

宽视场角 1/4 波片装调和加工误差对偏振检测的影响

董 娟 李艳秋

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 波片通常用于测量光学系统的偏振效应。对于大入射角的超高数值孔径(NA)成像系统,待测光不再平行于系统光轴,而是与系统光轴有较大夹角的圆锥形光束,所以在高 NA 的成像系统中使用的波片不是传统的两片式零级 1/4 波片,而是正负晶体组合的四片式宽视场角(WVA)1/4 波片。分析了 WVA 1/4 波片的装调角度误差(绕成像系统光轴的旋转误差和垂直于系统光轴的倾斜误差)、晶体的厚度和光轴加工误差所引起的附加相位差。分析结果显示,在 NA 为 1.35 的光刻系统中,当四片式 WVA 1/4 波片的装调角度误差和单片晶体光轴加工误差均为 $\pm 2^\circ$ 时,后者比前者所引起的附加相位差大 10 倍以上。分析了 WVA 1/4 波片装调和加工误差引起的最大附加相位差对高 NA 光刻系统掩模面光偏振度(DOP)的影响。当 WVA 1/4 波片的附加相位差在 $\pm 10^\circ$ 以内时,DOP 的偏差可以控制在 0.1% 的范围内。

关键词 测量;波片;相位延迟;误差;光刻机;偏振检测技术

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0612006

Effect of Assembly and Manufacturing Error for Wide-Viewing-Angle Quarter Waveplate on Polarimetry

Dong Juan Li Yanqiu

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract A waveplate is used to measure the polarization effects in optical systems. For a ultrahigh numerical aperture (NA) imaging system with a large angle of incidence, the light concerned may be not parallel to the optical axis of the system, but a conical light beam with a large angle to the optical axis of the system. Therefore, the conventional double-plate type 1/4 waveplate can not be used in such systems. Instead of it, a four-plate wide-viewing-angle (WVA) 1/4 waveplate composed by positive and negative crystals can be used. The additional retardation caused by WVA 1/4 plate is analyzed in assembly angle error with three direction and two manufacturing errors. It is found that when the WVA 1/4 waveplate assembly error and the optical axis error of one piece crystal are both $\pm 2^\circ$ in the lithography system of NA of 1.35, the retardation error deduced by the latter relative to the former is above ten times. The deviation of light polarization degree (DOP) on mask level of high-NA lithographer is analyzed caused by the maximum additional retardation of WVA 1/4 waveplate, which comes from assembly and manufacturing error. As a result, It is concluded that when the retardation error is in the range of $\pm 10^\circ$, the DOP deviation can be controlled in the scope of one in a thousand.

Key words measurement; waveplate; retardation; error; lithography; polarimetry technique

OCIS codes 120.0120; 120.2130; 260.5430; 350.5030

1 引 言

超高数值孔径(NA)成像系统广泛应用于浸没式显微镜和浸没式光刻工具中。然而,有大入射角的超高 NA 成像系统引入较大的偏振效应,严重影

响成像质量^[1]。因此准确测量和控制超高 NA 成像系统的偏振特性变得尤为重要。偏振测量仪的检测精度受其内部各检测元件的误差影响。偏振测量系统通常由照明光学系统、1/4 波片、偏振片、耦合镜

收稿日期: 2013-01-16; 收到修改稿日期: 2013-02-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003)和国家中长期科技重大专项(F050809)资助课题。

作者简介: 董娟(1980—),女,博士研究生,主要从事光刻系统偏振效应检测技术方面的研究。

E-mail: dongjuan398@bit.edu.cn

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

和成像器件构成。所以 1/4 波片对偏振检测仪精度的影响需要着重分析。

在传统的偏振测量仪中待测光束几乎平行于系统光轴,使用两片式的零级 1/4 波片检测^[2-6]。而在高 NA 光刻系统中,由于待测光束是大角度的圆锥形光束,掩模面照明光偏振态的测量需要使用新型的宽视场角(WVA)1/4 波片。而此波片在检测过程中可能出现的各种误差,目前还鲜有报道。

为了有效分析 WVA 1/4 波片装调和加工误差对高 NA 光刻系统中掩模面照明光偏振态测量的影响,本文基于笛卡尔坐标系,当 WVA 1/4 波片绕成像系统光轴(定义为 x 轴)旋转或相对垂直于系统光轴的 y 轴或 z 轴倾斜时,分析了在原坐标系中用入射角 α 和入射面方位角 θ 来表示的斜入射光线在新坐标系中的转换。然后分析在新坐标系中,入射光 p、s 分量波法线在波片中的传输方向从而得到 WVA 1/4 波片由于装调引起的附加相位差。提出 WVA 1/4 波片由于其内部每片晶体的厚度和光轴的加工偏差引起的附加相位差。针对高 NA 光刻系统的掩模面照明光检测系统,提出由于 WVA 1/4 波片的装调和加工误差引起的掩模面照明光偏振态的检测误差。

2 WVA 1/4 波片的装调误差分析

为了简便起见,分别考虑了 WVA 1/4 波片绕成像系统光轴的旋转误差和垂直于成像系统光轴的倾斜误差所引起的附加相位差。在笛卡尔坐标系中,定义 x 轴与成像系统的光轴重合, yz 平面垂直于成像系统光轴并且与晶体表面重合,其中 WVA 1/4 波片的光轴方向(取 WVA 1/4 波片中第一片晶体的光轴方向)与 y 轴平行。

