

空域移相偏振点衍射波前检测技术

郑东晖 李金鹏 陈磊 朱文华 韩志刚 乌兰图雅 郭仁慧

Spatial phase-shifting polarization point-piffraction interferometer for wavefront measurement

Zheng Dong-Hui Li Jin-Peng Chen Lei Zhu Wen-Hua Han Zhi-Gang Wulan Tu-Ya Guo Ren-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 114203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.114203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无衍射 Mathieu 光束自重建特性的理论和实验研究

Theoretical and experimental studies on the self-reconstruction property of non-diffracting Mathieu beam

物理学报.2015, 64(1): 014201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014201>

一种基于双光束干涉的分级身份认证方法

Multi-level authentication based on two-beam interference

物理学报.2013, 62(6): 064205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.064205>

静态傅里叶变换超光谱全偏振成像技术

Static Fourier-transform hyperspectral imaging full polarimetry

物理学报.2013, 62(4): 044206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044206>

目标粗糙对合成孔径激光雷达回波的退相干效应

Decoherence effect of target roughness in synthetic aperture ladar

物理学报.2013, 62(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024204>

光谱分辨率可调的新型干涉成像光谱技术研究

Spectral zooming birefringent imaging spectrometer

物理学报.2013, 62(2): 024205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024205>

空域移相偏振点衍射波前检测技术*

郑东晖¹⁾ 李金鹏²⁾ 陈磊^{1)†} 朱文华¹⁾ 韩志刚³⁾ 乌兰图雅¹⁾ 郭仁慧¹⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (中国科学院南京天文仪器有限公司, 南京 210042)

3) (南京理工大学协同创新中心, 南京 210094)

(2016年1月26日收到; 2016年2月11日收到修改稿)

点衍射干涉仪结构简单、共光路、测量精度高, 空域移相干涉仪抗振性能优越, 两者在波前检测领域获得了广泛的应用. 本文采用激光打孔技术, 通过在金属纳米线栅偏振片上制备小孔, 制作了偏振点衍射板; 结合分光结构的空域移相技术, 搭建了空域移相偏振点衍射干涉仪, 并对一焦距为550 mm, $F_{\#}10$ 的平行光管准直物镜透射波前进行测量, 与法国Phasics公司生产的商业化波前传感器SID4的测量结果相比较, 两者峰谷值相差 0.09λ , 均方根值相差 0.012λ ; 利用35项Zernike多项式拟合两者的测量结果, 将拟合得到的系数在同一坐标轴下绘制成两条曲线, 两者基本重合, 从而验证了所搭建的空域移相偏振点衍射波前检测装置的测试精度. 从而在传统点衍射干涉仪的基础上引入了空域移相技术, 实现了波前的高分辨率、高精度、实时检测, 并且提高了对振动、气流等环境因素的抗干扰能力.

关键词: 测量, 点衍射, 偏振, 空域移相

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Ja, 42.25.Fx, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.65.114203

1 引言

波前检测在光学加工、军事、医疗和天文等领域有着重要的应用, 通过对光学波前的测量, 可以得到光学表面的形貌信息并反映光学系统的性能. 学者们在波前检测方面进行了大量的研究, Luo等^[1,2]对相位差波前检测法进行了深入的研究, 并且结合衍射光栅提出了一种改进型相位差波前传感器, 实现对大像差波面的高分辨检测; Mu和Zhang^[3]基于两块光轴互相垂直的萨瓦板提出了一种新型静态偏振干涉仪, 用于动态上层大气风场的测量; 李宏超等^[4]提出了两种视场偏移哈特曼波前传感器, 用于探测白天条件下强背景中目标信号的波前信息. 在众多的波前检测方法中, Smartt和Strong^[5]提出的点衍射干涉以其不需要

参考面、测试精度高等特点得到了广泛的应用, 但其共光路结构导致难以引入移相技术. 针对这一问题, 国内外专家学者进行了广泛的研究, 提出了一系列的相移点衍射干涉术: Paturzo等^[6]在铌酸锂晶体上沉积铝膜制作点衍射板, 根据其光电效应在点衍射干涉仪中引入移相; Claudio等^[7]研制了一种特殊的液晶波片点衍射板, 通过改变施加于点衍射板上的电压改变波片的延迟量, 进而改变参考光与测试光之间的移相量; Wang等^[8]将参考光与测试光分离, 采用压电陶瓷推动测试镜, 通过改变光程差实现移相; Gao等^[9]采用光栅移相方案, 搭建了双光栅准共光路点衍射干涉系统, 通过横移其中一个光栅引入移相; 美国劳伦斯伯克利国家实验室在光栅移相方案上进行了相应的研究, 并将检测波段扩展到了X-射线光波段^[10]; 日本的Sugisaki等^[11,12]也在光栅移相点衍射干涉仪上做

