

基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪

王利娟 刘立人 栾竹 孙建锋 周煜

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 相移雅满横向剪切干涉仪非常适合于达到衍射极限的光束的波面检测。为了改进现有的在两路剪切光束中直接插入起偏器的相移雅满剪切干涉仪,提出了一种基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪。该剪切干涉仪利用雅满平板前后表面的反射进行分束并形成两路干涉光束,两路干涉光束分别通过剪切平板后偏振合束并进行偏振移相。它保持了常规雅满剪切干涉仪的光路结构,提高了剪切干涉图的对比度,不再存在插入起偏器引入测量误差的问题。构建了改进前、后的两种相移雅满双剪切干涉仪,并进行了相应的对比实验,实验结果很好地验证了基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪的实用性。

关键词 测量;相移;雅满剪切干涉仪;偏振合束;波前

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0608002

Phase Shifting Jamin Shearing Interferometer Based on Polarization Combination

Wang Lijuan Liu Liren Luan Zhu Sun Jianfeng Zhou Yu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The phase-shifting Jamin shearing interferometer is very fit for measurement of diffraction-limited wavefront. To improve the performance of existing phase-shifting Jamin shearing interferometers with two polarizers, a phase-shifting Jamin shearing interferometer based on polarization combination is proposed. In the interferometer, the beam to be measured is reflected by two surfaces of the Jamin plate to form two interfering beams. They are polarized and combined to form a polarization phase-shifting interferogram. The interferometer keeps up the optical configuration and improves fringe visibility. Two kinds of phase-shifting Jamin double-shearing interferometers before and after improvement are built for experiments. Results show that the usefulness of the interferometer is verified.

Key words measurement; phase shifting; Jamin shearing interferometer; polarization combination; wavefront

OCIS codes 050.5080; 120.3180; 220.4840

1 引 言

在星间激光通信中,激光束要求具有非常高的准直度以获得数千公里的传输距离。激光束的发散角达到了衍射极限,其大小为微弧度量级。面向这样一种达到衍射极限的激光束的测量,本课题组已经成功研发了雅满双剪切干涉仪,其可探测波前高度在 $\lambda/4$ 左右^[1~3],但是该仪器只能利用条纹跟踪方法对剪切干涉图进行处理以获得波前高度。为了提高其灵敏度并实现复杂波面的测量,需要在该干

涉仪中引入相移技术^[4~6]。

对于采用楔形平板作为剪切元件的雅满剪切干涉仪,可以移动楔形平板改变光程差来实现相移^[7,8],但是楔形平板旋转改变其剪切量后,则在移相过程中需要改变并精确控制楔形平板的移动量,将使相移器变得非常复杂。为了弥补其不足,引入了偏振相移技术来形成偏振相移雅满剪切干涉仪,它保持了原有的等光程干涉、剪切量可调的特性^[9,10]。现有的偏振相移雅满剪切干涉仪是插入起

收稿日期: 2011-12-28; **收到修改稿日期**: 2012-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(60807024)资助课题。

作者简介: 王利娟(1974—),女,高级工程师,主要从事光机械设计与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: siom_wanglijuan@yahoo.com.cn

偏器来获得偏振方向相互垂直的两路干涉光束,即分别为垂直于纸面的偏振分量(s分量)和平行于纸面的偏振分量(p分量)。在此种偏振相移雅满剪切干涉仪中,起偏器的面形误差将形成波面测量结果中的系统误差,而起偏器如偏振片、偏振棱镜的面形误差一般难以控制,因此起偏器的面形质量将严重影响波面测量结果。同时由于s、p分量的反射率差异很大,难以获得高的条纹对比度。

为了解决现有偏振相移雅满剪切干涉仪中的问题,本文提出了一种基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪,构建了改进前、后的两种相移雅满双剪切干涉仪并开展了对比实验,利用实验结果验证了基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪的有效性。

2 原 理

相移雅满剪切干涉仪主要由偏振雅满剪切干涉仪和偏振相移器组成,其光学原理如图1所示。偏振雅满剪切干涉仪的光路结构与原有雅满剪切干涉仪相同,主要包括第一、第二雅满平板和第一、第二剪切平板,它们的入射面均与纸面平行。两块雅满平板具有相同的光学参数,两块剪切平板具有相同的光学参数和相反の入射角度。在图1中,第一剪切平板与第二剪切平板也可以分别是一对楔角相