2.1 WVA 1/4 波片绕 x 轴旋转所引起的附加相位差

WVA 波片是由两个波片组成的。每个波片都

是由两片晶体粘合而成的,其中一片晶体的快轴与另一片晶体的慢轴重合。调整两片晶体的厚度使其厚度差等于一个单片式零级波片的厚度。如图 1 所示,波片 1 由两片正单轴晶体组成,而波片 2 由两片负单轴晶体组成。

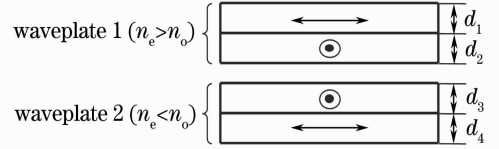


图 1 WVA 波片的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of WVA waveplate

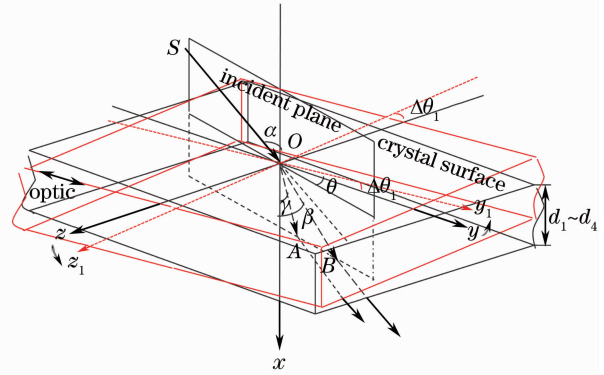


图 2 WVA 波片绕 x 轴旋转时的光波法线传播方向

Fig. 2 Wave normal direction of WVA waveplate rotated by x axis

如图 2 所示,假设晶体表面与 yz 平面重合, x 轴为晶体表面法线方向(也是成像系统光轴方向), SO 、 OA 和 OB 分别表示在 WVA 波片内 O 点的入射波和两个折射波的波法线。令 α 、 β 和 γ 分别为入射角和两个折射角, θ 为入射面在晶体表面的投影与 y 轴的夹角,即入射面的方位角,其中晶体的光轴与 y 轴平行。则从 WVA 波片出射的两条与入射光平行的两条光线之间的相位差为^[7]

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left(\sqrt{n_e^2 - \frac{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}{n_o^2} \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} \right) + \\ & \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left(\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_e^2 - \frac{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}{n_o^2} \sin^2 \alpha} \right) + \\ & \frac{2\pi d_3}{\lambda} \left(\sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \sin^2 \theta + n_{os}^2 \cos^2 \theta}{n_{os}^2} \sin^2 \alpha} \right) + \\ & \frac{2\pi d_4}{\lambda} \left(\sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \cos^2 \theta + n_{os}^2 \sin^2 \theta}{n_{os}^2} \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n_e 、 n_o 是波片 1 的主折射率,而 n_{es} 、 n_{os} 是波片 2 的主折射率。当 WVA 波片绕 x 轴旋转 $\Delta\theta$ 后,在 xy_1z_1 坐标系中,其晶体表面法线方向即 x 轴方向不变,入射角仍然是 α ;而晶体的光轴方向旋转了 $\Delta\theta$,入射面方位角由原来的 θ 变换为 $\theta + \Delta\theta$,则 WVA 波片绕 x 轴旋转后,其相位延迟量变换为

$$\begin{aligned} \delta_x = & \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left[\sqrt{n_c^2 - \frac{n_c^2 \cos^2(\theta + \Delta\theta) + n_o^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta)}{n_o^2} \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} \right] + \\ & \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left[\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_e^2 - \frac{n_e^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) + n_o^2 \cos^2(\theta + \Delta\theta)}{n_o^2} \sin^2 \alpha} \right] + \\ & \frac{2\pi d_3}{\lambda} \left[\sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta) + n_{os}^2 \cos^2(\theta + \Delta\theta)}{n_{os}^2} \sin^2 \alpha} \right] + \\ & \frac{2\pi d_4}{\lambda} \left[\sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \cos^2(\theta + \Delta\theta) + n_{os}^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta)}{n_{os}^2} \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 α 、 θ 、 $\Delta\theta$ 分别是入射角、入射面方位角、WVA 波片绕 x 轴的旋转角。则 WVA 绕 x 轴旋转 $\Delta\theta$ 时，引起的附加相位延迟为

