进一步的上升. 减反膜 2 在位相差增加的负面效应淹没了透射率差优化

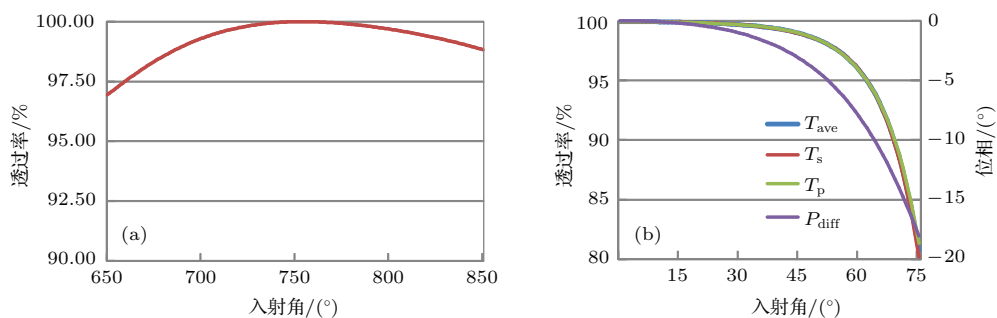


图4 (网刊彩色) (a) 减反膜 2 的透射率光谱; (b) 减反膜 2 的  $s, p$  光的透射率、位相差随入射角度增加的变化特性

Fig. 4. (color online) (a) The transmittance of AR coating 2; (b) Transmittance and phase shift on transmission of AR coating 2.



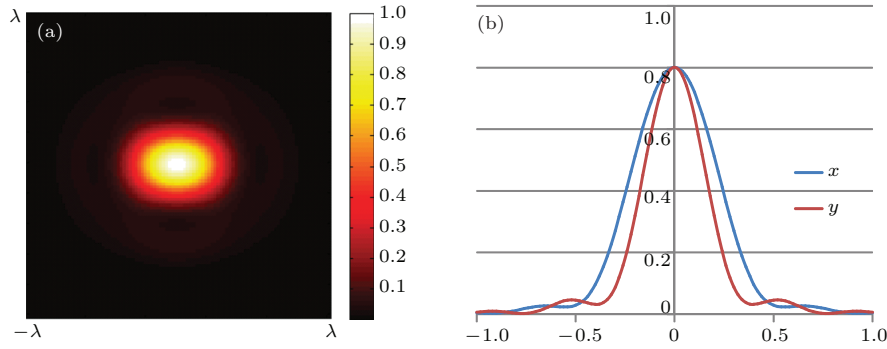


图5 (网刊彩色)  $x$  方向线偏振光通过光学系统后的聚焦光斑强度分布 (a) 为通过减反膜 2 后聚焦光斑形貌; (b) 焦平面  $x, y$  方向的强度分布

Fig. 5. (color online) (a) With the Application of AR coating 2, the normalized intensity distribution of  $x$ -linear polarized direction at the focal spot in the horizontal ( $xy$ ) plane; (b) The normalized intensity distribution of  $x$ -linear polarized direction at the focal spot along the  $x$  and  $y$  axes, respectively.

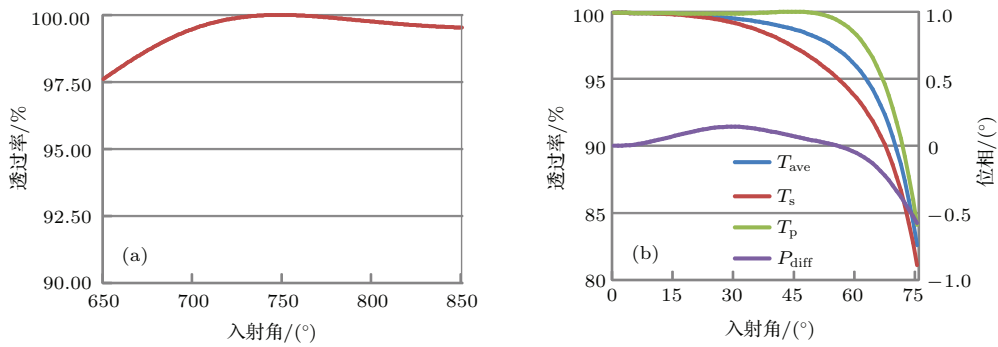


图6 (网刊彩色) (a) 减反膜 3 的透射率光谱; (b) 减反膜 3 的  $s, p$  光的透射率、位相差随入射角度增加的变化特性

Fig. 6. (color online) (a) The transmittance of AR coating 3; (b) Transmittance and phase shift on transmission of AR coating 3.