反、上下叠放的楔形平板组合,则构成了偏振雅满双剪切干涉仪。与原有雅满剪切干涉仪不同的是在第二雅满平板的前表面下半部分镀有偏振分光薄膜,它透射p分量而反射s分量。待测光束以45°入射角入射在第一雅满平板后分成两束,第一雅满平板前表面反射的第一剪切光束B₁经过第一剪切平板后被第二雅满平板的后、前表面反射两次再从其后表面出射,第一雅满平板后表面反射形成的第二剪切光束B₂经过第二剪切平板后被第二雅满平板透射,它们由于两块剪切平板的反向旋转形成具有一定剪切量的两路光束。由于第一剪切光束B₁与第二剪切光束B₂在第二雅满平板的偏振分光薄膜处进行偏振合束,它们只能是第一剪切光束B₁中的s分量与第二剪切光束B₂中的p分量,从而获得了偏振方向相互垂直的两路线偏振干涉光束,即干涉光束B_s和干涉光束B_p。

偏振相移器由λ/4波片和检偏器构成,λ/4波片的快轴与纸面成45°夹角,检偏器可以旋转以改变其透光轴方向。偏振方向相互垂直的干涉光束B_s和干涉光束B_p经过偏振相移器后分别变为左旋、右旋圆偏光,当检偏器旋转时将产生与检偏器方位角相关的相移干涉图。

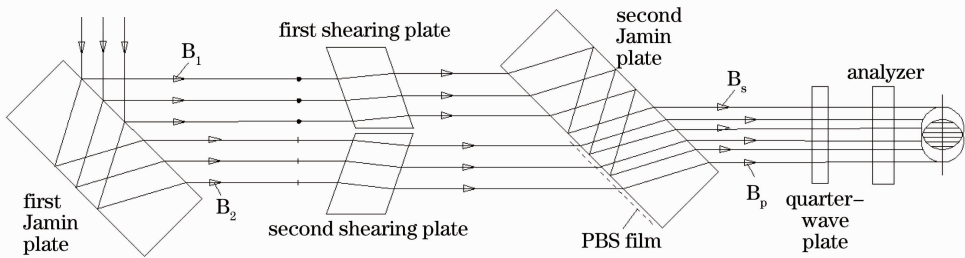


图1 基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of phase-shifting Jamin shearing interferometer based on polarization combination

在图1中,若待测光束为自然光或退偏光,则其中的s分量、p分量相等。若待测光束为偏振光,则可以调整待测光束的方位角使其分解后的s分量、p分量相等。因此干涉光束B_s和B_p对应的初始光强均可以表达为I₀/2,其中I₀为待测光束的光强。由于干涉光束B_s和B_p在剪切平板处均为小角度入射且入射角相等,通过剪切平板的透射率可以认为相等。同时,干涉光束B_s和B_p在偏振分光薄膜处分别被反射、透射后的出射角度相同,故偏振分光薄膜分别对干涉光束B_s和B_p的反射率与透射率也可以认为相等。在不考虑剪切平板与偏振分光薄膜后,干涉光束B_s被两块雅满平板透射两次、反射两次,

干涉光束B_p被两块雅满平板透射三次、反射一次,则干涉光束B_s和B_p的强度分别可以表达为

$$I_s = \frac{1}{2} T_s^2 R_s^2 I_0, \quad (1)$$

$$I_p = \frac{1}{2} T_p^3 R_p I_0, \quad (2)$$

式中R_s和T_s分别为s分量的反射率与透射率,R_p和T_p分别为p分量的反射率与透射率。不妨设被测光束为近红外光束,两块雅满平板的材料为K9玻璃,则对应的折射率为1.51。在45°入射角条件下,根据菲涅耳公式可以得到T_s和T_p分别为0.906和0.991,R_s和R_p分别为0.094和0.009。此时I_s和I_p分别可以写作

$$I_s = 0.0036I_0, \quad (3)$$

$$I_p = 0.0044I_0. \quad (4)$$

可见干涉光束 B_s, B_p 的强度相当。对于剪切干涉图中的一点 (x, y) , 干涉光强可以表达为^[11]

$$I(x, y) = I_s + I_p + 2\sqrt{I_s I_p} \cos[\sigma(x, y) + \phi], \quad (5)$$

$$\sigma(x, y) = \frac{2\pi\Delta w(x, y)}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\phi = 2\beta, \quad (7)$$