$$\Delta\delta = \delta_x - \delta. \quad (3)$$

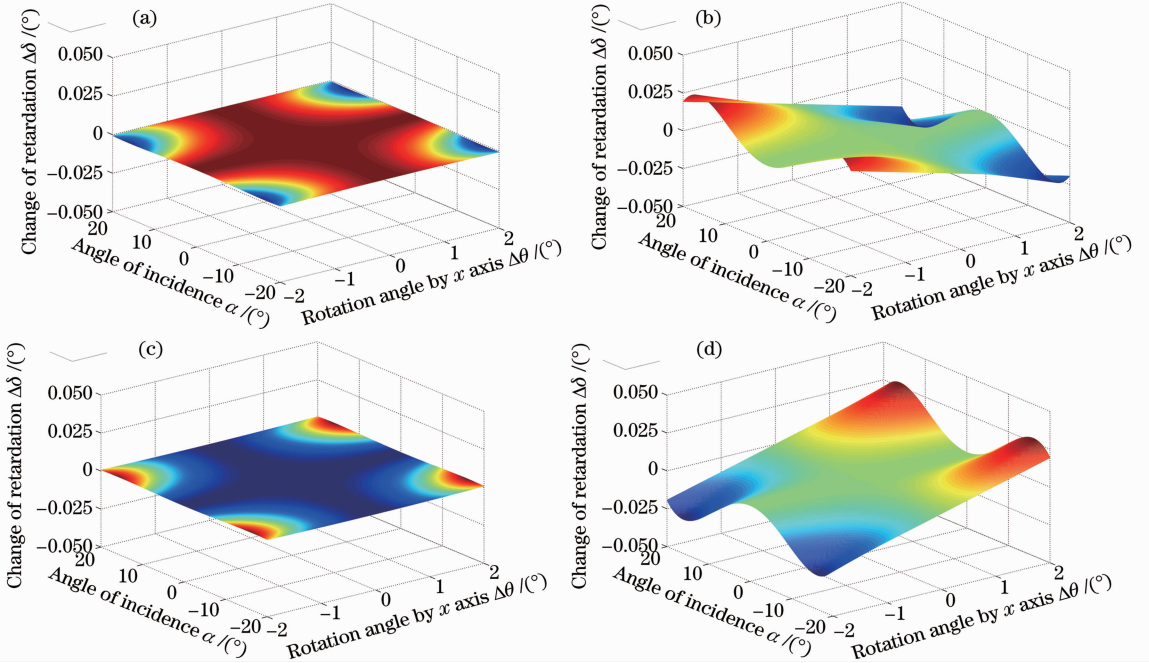


图 3 附加相位延迟量随入射角 α 和绕 x 轴的旋转角 $\Delta\theta$ 的变化趋势。(a) $\theta=0^\circ$ ；(b) $\theta=45^\circ$ ；(c) $\theta=90^\circ$ ；(d) $\theta=135^\circ$

Fig. 3 Variation of additional retardation with respect to angle of incidence α and the rotation angle $\Delta\theta$ by x axis.

(a) $\theta=0^\circ$ ；(b) $\theta=45^\circ$ ；(c) $\theta=90^\circ$ ；(d) $\theta=135^\circ$

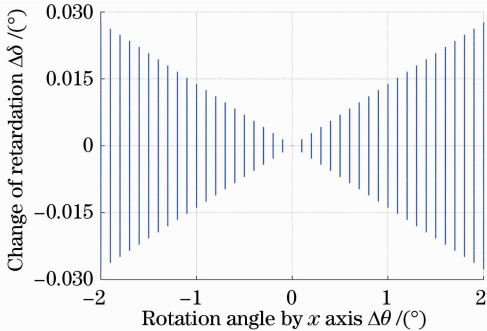


图 4 附加延迟量随 x 轴旋转角 $\Delta\theta$ 的变化

Fig. 4 Variation of additional retardation with respect to the rotation angle by x axis

图 3 为入射方位角取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 时，附加相位延迟量随入射角 α 和绕 x 轴旋转角 $\Delta\theta$ 的变化趋

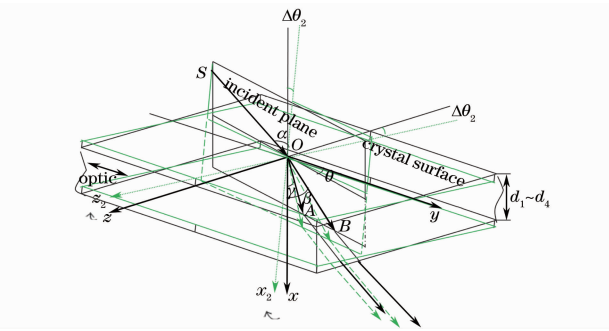
势。观察图 3 可以发现，1) 当入射面方位角 $\theta=45^\circ$ 时，波片绕 x 轴旋转引起的附件相位差最大。2) $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 时的图形对称。3) 而当 θ 在这四个方位角变化时，附加相位差在 $\pm 0.03^\circ$ 范围之内。为了全面反映入射到掩模面的所有入射光线，即入射角 α 在 $-20^\circ \sim +20^\circ$ 变化的同时，入射面方位角 θ 也在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 取值时，附加相位延迟量随 WVA 1/4 波片绕 x 轴的 $\pm 2^\circ$ 范围内旋转角的变化趋势，绘制图 4。

从图 4 可以看出，对于 NA 1.35 的掩模面锥形光束，WVA 1/4 波片绕 x 轴在 $\pm 2^\circ$ 以内旋转时，其附加相位延迟量在 $90^\circ \pm 0.03^\circ$ 范围内变化。

2.2 WVA 1/4 波片绕 y 轴倾斜所引起的附加相位差

如图 5 所示，WVA 波片绕 y 轴倾斜时，在 $x_2 y z_2$ 坐标系中，其相位延迟量由原来的(1)式变换为

$$\delta_y = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_c^2 - \frac{n_c^2 (\sin \alpha \cos \theta)^2 + n_o^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)}{n_o^2}} - \sqrt{n_o^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \cos \theta)^2]} \right\} + \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_o^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \cos \theta)^2]} - \sqrt{n_o^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \cos \theta)^2]} \right\} + \frac{2\pi d_3}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_{os}^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \cos \theta)^2]} - \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2 + n_{os}^2 (\sin \alpha \cos \theta)^2}{n_{os}^2}} \right\} + \frac{2\pi d_4}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 (\sin \alpha \cos \theta)^2 + n_{os}^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2}{n_{os}^2}} - \sqrt{n_{os}^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta - \sin \alpha \sin \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \cos \theta)^2]} \right\}, \quad (4)$$



式中 $\alpha, \theta, \Delta\theta$ 分别是入射角、入射面方位角、WVA 波片绕 y 轴的倾斜角。则 WVA 波片绕 y 轴倾斜 $\Delta\theta$ 时,引起的附加相位差是

$$\Delta\delta = \delta_y - \delta. \quad (5)$$

图 6 为入射方位角 θ 取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时,附加相位延迟量随入射角 α 和绕 y 轴的倾斜角 $\Delta\theta$ 的变化趋势。从图 6 可以看出:1) 当入射面方位角 $\theta=90^\circ$ 时,WVA 1/4 波片绕 y 轴倾斜引起的附件相位差最大;2) $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 时的完全相同;3) 而当 θ 在这四个方位角变化时,附加相位差在 $\pm 0.2^\circ$ 。而

