

doi:10.3788/gzxb20134211.1319

应力双折射对偏振相移干涉检测的影响

宣斌

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 偏振相移干涉中标准镜头及其他元件的应力双折射会产生检测误差. 利用琼斯矩阵对偏振相移原理进行误差分析, 发现应力双折射会引起 CCD 上产生 8 个相干光干涉, 检测误差与 CCD 像面上的测试光和参考光的振幅之比、检测腔的相位、应力双折射的大小和方向等因素有关. 检测误差在每 1 根干涉条纹中会出现 2 次周期性变化, 误差的峰谷值最大可以达到应力双折射的 4 倍. 当应力双折射的方向具有一致性时可以减小检测误差, 当方向完全一致时, 检测误差完全消除. 通过对一个 $\varnothing 12$ 英寸的材料进行分析发现, 边缘处 $\varnothing 4$ 英寸材料的应力双折射中心处为 18 nm, 产生的检测误差峰谷值为 72 nm; 边缘处材料的应力双折射为 22 nm, 方向具有更好的一致性, 产生的检测误差峰谷值为 24.9 nm.

关键词: 光学检测; 干涉测量; 应力双折射; 光学仪器; 光学工程

中图分类号: O436.1; O435.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)11-1319-5

Influence of Birefringence on Polarization Phase Shifting Interferometry

XUAN Bin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The birefringence of transmission flat/sphere and other components introduces measurement error in Polarization Phase Shifting Interferometry (PPSI). Based on the principle of PPSI, the measurement error was analyzed by using the Jones matrix formulations. It was found that the birefringence generated eight beams interference on the CCD, and the measurement error was a function of the ratio of amplitude of test beam and reference beam, the testing cavity phase, the amount and orientation of birefringence. The measurement error varied 2 periods in every fringe. The maximal PV of measurement error would be 4 times of birefringence and the measurement error would be compressed if the orientation of birefringence was consistent. When the birefringence was of the same orientation, the measurement error could be eliminated. A $\varnothing 12$ inches material was analyzed. The results show that the birefringence of the $\varnothing 4$ inches area in the center was 18 nm, which introduced the measurement error of 72 nm (PV). The birefringence of the material at the edge was 22 nm and the measurement error was 24.9 nm (PV) because of the consistence of birefringence orientation.

Key words: Optical testing; Interferometry-measurements; Birefringence; Optical instruments; Optical engineering

0 引言

干涉检测是一种利用光的波动性质, 采用相干光的干涉进行相位检测的方法. 干涉检测的标尺为

光源的波长, 因此是一种具有极高准确度的检测方法, 应用于大部分的精密检测领域. 相移技术的出现使得干涉仪可以从多幅不同相移量的干涉条纹中自动获取被检元件的相位. 常用的方法包括压电陶瓷

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. XXXXXXXX)项目和“XX”科技探索与验证条件建设项目专项计划资助

第一作者: 宣斌(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为精密光学检测和光学加工. Email: xbjst@sina.com

收稿日期: 2013-09-11; **录用日期:** 2013-10-16

相移^[1-3]、载波法^[4-6]、偏振相移^[7-10]等. 其中, 偏振相移可以在同一时间获取多幅干涉条纹, 具有很好的防振性能, 近年来得到了广泛应用. 其中的波片^[11]、安装应力^[12]等^[13]对检测的影响已经开始得到关注.

偏振相移干涉采用偏振方向相互正交的线偏振光^[14]作为参考光和测试光, 经过一个1/4波片后变成左旋和右旋的圆偏振光, 再经过一个偏振片后变成线偏振光, 并且偏振方向一致, 最终在CCD上形成干涉条纹. 通过旋转偏振片可以产生相移. 参考光和测试光在经过偏振片后的偏振方向相同, 之后经过缩放(zoom)、调焦(focus)等干涉仪内部元器件时, 应力双折射对参考光和测试光产生相同的相位影响, 在干涉时相互抵消, 基本不影响检测准确度. 参考光和测试光为偏振方向正交的线偏振光以及圆偏振光时, 经过的透射元件的应力双折射对偏振相移检测产生影响, 集中体现在标准镜头和被检测元件上. 本文主要针对标准镜头进行分析, 当被检测元件也含有应力双折射的透射元件时, 可以用类似的方法分析.