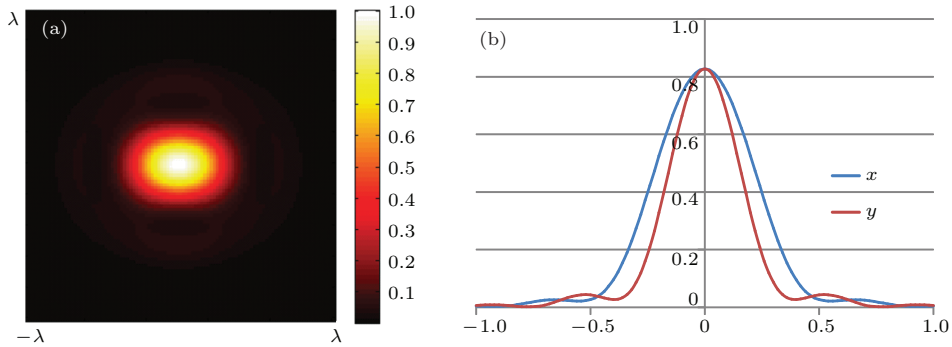


图7 (网刊彩色) (a)  $x$  方向线偏振光通过光学系统后的聚焦光斑强度分布 (a) 为通过减反膜 3 后聚焦光斑形貌; (b) 为焦平面  $x, y$  方向的强度分布

Fig. 7. (color online) With the Application of AR coating 3, the normalized intensity distribution of  $x$ -linear polarized direction at the focal spot in the horizontal ( $xy$ ) plane; (b) The normalized intensity distribution of  $x$ -linear polarized direction at the focal spot along the  $x$  and  $y$  axes, respectively.

所带来正面效应, 但对光学系统聚焦光斑的扰动并没有提升.

另一方面, 考虑单独优化薄膜  $s, p$  光位相差对系统聚焦光场的影响. 仍然采用  $\text{TiO}_2$  为高折射率材料 ( $H$ ),  $\text{MgF}_2$  为低折射率材料 ( $L$ ), 设计过程中对各个入射角度下薄膜的位相差进行了额外的约

束, 膜系设计结果为  $202.7 \text{ nm } L/21.7 \text{ nm } H/30.2 \text{ nm } L/152.4 \text{ nm } H/147.1 \text{ nm } L$ , 这里称为减反膜 3. 从图 6 中可以看出, 对比减反膜 1, 减反膜 3 的位相差方面的表现有了较大的提升. 当入射角为  $75^\circ$  时,  $s, p$  光的位相差仅为  $-0.6^\circ$  左右. 但是,  $s, p$  光透射率差在  $64^\circ$  时达到了 4.7%, 大于减反膜 1 的设计值.

应用了减反膜3后,系统聚焦光斑如图7所示. 聚焦光斑中心强度约为83%,  $x, y$ 轴旁瓣强度大约为中心强度的2.6%和4.4%. 在这两方面,减反膜2较减反膜1都有一定的提升. 对比减反膜2和减反膜3聚焦光斑分析结果,可以确定:薄膜对光学系统聚焦广场的影响是透射率和位相综合作用的结果. 相对于透射率差而言,系统聚焦光斑对位相差的变化更敏感. 综上所述,在薄膜设计的过程中,对于位相差的约束权重应当稍大于透射率差的权重.

### 3.3 低偏振像差薄膜的优化设计

利用上述的分析结果,我们对应用于大数值孔径光学系统的低偏振光学薄膜进行了优化设计. 在保证中心波长透射率的前提条件下,对各个角度下的位相差和透射率差做了限制,位相差评价函数的权重略大于透射率差的评价函数. 优化设计的减反膜4的膜系为  $82.6 \text{ nm } L/42.2 \text{ nm } H/33.6 \text{ nm } L/118.9 \text{ nm } H/149.3 \text{ nm } L$ ,透射率曲线如图8所

示,与图2中减反膜1的透射率差和位相差相比,都有较好的压缩.

应用了减反膜4后的系统聚焦光斑如图9(a)所示,从图中可以看出,减反膜4在聚焦光斑的扰动要远远小于减反膜1. 图9(a)中可以很明显得看出,减反膜4在  $x$ 轴方向的旁瓣有较为明显的下降,同时聚焦中心处归一化光场强度达到了近乎90%,比减反膜1提升约12.5%. 与其他三个减反膜相比,减反膜4在半高全宽(表1)方面的表现,最接近于光学系统理想状况时的情况. 由此可见,通过对光学薄膜透射率差、位相差良好的修正,可以有效控制薄膜的偏振像差,减小薄膜对聚焦光场的扰动.