图 5 WVA 波片绕 y 轴倾斜时的光波法线传播方向
Fig. 5 Wave normal direction of WVA waveplate tilted by y axis

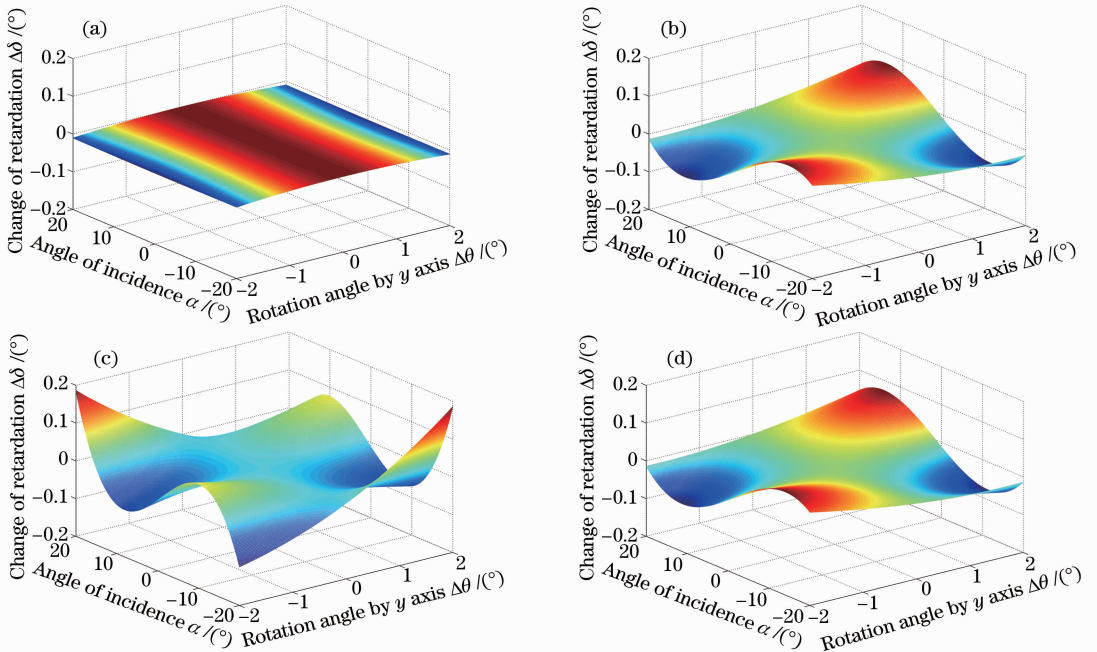


图 6 附加相位延迟量随入射角 α 和绕 y 轴的倾斜角 $\Delta\theta$ 的变化趋势。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=135^\circ$
Fig. 6 Variation of additional retardation with respect to angle of incidence α and the tilt angle $\Delta\theta$ by y axis. (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=135^\circ$

图7反映的是入射面方位角 θ 在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 、入射角 α 在 $-20^\circ\sim +20^\circ$ 取值时,WVA波片绕 y 轴倾斜 $-2^\circ\sim +2^\circ$ 所产生的附加相位延迟量。

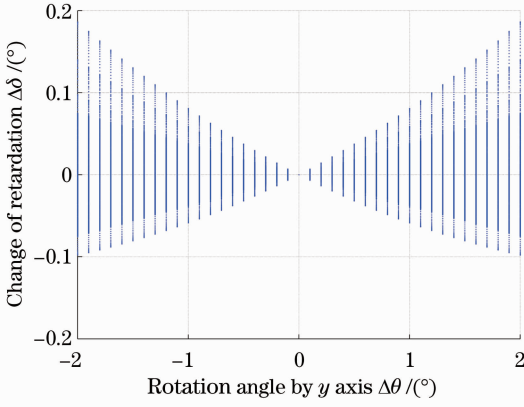


图7 附加相位延迟量随 y 轴倾斜角的变化

Fig. 7 Variation of additional retardation with respect to the rotation angle by y axis

从图7可以看出,对于NA为1.35的掩模面锥形光束,WVA 1/4波片绕 y 轴倾斜 $\pm 2^\circ$ 以内时,其相位延迟量在 $90^\circ\pm 0.2^\circ$ 范围内变化。