式中 $\sigma(x, y), \Delta w(x, y)$ 分别为波面横向剪切产生的相位差分布和光程差分布, λ, β 分别为波长和检偏器的方位角。由(5)式可以得到剪切干涉图的对比度 K 为

$$K = \frac{2\sqrt{I_s I_p}}{I_s + I_p}. \quad (8)$$

将(3)式和(4)式代入(8)式得到对比度 K 为 0.995, 因此基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪可以获得高的对比度。

在相移过程中, 将检偏器的方位角依次设置为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° , 对应的相移量分别为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° , 此时剪切干涉图中一点 (x, y) 的干涉光强分别表示为 I_1, I_2, I_3 和 I_4 , 利用四步相移算法可以计算出相位差分布为

$$\sigma(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right). \quad (9)$$

通过旋转检偏器来设置不同的方位角以获得不同的相移量, 还可以利用三步相移算法、五步相移算法甚至任意步距算法来计算相位差分布。利用(9)式计算出的相位差进行解包裹后可以得到波面剪切产生的连续相位差分布, 利用剪切干涉波前重建算法可以求解出被测光束的波前分布。在高对比度的相移剪切干涉图中, 相移算法和波前重构算法本身都具有高的精度, 例如 $\lambda/100$ 以上, 同时偏振相移光路容易获得准确的相移量, 故相移雅满剪切干涉仪的测量精度取决于雅满干涉光路产生的测量误差。在图1所示的雅满干涉光路中, 偏振分光薄膜处及其后面的光路是共光路的, 而在两块雅满平板之间的分离光路中不再存在面形误差难以控制的检偏器, 故主要的误差源是雅满平板和剪切平板的面形误差。雅满平板和剪切平板获得优于 $\lambda/20$ 甚至更高的面形精度是可以实现的, 因此基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪易于获得高的测量精度。

可见基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪保持了常规雅满剪切干涉仪的光路结构, 仍具有等光程干涉、剪切量可调等特性。它提高了剪切干涉图的

对比度, 不再存在插入起偏器引入测量误差的问题。

3 实 验

实验中的待测光束是口径为 50 mm 的准直激光束(波长为 632.8 nm), 它由氦氖激光器、 $\lambda/2$ 波片、聚焦透镜、针孔和准直透镜组成的扩束系统所形成。其中氦氖激光器为输出线偏振激光的外腔式氦氖激光器, $\lambda/2$ 波片用以改变输出光束的偏振方向, 聚焦透镜为 $40\times$ 放大倍率的显微物镜, 针孔的大小为 $5 \mu\text{m}$, 准直透镜焦距为 500 mm 的平行光管。氦氖激光器出射的激光束由聚焦透镜聚焦在针孔上进行滤波, 滤波后的激光束由准直透镜进行准直形成口径为 50 mm 的平行光束, 通过旋转 $\lambda/2$ 波片可以使待测光束的偏振方向与相移雅满双剪切干涉仪的入射面成 45° 角。