表1 聚焦光斑的半高全宽

Table 1. Full width half maximum (FWHM) of focal spots.

薄膜类型	$x/\lambda$	$y/\lambda$
无薄膜	0.4664	0.3294
减反膜1	0.4720	0.3306
减反膜2	0.4717	0.3316
减反膜3	0.4689	0.3314
减反膜4	0.4691	0.3305

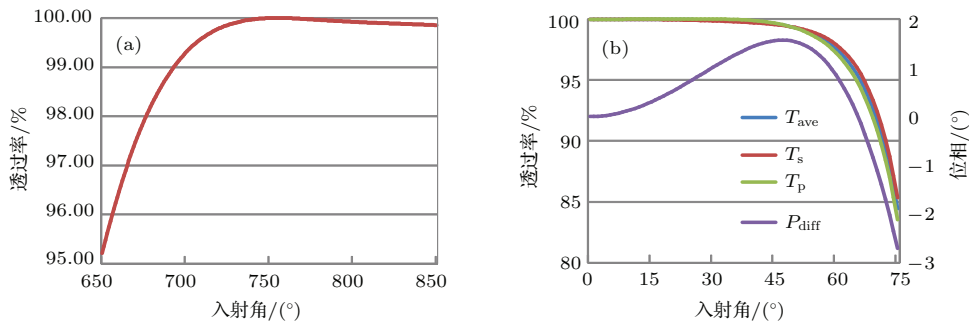


图8 (网刊彩色) (a) 减反膜4的透射率光谱; (b) 减反膜4的s, p光的透射率、位相差随入射角度增加的变化特性  
Fig. 8. (color online) (a) The transmittance of AR coating 4; (b) Transmittance and phase shift on transmission of AR coating 4.

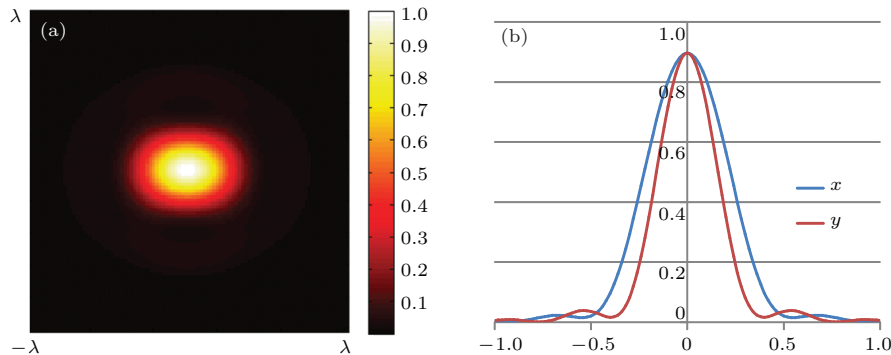


图9 (网刊彩色)  $x$ 方向线偏振光通过光学系统后的聚焦光斑强度分布 (a) 为通过减反膜4后聚焦光斑形貌; (b) 为焦平面  $x, y$ 方向的强度分布

Fig. 9. (color online) (a) With the Application of AR coating 4, the normalized intensity distribution of  $x$ -linearly polarized direction at the focal spot in the horizontal ( $xy$ ) plane; (b) The normalized intensity distribution of  $x$  linearly polarized direction at the focal spot along the  $x$  and  $y$  axes, respectively.

## 4 结 论

本文应用矢量光衍射理论,对薄膜诱导偏振像差对的光学系统聚焦光场的扰动进行了理论研究.分析对比了不同优化约束条件下设计的减反膜对聚焦光场的影响,证实了光学薄膜位相对聚焦光场的影响要稍大于透射率的带来影响,在优化设计过程中适当增加位相的约束权重可以实现更好的低偏振像差薄膜设计.同时,应用该方法设计的膜系聚焦中心处归一化光场强度达到了近乎90%,有效提高了系统光能利用率.在今后的分析中,可以尝试将薄膜诱导的偏振像差和光学系统本身的偏振像差相结合,通过对薄膜的补偿设计压缩整个系统的偏振像差,提高系统聚焦特性.