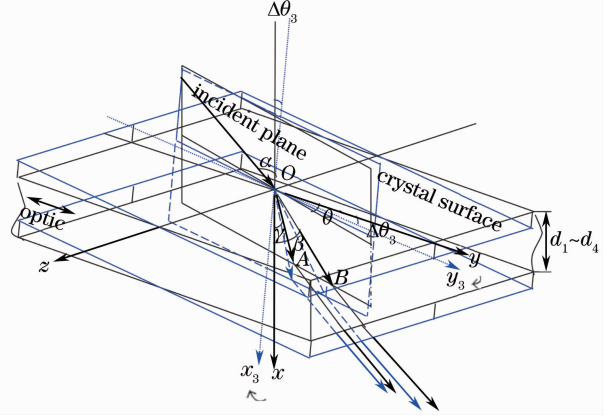


图8 WVA波片绕 z 轴倾斜时的光波法线传播方向

Fig. 8 Wave normal direction of WVA waveplate tilted by z axis

2.3 WVA 1/4波片绕 z 轴倾斜所引起的附加相位差

如图8所示,WVA波片绕 z 轴倾斜时,在 x_3y_3z 坐标系中,其相位延迟量由原来的(1)式变换为

$$\begin{aligned} \delta_z = & \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_c^2 - \frac{n_c^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2 + n_o^2 (\sin \alpha \sin \theta)^2}{n_o^2}} - \right. \\ & \left. \sqrt{n_o^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \sin \theta)^2]} \right\} + \\ & \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_o^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \sin \theta)^2]} - \right. \\ & \left. \sqrt{n_c^2 - \frac{n_c^2 (\sin \alpha \sin \theta)^2 + n_o^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2}{n_o^2}} \right\} + \\ & \frac{2\pi d_3}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_{os}^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \sin \theta)^2]} - \right. \\ & \left. \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 (\sin \alpha \sin \theta)^2 + n_{os}^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2}{n_{os}^2}} \right\} + \\ & \frac{2\pi d_4}{\lambda} \left\{ \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 (\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2 + n_{os}^2 (\sin \alpha \sin \theta)^2}{n_{os}^2}} - \right. \\ & \left. \sqrt{n_{os}^2 - [(\cos \alpha \sin \Delta\theta + \sin \alpha \cos \theta \cos \Delta\theta)^2 + (\sin \alpha \sin \theta)^2]} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 α 、 θ 、 $\Delta\theta$ 分别是入射角、入射面方位角、WVA波片绕 z 轴的倾斜角。则WVA波片绕 z 轴倾斜 $\Delta\theta$ 时,引起的附加相位差是

$$\Delta\delta = \delta_z - \delta. \quad (7)$$

图9为入射方位角 θ 取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 时,附加相位延迟量随入射角 α 和绕 z 轴的倾斜角 $\Delta\theta$ 的变化趋势。观察图9可以发现:1)当入射面方位角 $\theta=0^\circ$

时,WVA 1/4波片绕 z 轴倾斜引起的附件相位差最大;2) $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=135^\circ$ 时的图形对称;3)而当 θ 在这四个方位角变化时,附加相位差在 $\pm 0.2^\circ$ 。为了全面反映入射到掩模面的所有入射光线,即入射角 α 在 $-20^\circ\sim +20^\circ$ 变化的同时,入射面方位角 θ 也在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 取值时,附加相位延迟量随WVA 1/4波片绕 z 轴倾斜角度的变化,绘制图10。

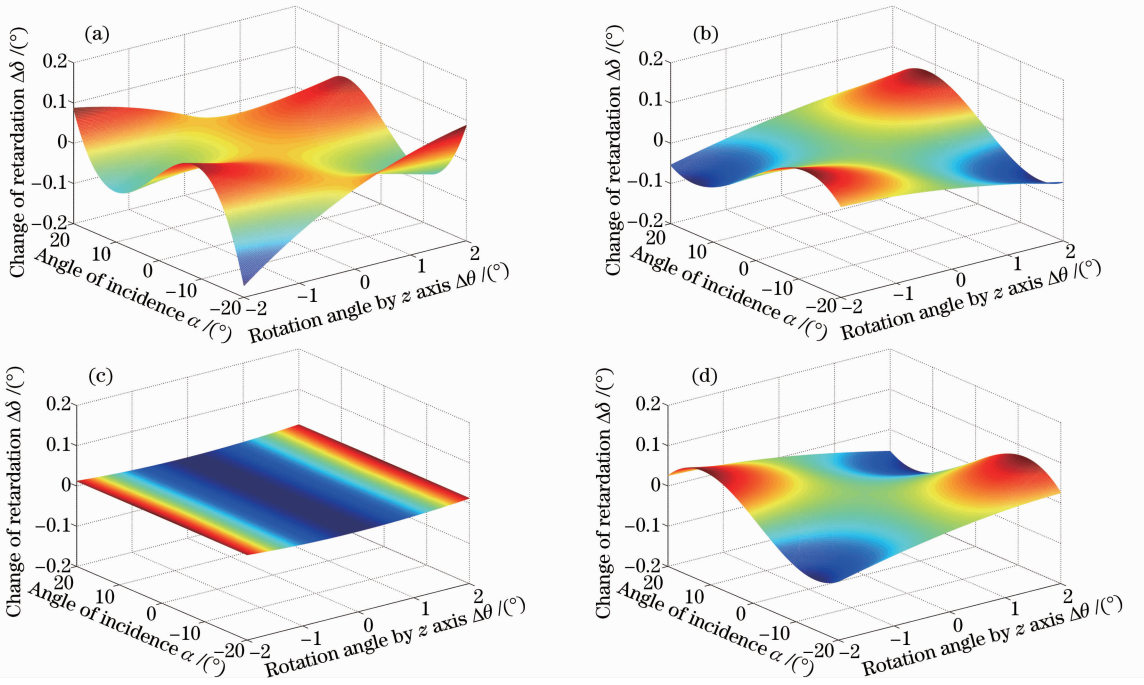


图 9 附加相位延迟量随入射角 α 和绕 z 轴的倾斜角 $\Delta\theta$ 的变化趋势。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=135^\circ$
 Fig. 9 Variation of additional retardation with respect to angle of incidence α and the rotation angle $\Delta\theta$ by z axis. (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=45^\circ$; (c) $\theta=90^\circ$; (d) $\theta=135^\circ$