实验过程中, 首先构建了相移雅满双剪切干涉仪对被测光束进行剪切干涉测量以获得相移剪切干涉图。相移雅满双剪切干涉仪的光路如图2所示, 楔角相反、上下叠放的楔形平板 W_1 和 W_3 组合对剪切光束 B_1 进行双剪切, 楔角相反、上下叠放的楔形平板 W_2 和 W_4 组合对剪切光束 B_2 进行双剪切。图2中的第一、第二雅满平板具有相同的光学参数, 其材料为 K9 玻璃, 尺寸为 $155 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。第二雅满平板的前表面下半部分镀有偏振分光薄膜, 其偏振度优于 $100:1$, 对 p 分量的透射率大于 96% , 对 s 分量的反射率大于 99% 。楔形平板 W_1, W_2, W_3 和 W_4 的光学参数相同, 其材料为 K9 玻璃, 宽度、厚度分别为 60 mm 和 40 mm, 楔角为 $20''$ 。两个楔形平板组合均可以在入射面内同时反向转动以改变剪切量。 $\lambda/4$ 波片是相位延迟量精度优于 $\lambda/300$ (λ 为 632.8 nm) 的石英波片, $\lambda/4$ 波片的快轴与入射面成 45° 。由于相位差分布的测量误差与 $\lambda/4$ 波片相位延迟量误差的平方成线性关系^[12,13], 因此 $\lambda/4$ 波片小于 $\lambda/300$ 的相位延迟量误差的影响可以忽略。检偏器为消光比 $100:1$ 的偏振片, 检偏器可以旋转以改变其透光轴方位。检偏器的消光误差只是在干涉图中产生背景而降低干涉条纹的对比度, 利用四步相移等算法求解相位差分布时干涉条纹的背景被扣除^[12,14], 故可以消除消光误差的影响。检偏器的透光轴方向与 $\lambda/4$ 波片的快轴平行时为初始方位角, 此时采集的剪切干涉图如图3(a)所示。然后依次旋转检偏器使其方位角为 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 和 180° 时采集到的相移 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 和 360° 的剪切干涉图分别如图3(b)~(e)所示。由

图 3 可以看出,当相移增加 90° 时干涉条纹移动半个条纹间隔,如图 3(a)和(c)、图 3(b)和(d)、图 3(c)和(e)所示。当相移增加 180° 时干涉条纹移动一个条

纹间隔,如图 3(a)和(e)所示。可见,图 3 所示的实验结果很好地说明了该相移雅满横向剪切干涉仪的相移效果。

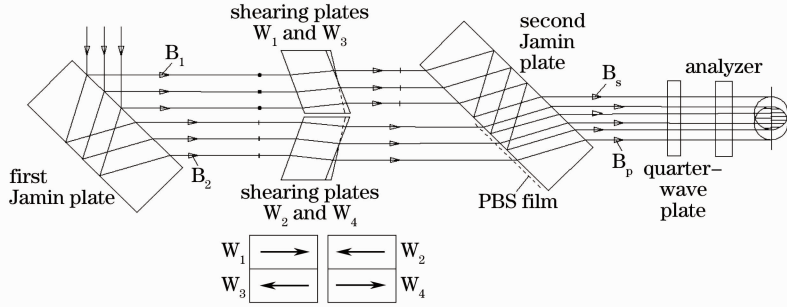


图 2 基于偏振合束的相移雅满双剪切干涉仪实验光路

Fig. 2 Optical layout of phase-shifting Jamin double-shearing interferometer with polarization combination

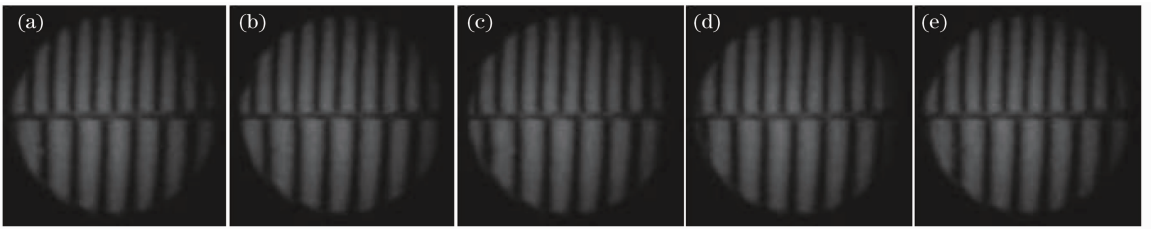


图 3 采用偏振合束的相移雅满双剪切干涉图

Fig. 3 Phase-shifting Jamin double-shearing interferograms with polarization combination