1 误差理论分析

假设偏振相移干涉仪出射的参考光 \mathbf{E}_{r0} 偏振方向平行于 x 轴, 测试光 \mathbf{E}_{t0} 偏振方向平行于 y 轴. 根据琼斯矩阵, 参考光和测试光可以分别表示为

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{r0} &= A_{r0} \cdot \exp(i \cdot \varphi_r) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{t0} &= A_{t0} \cdot \exp(i \cdot \varphi_t) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (1)$$

式中, A_{r0} 和 φ_r 为参考光的振幅和相位, A_{t0} 和 φ_t 为测试光的振幅和相位.

标准镜头的应力双折射可以等效为一个波片, 假设其快轴沿 α 角方向, 快轴和慢轴的相位差为 φ_b , 则标准镜头产生的相位差可以表示为

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i \cdot \varphi_b) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}\quad (2)$$

参考光透射经过标准镜头并在参考面上自准直反射, 出射标准镜头时变为

$$\mathbf{E}_{r1} = \mathbf{B}_1 \cdot R_r \cdot \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{E}_{r0}\quad (3)$$

式中, R_r 为参考面的振幅反射系数. 测试光透射经过标准镜头和参考面, 在被检元件上自准直反射, 再次透射参考面和标准镜头. 当被检元件没有应力双折射时, 测试光变为

$$\mathbf{E}_{t1} = \mathbf{B}_1 \cdot T_r \cdot R_t \cdot \exp(i \cdot \varphi_0) \cdot T_r \cdot \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{E}_{t0}\quad (4)$$

式中, T_r 为参考面的振幅透射系数, R_t 为被检元件

的振幅反射系数, φ_0 为检测腔产生的相位, 包含被检元件的相位信息.

之后, 参考光和测试光经过一个快轴方向沿 -45° 角的1/4波片 Q 和一个透光轴沿 θ 角的偏振片 P , 则最终到达CCD时的参考光和测试光分别为

$$\mathbf{E}_{r2} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E}_{r1}\quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{t2} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E}_{t1}$$

式中

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}\quad (6)$$

$$\mathbf{Q} = \sqrt{2}/2 \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$$

令

$$A_{r2} = R_r \cdot A_{r0}$$

$$A_{t2} = R_t \cdot T_r^2 \cdot A_{t0}\quad (7)$$

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_1^2$$

则式(5)可以化简为

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{r2} &= A_{r2} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \exp(i \cdot \varphi_r) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{t2} &= A_{t2} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{B}_2 \cdot \exp[i \cdot (\varphi_t + \varphi)] \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (8)$$

展开后, 参考光和测试光均由4个不同相位的相干光组成

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_{r2} &= \left[\sum_{j=1}^4 A_j \cdot \exp(i \cdot \varphi_j) \right] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{t2} &= \left[\sum_{j=5}^8 A_j \cdot \exp(i \cdot \varphi_j) \right] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} A_1 = \sqrt{2}/2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot A_{r2} \\ \varphi_1 = \varphi_r + \theta \\ A_2 = -\sqrt{2}/2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot A_{r2} \\ \varphi_2 = \varphi_r + 90^\circ - \theta \\ A_3 = \sqrt{2}/2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot A_{r2} \\ \varphi_3 = \varphi_r + \theta + 2 \cdot \varphi_b \\ A_4 = \sqrt{2}/2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot A_{r2} \\ \varphi_4 = \varphi_r + 90^\circ - \theta + 2 \cdot \varphi_b \end{cases}\quad (10)$$