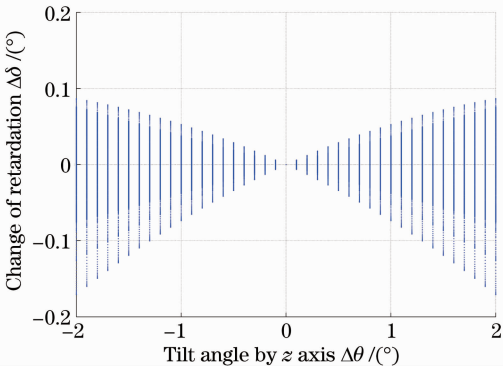


图 10 附加相位延迟量随 z 轴倾斜角的变化
 Fig. 10 Variation of additional retardation with respect to the tilt angle by z axis

从图 10 可看出,对于 NA 为 1.35 的掩模面锥形光束, WVA 1/4 波片绕 z 轴倾斜 $\pm 2^\circ$ 以内时,其相

位延迟量在 $90^\circ \pm 0.2^\circ$ 范围内变化。

由上述 WVA 波片绕坐标轴旋转或相对坐标轴倾斜所引起的附加相位差的分析可知:当 WVA 1/4 波片绕某坐标轴旋转或倾斜 $\pm 2^\circ$ 以内时,其单方向的装调误差所引起的附加相位差可控制在 $\pm 0.2^\circ$ 以内。

3 WVA 1/4 波片的加工误差分析

在检测掩模面照明光偏振态时除了要分析 WVA 波片的装调误差外,还需要分析 WVA 波片内部每片晶体的厚度和光轴这类的加工误差引起的附加相位差。

3.1 WVA 1/4 波片内部晶体厚度偏差所引起的附加相位差

WVA 波片每片的晶体厚度变化 $\Delta d_i (i=1, 2, 3, 4)$ 时,其相位延迟量由原来的(1)式变换为

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{2\pi(d_1 + \Delta d_1)}{\lambda} \left(\sqrt{n_c^2 - \frac{n_c^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}{n_o^2} \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} \right) + \\ & \frac{2\pi(d_2 + \Delta d_2)}{\lambda} \left(\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_c^2 - \frac{n_c^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}{n_o^2} \sin^2 \alpha} \right) + \\ & \frac{2\pi(d_3 + \Delta d_3)}{\lambda} \left(\sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \sin^2 \theta + n_{os}^2 \cos^2 \theta}{n_{os}^2} \sin^2 \alpha} \right) + \\ & \frac{2\pi(d_4 + \Delta d_4)}{\lambda} \left(\sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \cos^2 \theta + n_{os}^2 \sin^2 \theta}{n_{os}^2} \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

如图 11 所示,当 WVA 波片中四片晶体的厚度 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 分别变化 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 时,附加延迟量的变化范围可以在 $\pm 3^\circ$ 之内。

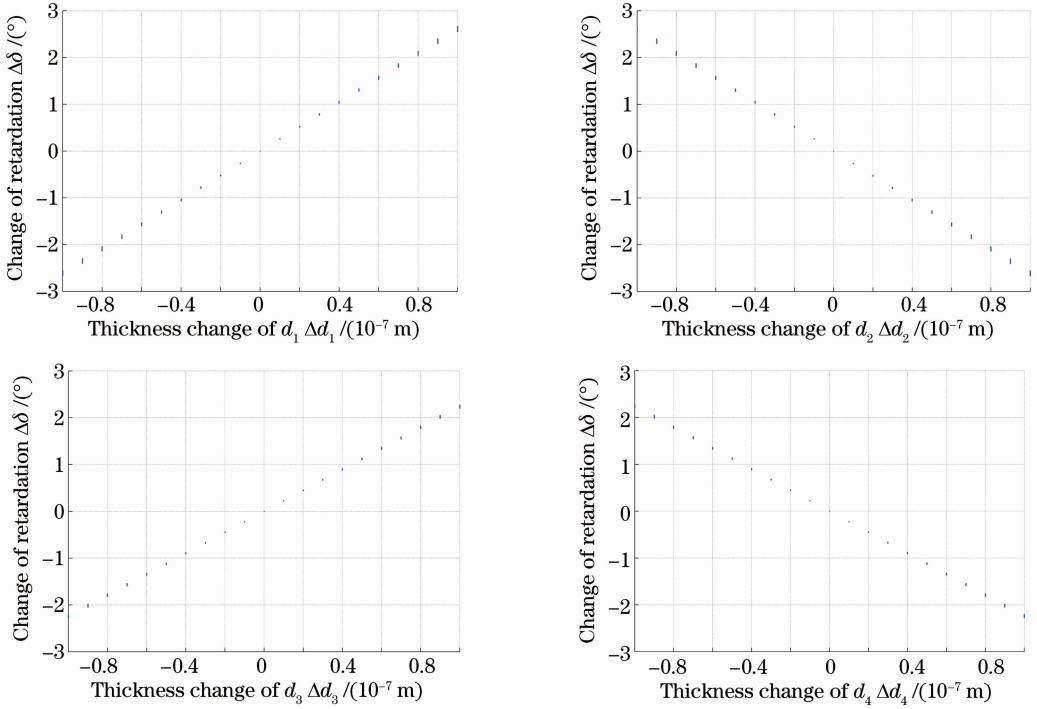


图 11 WVA 波片由加工误差引起的附加相位延迟量。(a) d_1 ; (b) d_2 ; (c) d_3 ; (d) d_4

Fig. 11 Change of retardation be deduced by manufacturing error. (a) d_1 ; (b) d_2 ; (c) d_3 ; (d) d_4