为了说明所给出的相移雅满剪切干涉仪对测量精度和对比度的改善,构建了如图 4 所示的相移雅满双剪切干涉仪,对被测光束进行剪切干涉测量并获得相移剪切干涉图来进行对比分析。图 4 中的光路是将图 2 中的第二雅满平板绕其长度方向的对称轴翻转 180° , $\lambda/4$ 波片和检偏器绕第二雅满平板旋转 90° 并插入两块起偏器所形成,即形成了参考文献[9,10]给出的在两路剪切光束中直接插入起偏器的相移雅满双剪切干涉仪。图 4 中两块检偏器为消光比为 $100:1$ 的偏振片,它们的透光轴分别调整为平行、垂直于入射面。若保持图 3 中的小剪切量不变,则干涉图中双剪切效果不明显。若保持干涉光束 B_s 和 B_p 的初始光强相等,则干涉图的对比度很低。在增加了横向剪切量、调整了初始光强差异的情况下,检偏器的方位角为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 和

180° 时采集到的相移 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 和 360° 的剪切干涉图分别如图 5(a)~(e) 所示。与图 3 相类似,当相移增加 90° 时干涉条纹移动半个条纹间隔,

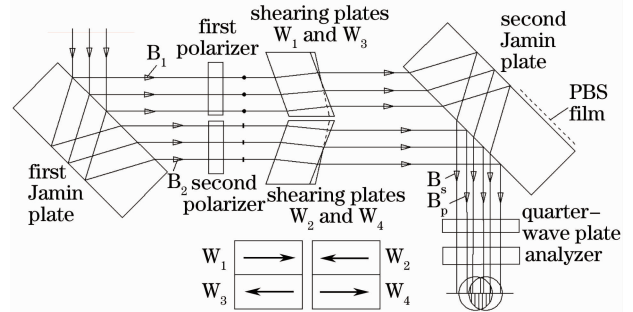


图 4 在两路剪切光束中直接插入起偏器的相移雅满双剪切干涉仪实验光路

Fig. 4 Optical layout of phase-shifting Jamin double-shearing interferometer by inserting polarizers

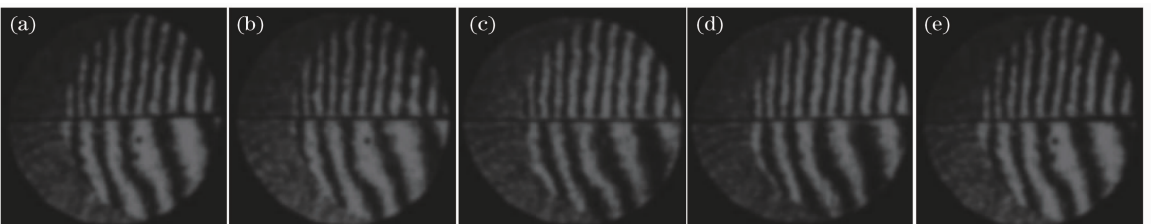


图 5 在两路剪切光束中直接插入起偏器的相移雅满双剪切干涉图

Fig. 5 Phase-shifting Jamin double-shearing interferogram with insertion of polarizers

如图 5(a)和(c)、图 5(b)和(d)、图 5(c)和(e)所示。当相移增加 180° 时干涉条纹移动一个条纹间隔,如图 5(a)和(e)所示。可见,图 3 所示的相移雅满剪切干涉仪同样可以实现相移。

与图 3 中的剪切干涉图对比可以看出,图 5 中的干涉条纹明显弯曲,可见两块起偏器的插入改变了待测波面。这主要是由起偏器的面形误差所致,且该误差无法通过相移算法来减小或者消除。实际上,难以获得面形误差很小的起偏器或者挑选两块面形误差相同的起偏器,因此起偏器的面形质量将严重影响波面测量结果。由于起偏器面形误差影响,图 4 中的测量光路在小剪切量条件下不能获得明显的双剪切效果,故只有在增加了剪切量后才能获得图 5 中的剪切干涉图。