以及

$$\begin{cases} A_5 = -\sqrt{2}/2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot A_{t2}; \varphi_5 = \varphi_t + \varphi_0 + \theta; \\ A_6 = \sqrt{2}/2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot A_{t2}; \varphi_6 = \varphi_t + \varphi_0 + 90^\circ - \theta; \\ A_7 = \sqrt{2}/2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot A_{t2}; \varphi_7 = \varphi_t + \varphi_0 + \theta + 2 \cdot \varphi_b; \\ A_8 = \sqrt{2}/2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot A_{t2}; \varphi_8 = \varphi_t + \varphi_0 + 90^\circ - \theta + 2 \cdot \varphi_b \end{cases}\quad (11)$$

当 $\varphi_b = 0$ 时, CCD 上合并为 2 个偏振方向沿 θ 角的相干光, $E_{r2} = \sqrt{2}/2 \cdot A_{r2} \cdot \exp [i \cdot (\varphi_r + \theta)]$ 的参考光和 $E_{t2} = \sqrt{2}/2 \cdot A_{t2} \cdot \exp [i \cdot (\varphi_t + \varphi_0 + 90^\circ - \theta)]$ 的测试光, 条纹光强为 $I_j = 1/2 \cdot A_{r2}^2 + 1/2 \cdot A_{t2}^2 + \cos (\varphi_t + \varphi_0 - \varphi_r + 90^\circ - 2 \cdot \theta_j)$. 旋转偏振片 P 可以产生 $\delta_j = 90^\circ - 2 \cdot \theta_j$ 的相移. 以常用的 $\delta_j = -120^\circ, 0^\circ, 120^\circ$ 的三步相移为例

$$\varphi_{3\text{step}} = \varphi_t + \varphi_0 - \varphi_r = \arctan \left(\sqrt{3} \cdot \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right) \quad (12)$$

对于稳定的激光光源, $\varphi_t - \varphi_r$ 为常量, 偏振相移干涉的检测结果 $\varphi_{3\text{step}}$ 就表征了被检元件的相位.

当 $\varphi_b \neq 0$ 时, 8 个线偏振光在 CCD 上干涉, 条纹光强为^[15-17]

$$I = \left| \sum_{q=1}^8 A_j \cdot \exp (i \cdot \varphi_q) \right|^2 = \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 A_m \cdot A_n \cdot \cos (\varphi_m - \varphi_n) \quad (13)$$

仍然按照式(12)求取 $\varphi_{3\text{step}}$ 将存在检测误差

$$\Delta\varphi = \varphi_{3\text{step}} - \varphi_0 \quad (14)$$

可以看出, 偏振相移干涉中应力双折射产生的检测误差是一个极为复杂的函数, 与多个因素有关: CCD 像面上的测试光与参考光振幅比值 A_{t2}/A_{r2} , 检测腔相位 φ_0 , 应力双折射大小 φ_b 以及方向 α .

2 误差因素分析

干涉检测中为了具有最好的条纹对比度, 一般会尽量使 $A_{t2}/A_{r2} = 1$. 应力双折射主要由材料应力、加工残余应力、装卡应力等组成. 对于高精度标准镜头, 应力双折射主要是材料应力. 根据肖特 (Schott) 的光学材料标准, 精密退火后的材料应力双折射可以控制在 $< 6 \text{ nm/cm}$. 对于常用的 4 英寸标准镜头, 单块材料厚度为 10 mm 左右, 对于三片式的结构, $\varphi_b < 18 \text{ nm}$. 材料应力^[18] 的方向由材料制备方法决定.

当 $A_{t2}/A_{r2} = 1, \varphi_b = 18 \text{ nm}$ 时, $\Delta\varphi$ 关于 φ_0 和 α 的分布如图 1 所示. 可以看出, 当 $\alpha \neq 0^\circ, 90^\circ$ 时, 在 360° 的 φ_0 变化区间, 即 1 根条纹内, $\Delta\varphi$ 出现 2 个周期的变化. 当 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 90^\circ$ 时, 检测误差分别具有最大值 36 nm 和最小值 -36 nm , 峰谷值为

$$PV_{\Delta\varphi} = 4 \cdot \varphi_b \quad (15)$$

这个量级的误差在高精度检测中是不能接受的.