3.2 WVA 1/4 波片内部晶体光轴偏转所引起的附加相位差

WVA 波片内部每片的晶体光轴由于加工未对准变化 ΔO_{pt_i} ($i=1,2,3,4$) 时,其相位延迟量由原来的(1)式变换为

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left[\sqrt{n_e^2 - \frac{n_e^2 \cos^2(\theta + \Delta O_{pt_1}) + n_o^2 \sin^2(\theta + \Delta O_{pt_1})}{n_o^2}} \sin^2 \alpha - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} \right] + \\ & \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left[\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_e^2 - \frac{n_e^2 \sin^2(\theta + \Delta O_{pt_2}) + n_o^2 \cos^2(\theta + \Delta O_{pt_2})}{n_o^2}} \sin^2 \alpha \right] + \\ & \frac{2\pi d_3}{\lambda} \left[\sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} - \sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \sin^2(\theta + \Delta O_{pt_3}) + n_{os}^2 \cos^2(\theta + \Delta O_{pt_3})}{n_{os}^2}} \sin^2 \alpha \right] + \\ & \frac{2\pi d_4}{\lambda} \left[\sqrt{n_{es}^2 - \frac{n_{es}^2 \cos^2(\theta + \Delta O_{pt_4}) + n_{os}^2 \sin^2(\theta + \Delta O_{pt_4})}{n_{os}^2}} \sin^2 \alpha - \sqrt{n_{os}^2 - \sin^2 \alpha} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

图 12 为 WVA 波片中四片晶体(d_1, d_2, d_3, d_4) 的光轴分别有 $\pm 2^\circ$ 的加工角度偏差时,附加相位延迟量的变化。如图 12 所示,当 WVA 波片中四片的晶体光轴方向分别变化 $\pm 2^\circ$ 时,附加相位延迟量的变化范围是相对较大的,达到近 $\pm 7^\circ$ 。

由上述内容可知,在 NA 为 1.35 的光刻系统

中,当四片式 WVA 1/4 波片的装调角度误差和单片晶体光轴加工误差均为 $\pm 2^\circ$ 时,后者比前者所引起的附加相位差大 10 倍以上。也就是说同样数量级的误差源,加工引起的 WVA 波片的附加相位差较大。

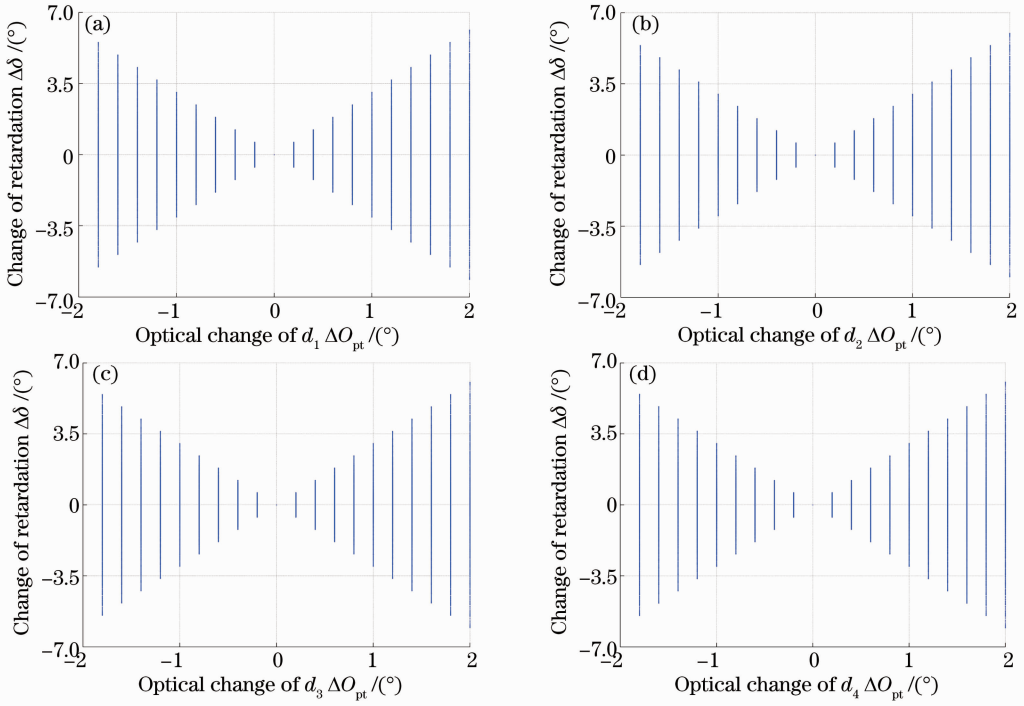


图 12 WVA 1/4 波片由加工角度偏差引起的附加相位延迟量变化。(a) d_1 光轴；(b) d_2 光轴；(c) d_3 光轴；(d) d_4 光轴
Fig. 12 Change of retardation be deduced by manufacturing error of optical axis. (a) d_1 optical axis; (b) d_2 optical axis; (c) d_3 optical axis; (d) d_4 optical axis

4 WVA 1/4 波片装调和加工引起的偏振检测误差

根据上述分析,装调误差引起的附加相位差小于 $\pm 0.2^\circ$,它对高 NA 光刻系统中掩模面光偏振态的检测影响要小。而四片式 WVA 波片中单片晶体光轴的加工误差引起的附加相位差较大,所以仅考虑此加工误差对光偏振态检测的影响。