## 参考文献

- [1] Jasper H, Modderman T, Kerkhof M, C Wagner, Mulkens J, Boeij W de, Setten E van, Kneer B 2006 *Opt. Microlith. XIX* **6154** 61541W-1
- [2] Yu J J, Zhou C H, Jia W, Wu J, Lu Y C 2014 *J. Opt. Soc. Am. A* **31** 1059
- [3] Zhou G Q 2011 *Chinese Phys. B* **20** 074203
- [4] Lai K F, Rosenbluth A E, Han G, Tirapu-Azpiroz J, Meiring J, Goehnermeier A, Kneer B, Totzeck M, Zeiss C, Winter L de, Boeij W de, Kerkhof M Vde 2007 *Opt. Microlith. XX* **6520** D5200
- [5] Flagello D G 2005 *Adv. Microlith. Technol.* **5645** 44
- [6] Wang Z L, Zhou M, Gao C Y, Zhang W 2012 *Chinese Phys. B* **21** 064202
- [7] Luo Z M, Chen S Z, Ling X H, Zhang J, Luo H L 2014 *Acta. Phys. Sin.* **63** 13 (in Chinese) [罗朝明, 陈世祯, 凌晓辉, 张进, 罗海陆 2014 物理学报 **63** 13]
- [8] Hao X, Kuang C F, Wang T T, Liu X 2010 *Opt. Lett.* **35** 3928
- [9] Hao X, Kuang C F, Wang T T, Liu X 2010 *J. Opt-Uk.*,12
- [10] Hao X, Kuang C F, Li Y H, Liu X 2012 *Opt. Express* **20** 12692
- [11] Deng S H, Liu L, Cheng Y, Li R X, Xu Z Z 2010 *Opt. Express* **18** 1657
- [12] Boruah B R, Neil M A A 2009 *Opt. Commun.* **282** 4660
- [13] Boruah B R, Neil M A A 2006 *Opt. Express* **14** 10377
- [14] Roichman Y, Waldron A, Gardel E, Grier D G 2006 *Appl. Opt.* **45** 3425
- [15] Richards B, Wolf E 1959 *Proc R. Soc. Lon. Ser-A* **253** 358
- [16] Quabis S, Dorn R, Eberler M, Glockl O, Leuchs G 2000 *Opt. Commun.* **179** 1
- [17] Davidson N, Bokor N 2004 *Opt. Lett.* **29** 1318
- [18] Li Y H, Shen W D, Zheng Z R, Zhang Y G, Liu X, Hao X 2011 *J. Opt-Uk.* **13** 5

# Effect of coating-induced polarization aberrations on the focusing properties in high numerical aperture optical system\*

Li Yang-Hui<sup>1)2)†</sup> Hao Xiang<sup>3)</sup> Shi Zhao-Yi<sup>1)</sup> Shuai Shao-Jie<sup>1)</sup> Wang Le<sup>1)</sup>

1) (College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

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

3) (132 Edwards Street, New Haven 06511, USA)

( Received 9 January 2015; revised manuscript received 19 February 2015 )

## Abstract

The incident angles of the optical systems with high numerical apertures, such as lithography or microscope, are larger than those of normal ones. For these systems, polarized illumination is widely adopted. The coatings on their surfaces will make s and p polarization components of oblique incident light experience diverse amplitudes and phase modulations, and induce extra polarization aberrations. We apply the vectorial diffraction theory to assess the effects of coating-induced polarization aberrations on the focusing properties of these systems. By applying the generalized Debye integral, the relationship between the parameters of coating and electric field vector near the focal spot is established. Considering  $x$  linearly polarized light as the incident light field, we evaluate the potential influence of the coatings on the intensity and the full width at half maximum of focal spots. In the further discussion, we compare the results of different coatings when the various optimization goals are set, and certify that the phase difference caused by coating has more effect on focusing property. Based on this, the additional constraint conditions of coating design are proposed to suppress such disturbance, i.e. to properly increase relative weight of phase constraint conditions. With this proposed constraint conditions, we design and optimize an anti-reflection coating with low polarization aberrations. By applying this designing, the central intensity of focal spot can be enhanced by 12.5%, and the light energy utilization will be improved effectively.

**Keywords:** optical coating, polarization aberrations, high numerical aperture

**PACS:** 42.79.Wc, 42.81.Gs, 42.15.Fr

**DOI:** [10.7498/aps.64.154214](https://doi.org/10.7498/aps.64.154214)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61405183, 61177050).

† Corresponding author. E-mail: [lyh@cjlu.edu.cn](mailto:lyh@cjlu.edu.cn)