当应力双折射方向的范围不超过 45° 时, 检测误差至少可以减小一半

$$PV_{\Delta\varphi} < 2 \cdot \varphi_b \quad (16)$$

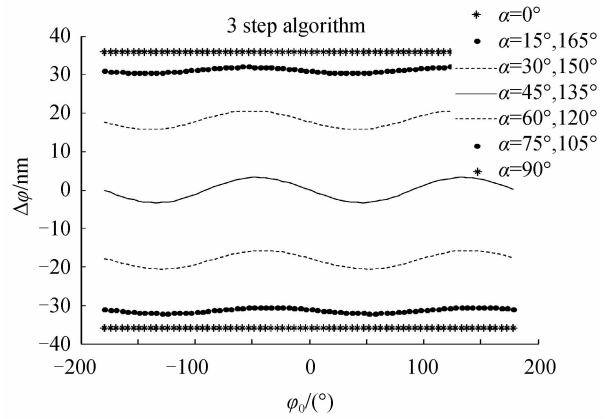


图 1 $\Delta\varphi$ 关于 φ_0 和 α 的分布图
Fig. 1 Distribution of $\Delta\varphi$ to φ_0 & α

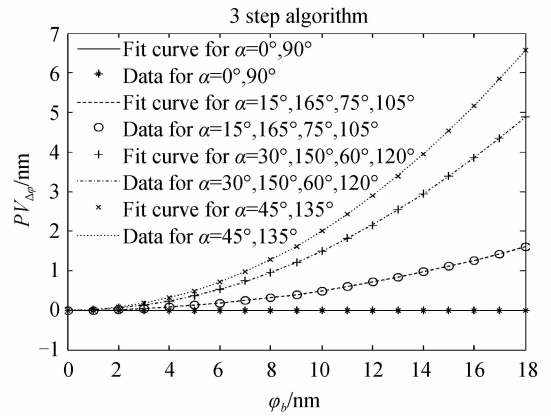


图 2 $\Delta\varphi$ 关于 φ_b 和 α 的分布图
Fig. 2 Distribution of $\Delta\varphi$ to φ_b & α

当应力双折射沿同一个方向时, 检测误差仅为图 1 中的单根曲线. 此时的检测误差为曲线的峰谷值, 如图 2 所示, 检测误差大致为 φ_b 的二次函数, $\alpha = 45^\circ, 135^\circ$ 时具有最大值

$$PV_{\Delta\varphi} \approx 0.0206 \cdot \varphi_b^2 - 0.0075 \cdot \varphi_b + 0.0112 \quad (17)$$

将应力双折射方向调整至 0° 或 90° 时, 检测误差可以完全消除.

3 实例分析

假设材料的应力双折射呈回转对称分布, 应力双折射的大小随口径的增大递增. 对于一块 $\varnothing 12$ 英寸的材料, 中心处 $\varnothing 4$ 英寸口径内的应力双折射分布如图 3 所示. 图中箭头方向表示快轴方向 α , 取值范围 0° 到 360° ; 箭头的长短表示大小 φ_b , 取值范围 16 nm 到 18 nm. 采用零级条纹可以使检测视场内的 φ_0 基本相等, 尽量减少其引起的检测误差. 当 $A_{t2}/A_{r2} = 1$, 根据式(10)~(14), 这种分布的应力双折射引起的检测误差 $\Delta\varphi$ 如图 4. 峰谷值和均方根值分别达到了 $PV_{\Delta\varphi} = 72 \text{ nm}, rms_{\Delta\varphi} = 24.4 \text{ nm}$.