图 5 中的干涉条纹对比度比图 3 中的干涉条纹对比度低,且只显示出两束干涉光束中完整的一束而另一束不明显,这是由于被测光束通过雅满平板时干涉光束 B_s 和 B_p 的反射率与透射率差异所造成。图 4 中干涉光束 B_s 和 B_p 通过均被两块雅满平板透射二次、反射二次,则干涉光束 B_s 和 B_p 的强度分别可以表达为

$$I_s = \frac{1}{2} T_s^2 R_s^2 I_0, \quad (10)$$

$$I_p = \frac{1}{2} T_p^2 R_p^2 I_0. \quad (11)$$

若两块雅满平板的材料为 K9 玻璃,对应的折射率为 1.51。在 45° 入射角条件下,根据菲涅耳公式可以得到 T_s 和 T_p 分别为 0.906 和 0.991, R_s 和 R_p 分别为 0.094 和 0.009,此时 I_s 和 I_p 分别可以写作

$$I_s = 0.0036 I_0, \quad (12)$$

$$I_p = 0.00004 I_0. \quad (13)$$

可见干涉光束 B_s 的强度远大于 B_p 的强度,它们相差近 2 个数量级,因此直接插入起偏器的相移雅满双剪切干涉仪难以获得高的对比度。由于干涉光束 B_s 和 B_p 的反射率与透射率的差异太大,图 4 中的测量光路在干涉光束 B_s 和 B_p 的初始光强相等的条件下不能获得高对比度的剪切干涉图,故只有在调整待测光束的方位角使干涉光束 B_s 的初始光强远小于 B_p 的初始光强后才能获得图 5 中的剪切干涉图,其对比度仍然不高。

由上述对比实验结果可知,基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪不存在插入起偏器引入测量误差的问题,提高了剪切干涉图的对比度,进而可以获得高的测量精度。

4 结 论

提出了一种基于偏振合束的相移雅满剪切干涉仪。该剪切干涉仪由偏振雅满剪切干涉仪和偏振相移器组成。偏振雅满剪切干涉仪由常规雅满剪切干涉仪在其第二雅满平板上镀制偏振分光薄膜所形成,它保持了原有雅满剪切干涉仪的光路结构,不存在插入起偏器引入测量误差的问题,提高了剪切干涉图的对比度。构建了改进前、后的两种相移雅满横向剪切干涉仪并开展了对比实验,实验结果很好地验证了基于偏振合束的相移雅满横向剪切干涉仪的有效性。

参 考 文 献

- Luan Zhu, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Jamin double-shearing interferometer for diffraction-limited wave-front test[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(9): 1819~1824
- Liu Hongzhan, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Measurement of the wavefront of a laser diode system for intersatellite communication by a Jamin double-shearing interferometer[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2005, **7**(3): 142~146
- Xu Rongwei, Luan Zhu, Liu Hongzhan *et al.*. Measurement of the diffraction-limit wavefront with double-shearing interferometers[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(2): 164~171
- DeVon W. Griffin. Phase-shifting shearing interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(3): 140~141
- Lee Hyunho, You Janghoon, Park Seunghan. Phase-shifting lateral shearing interferometer with two pairs of wedge plates[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2243~2245
- Song Jae Bong, Lee Yun Woo, Lee Yonghee. Simple phase-shifting method in a wedge-plate lateral-shearing interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(20): 3989~3992
- Chatterjee Sanjib. Measurement of single-pass wavefront distortion of optical components with phase shifting Jamin interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(4): 872~879
- Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Simple phase-shifting method in Jamin double-shearing interferometer for testing of diffraction-limited wavefront[C]. *SPIE*, 2011, **8162**: 81620S
- Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Polarization phase-shifting double-shearing interferometer for the test of the diffraction-limited wavefront[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67091H
- Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Phase shifting Jamin lateral shearing interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1156~1159
王利娟,刘立人,栾竹等.相移雅满横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1156~1159
- Mahendra P. Kothiyal, Claude Delisle. Shearing interferometer for phase shifting interferometry with polarization phase shifter [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(24): 4439~4442
- Matt Novak, James Millerd, Neal Brock *et al.*. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(32): 6861~6868
- Chunyu Zhao, Dongyel Kang, James H. Burge. Effects of birefringence on Fizeau interferometry that uses a polarization phase-shifting technique[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7548~7553
- Kong Meimei, Gao Zhishan, Chen Lei *et al.*. Cyclic radial shearing interferometry based on polarization phase-shifting technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 127~131
孔梅梅,高志山,陈磊等.基于偏振移相的环路径向剪切干涉[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 127~131