光束的偏振态通常由斯托克斯参数来表示。对于高 NA 光刻系统,其掩模面照明光的斯托克斯参数为^[8,9]

$$\begin{cases} s_0 \cong \frac{bA - aB}{4(1 + \chi^2)(b - a)} \\ s_1 \cong \frac{\Sigma_1}{2(1 - \chi^2)(1 + \delta)} \\ s_2 \cong \frac{\Sigma_2}{2(1 - \chi^2)(1 + \delta)} \\ s_3 \cong \frac{\Sigma_3}{2(1 - \chi^2)} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\chi(0 \leq \chi \leq 1)$ 是通过偏振片的两个正交方向光束的振幅比, $\delta(-\pi/2 \leq \chi \leq \pi/2)$ 是 WVA 1/4 波片的延迟量与 $\pi/2$ 的差值。

$$A = I_{00} + I_{02} + I_{11} + I_{13} + I_{20} + I_{22} + I_{31} + I_{33}, \quad (11)$$

$$B = I_{01} + I_{03} + I_{10} + I_{12} + I_{21} + I_{23} + I_{30} + I_{32}, \quad (12)$$

$$a = 2(1 + \chi^2) - 4\chi\delta, \quad (13)$$

$$b = 4\chi - 2\delta(1 + \chi^2), \quad (14)$$

$$\Sigma_1 = I_{00} - I_{01} + I_{02} - I_{03} - (I_{20} - I_{21} + I_{22} - I_{23}), \quad (15)$$

$$\Sigma_2 = I_{30} - I_{31} + I_{32} - I_{33} - (I_{10} - I_{11} + I_{12} - I_{13}), \quad (16)$$

$$\Sigma_3 = I_{10} - I_{30} - (I_{12} - I_{32}), \quad (17)$$

式中的 $I_{ij}(i, j = 0, 1, 2, 3)$ 是图像传感器上的 16 个测量光强值,详细的测量原理见文献[10]。

对于光刻系统而言,偏振度(DOP)比斯托克斯参数更常用于描述光束的偏振态。DOP 和斯托克斯参数的对应关系为

$$D_{OP} = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0}. \quad (18)$$

由前两部分的分析可知,WVA 1/4 波片受装调和加工引起的延迟误差在 $\pm 7^\circ$ 之内。若假设掩模面照明光的斯托克斯矢量为 $\mathbf{S} = (1, 1, 0, 0)$,即 $D_{OP} = 1, \chi = 1/0.14^{[4]}$ 。则将 WVA 1/4 波片在 $\pm 10^\circ$ 范围内变化的附加相位差代入(18)式可知,DOP 的误差可控制在 0.1%。

5 结 论

本文首先构建了 WVA 波片由于装调和加工引起附加相位差的数学模型, 具体分析 NA 为 1.35 的浸没式光刻系统中检测掩模面照明光偏振度的情况。当 WVA 1/4 波片绕某坐标轴旋转或倾斜 $\pm 2^\circ$ 时, WVA 1/4 波片最大的相位延迟变化分别是 $\pm 0.03^\circ$, $\pm 0.2^\circ$, $\pm 0.2^\circ$; 而 WVA 1/4 波片中单片晶体由于厚度加工误差是 $\pm 0.1 \mu\text{m}$, 或是由于单片晶体光轴加工未对准变化 $\pm 2^\circ$ 时, WVA 1/4 波片的附加相位延迟为 $\pm 3^\circ$ 和 $\pm 7^\circ$ 。分析结果显示, 当四片式 WVA 1/4 波片的装调角度误差和单片晶体光轴加工误差均为 $\pm 2^\circ$ 时, 后者比前者所引起的附加相位差大 10 倍以上。分析了由于 WVA 1/4 波片的附加相位差引起的掩模面光 DOP 的偏差, 当 WVA 1/4 波片的延迟误差在 $\pm 10^\circ$ 以内时, DOP 的偏差可以控制在 0.1% 的范围内。

参 考 文 献

- 1 H. Nishinaga, N. Tokuda, S. Owa *et al.*. Development of polarized-light illuminator and its impact [C]. *SPIE*, 2005, **5754**: 669~680
- 2 Li Liyan, Yuan Yonggui, Wu Bing *et al.*. Effect of wave plate on nonlinear error in single-frequency polarized laser interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112009
李立艳, 苑勇贵, 吴冰等. 单频偏振激光干涉仪中波片对非线性误差的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112009

- 3 Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Chen *et al.*. Calibration of oblique-reflection aberration in point-diffraction interferometer for high-precision spherical surface testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612003
王道档, 杨甬英, 陈琛等. 点衍射球面检测中的斜反射波前像差校正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612003
- 4 Sun Boshu, Huang Zihao, Wang Xiaoping *et al.*. Intensity-modulated surface plasmon resonance array sensor based on polarization control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312003
孙博书, 黄子昊, 王晓萍等. 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312003
- 5 Li Zhicheng, Tang Zhilie, Chen Ping *et al.*. Study of photoelastic stress distribution and imaging method based on Stokes parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512005
李志诚, 唐志列, 陈萍等. 基于斯托克斯参量的光弹性应力分布及成像方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512005
- 6 Jin Xiaofeng, Yan Yi, Sun Jianfeng *et al.*. Angle-Doppler resolved reflective tomography laser imaging radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0828001
金晓峰, 严毅, 孙建锋等. 基于角度-多普勒分辨的反射层析激光成像雷达研究应力分布及成像方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0828001
- 7 J. Dong, Y. Li. Analysis and optimization approaches for wide-viewing-angle $\lambda/4$ plate in polarimetry for immersion lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2013, **31**(1): 011602
- 8 H. Nomura, Y. Furutono. *In-situ* polarimetry of illumination for 193-nm lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69241T
- 9 H. Nomura, Y. Furutono. Polarimetry of illumination for 193 nm immersion lithography [J]. *Microelectron. Eng.*, 2008, **85**(7): 1671~1675
- 10 H. Nomura, Y. Furutono. Polarimetry of illumination for 193-nm lithography used for the manufacture of high-end LSIs [C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 683408

栏目编辑: 何卓铭