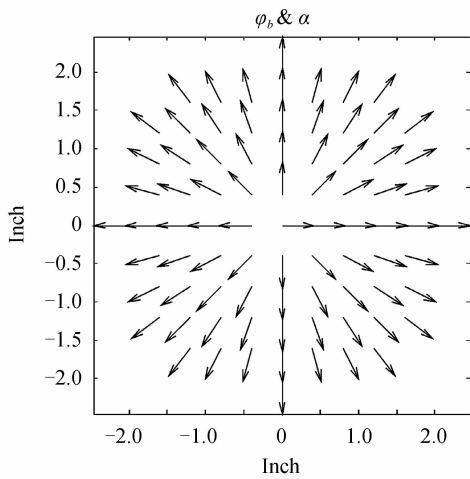


图3 中心材料的应力双折射分布

Fig. 3 Birefringence distribution of materials in the center

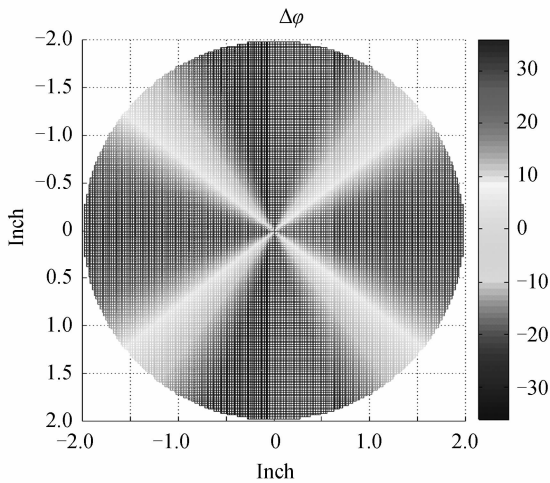


图4 中心材料的检测误差

Fig. 4 Testing error of materials in the center

边缘 $\varnothing 4$ 英寸口径内的应力双折射分布如图5. 图中, α 取值范围 -30° 到 30° , φ_b 取值范围18 nm到22 nm.引起的 $\Delta\varphi$ 如图6所示, $PV_{\Delta\varphi} = 24.9$ nm, $rms_{\Delta\varphi} = 5.7$ nm.可以看出,尽管边缘处材料的应力双折射大于中心,但方向一致性较好,产生的检测误

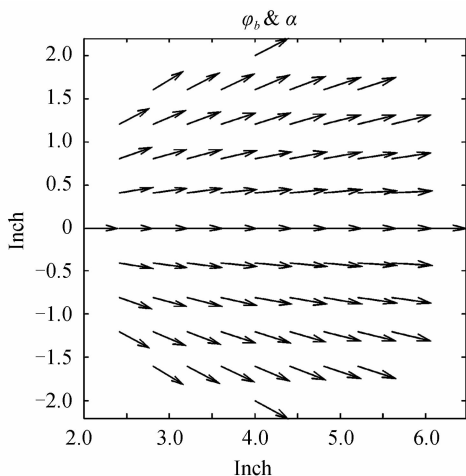


图5 边缘材料的应力双折射分布

Fig. 5 Birefringence distribution of materials at the edge

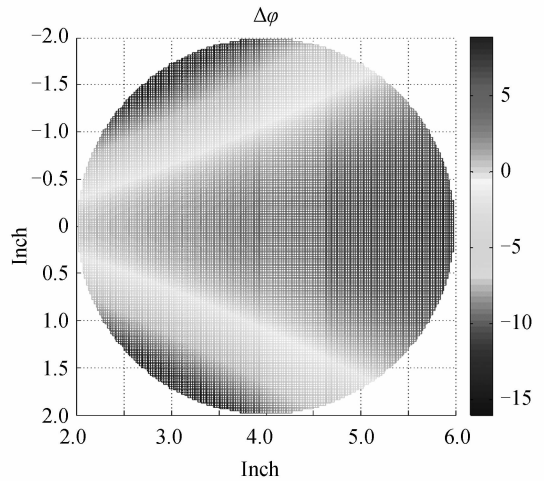


图6 边缘材料的检测误差

Fig. 6 Testing error of materials at the edge

差远小于中心.因此,选择大口径材料的边缘部分制造偏振相移干涉用的标准镜头及其他元件可以提高检测准确度.

4 结论

标准镜头的应力双折射是偏振相移干涉检测中的主要误差源之一.分析发现,由应力双折射引起的检测误差与多个因素有关,包括 CCD 上的测试光和参考光振幅比值、检测腔相位、应力双折射的大小和方向等.1根干涉条纹内检测误差出现2个周期的分布.当应力双折射方向的范围超过 90° 时,检测误差为应力双折射的4倍.当应力双折射的方向具有较好的一致性时,可以显著减小检测误差.当采用偏振相移干涉进行超精密检测时,需要限制应力双折射产生的检测误差,可以依据本文的分析方法对标准镜头等元件进行指标规划.

参考文献

- [1] MALACARA D. Optical shop testing[M]. Wiley, 1992.
- [2] PHILLION D W. General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(31): 8098-8115.
- [3] LIU Bo, GUO Jian-ying, SUN Yong-quan. Modeling control for PZT micro-displacement actuator [J]. *Optics Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1503-1509. 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制 [J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(6): 1503-1509.
- [4] MILLERD J, BROCK N, HAYES J, et al. Modern approaches in phase measuring metrology[C]. SPIE, 2005, **5856**: 14-22.
- [5] TAKEDA M. Temporal versus spatial carrier techniques for heterodyne interferometry[C]. SPIE, 1987, **813**: 329-330.
- [6] TAKEDA M. Spatial-carrier fringe-pattern analysis and its applications to precision interferometry and profilometry: An overview[J]. *Industrial Metrology*, 1990, **1**(2): 79-99.
- [7] CHATTERJEE S, KUMAR Y P, BHADURI B. Measurement of surface figure of plane optical surfaces with polarization phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(2): 268-274.

- [8] CHATTERJEE S, KUMAR Y P. Polarization phase-shifting Fizeau interferometer with a cyclic path optical configuration [J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(11): 115601.
- [9] BROCK N, HAYES J, KIMBROUGH B, *et al.* Dynamic Interferometry[C]. SPIE, 2005, **5875**: 58750F.
- [10] MILLERD J, BROCK N, HAYES J, *et al.* Pixelated phase-mask dynamic interferometry[C]. SPIE, 2004, **5531**: 304-314.
- [11] YANG Jun, LIU Zhi-hai, YU AN Li-bo. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 364-369.
杨军, 刘志海, 苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 364-369.
- [12] LI Xia, YUAN Yan, ZHAO Jian-ke. Microstress installation and experiment result of the interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 918-921.
李霞, 袁艳, 赵建科. 干涉仪的微应力安装力学分析以及试验结果[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 918-921.
- [13] ZHAO C, KANG D, BURGE J H. Effects of birefringence on Fizeau interferometry that uses a polarization phase-shifting technique[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(35): 7548-7553.
- [14] GHOSH N, OTANI Y, BHATTACHARYA K. Generation of collinearly propagating orthogonally polarized beams[J]. *Optik*, 2011, **122**(13): 1164-1168.
- [15] MENESES-FABIAN C, RIVERA-ORTEGA U. Phase-shifting interferometry by wave amplitude modulation; general case[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(7): 905-909.
- [16] RIVERA-ORTEGA U, MENESES-FABIAN C, RODRIGUEZ-ZURITA G. Inhomogeneous phase-visibility modulating interferometry by space on-off non-quadrature amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2013, **22**(15): 17421-17434.
- [17] REN Huan, MA Li, LIU Xu, *et al.* Optical element test with multiple surface interference [J]. *Optics Precision Engineering*, 2013, **21**(5): 1145-1150.
任寰, 马力, 刘旭, 等. 多表面干涉下的光学元件面形检测[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(5): 1145-1150.
- [18] GU Yuan, PAN Ying-jun, HUANG Shang-lian. Measuring method of pressure-induced birefringence in single-mode fibre based on the detecting technology of state of polarization[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **26**(8): 703-706.
古渊, 潘英俊, 黄尚廉. 一种基于偏振态检测技术的单模光纤应力双折射检测法[J]. *光学学报*, 1997, **26**(8): 703-706.