* 国家自然科学基金(批准号: U1231111, 61108041, 61405092, 61505082, 11402120)和江苏省研究生科研创新计划(批准号: KYZZ15_0121)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenlei@njjust.edu.cn

了大量的工作;上海光机所郑艳玲等^[13]在普通点衍射仪的基础上引入偏振技术,解决了点衍射干涉仪中光强匹配问题;白福忠和饶长辉^[14]对相移点衍射干涉仪也进行了研究,并且基于傅里叶光学理论,详细分析了针孔直径对参考波前质量以及光强通过率的影响.以上方案均可以引入移相技术,如果可以制作一种特殊的点衍射板得到偏振方向正交的参考光与测试光,那么就能够做空域移相偏振点衍射干涉仪 (spatial phase-shifting polarization point-diffraction interferometer). 基于这个思想, Millerd 等^[15]采用聚焦离子束刻蚀法,在纳米线栅偏振片上刻蚀小孔制备偏振点衍射板 (polarization point-diffraction plate, PPDP), 实现了对衍射参考光偏振态的调制和共光路动态测量;经过进一步研究, Neal 和 Wyant^[16]提出了一种电光调制的偏振点衍射板,通过改变光电晶体电压引入移相,实现偏振移相点衍射干涉,这方面的工作国内尚无相关的报道.

本文采用激光打孔技术,在金属纳米线栅偏振片上实现偏振点衍射板的制作,同时结合分光结构空域移相系统,搭建了空域移相偏振点衍射干涉仪,结合传统点衍射干涉仪与空域移相干涉仪的优点,实现波前的高分辨率、高精度、实时检测,同时提高了对振动、气流等因素的抗干扰能力.

2 原理

2.1 激光打孔

激光打孔是利用激光辐射的高功率密度及高空间相干性,将激光束聚焦到工件表面上,在工件的指定位置上打出一个具有一定直径和深度的孔.

对于大多数脉冲激光器来讲,均匀激光照射到半无限平板表面产生的温度 T_0 为^[17]

$$T_0 = \frac{2P_0}{\pi a^2} \frac{\sqrt{kT_u}}{K} \frac{1}{\sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

式中, P_0 为表面吸收的激光辐射功率 (W), k 为材料热扩散率 (cm^2/s), K 为材料热导率 ($\text{W}/\text{cm} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}$), a 为表面光斑的半径, T_u 为激光脉冲的持续时间. 对发散角为 θ_0 的单模光束,经过一个焦距为 f 的透镜后,其焦斑半径 a 为

$$a = f \cdot \theta_0. \quad (2)$$

联立 (1) 和 (2) 式可得

$$T_0 = \frac{2P_0}{\pi(f\theta_0)^2} \frac{\sqrt{kT_u}}{K} \frac{1}{\sqrt{\pi}}. \quad (3)$$

由 (3) 式可以看出,通过提高激光的辐射功率密度,使激光在工件表面产生的温度 T_0 升高,达到工件材料蒸发汽化温度,引起工件表面的材料瞬时熔化并大量汽化,在激光作用点上形成一个凹坑.随着激光能量的不断输入,凹坑内的汽化程度不断加剧,在工件表面迅速打出一个具有一定直径和深度的小孔.

在满足达到工件表面的激光功率密度的情况下,通过控制激光束的能量来控制孔的直径和深度.根据激光与材料相互作用的研究分析,激光打孔的孔径和孔深与激光能量等参数的关系可以表示为^[17,18]

$$d = 2 \left[\frac{3E}{\pi(L_v + 2L_m)} \right]^{1/3}, \quad (4)$$

$$h = \left[\frac{3E}{\pi \tan^2 \varphi (L_v + 2L_m)} \right]^{1/3}, \quad (5)$$

式中, E 为激光脉冲总能量, L_v 为材料的汽化潜热, L_m 为材料的熔化潜热, φ 为激光束进入材料表面的发散半角.

由 (4) 和 (5) 式可以看出,改变激光束的能量,孔径与孔深随之改变,通过控制激光束的能量,可以在指定材料的工件表面打出需要的小孔.

2.2 偏振点衍射板

偏振点衍射板在普通点衍射板的基础上引入偏振特性,能够实现对衍射参考光与透射测试光偏振态的调制.如图 1(a) 所示,偏振点衍射板中间区域为一通孔,由孔直接透射的光束,偏振态与入射光一致,作为测试光;孔外围为竖直方向的纳米线栅结构,由孔衍射的光束,其偏振态受线栅结构的调制,沿水平方向振动,作为参考光.如图 1(b) 所示,该种类型的偏振点衍射板不能产生偏振态正交的参考光与测试光,将测试光 T 分解为水平分量 $T_{\parallel}$ 和竖直分量 $T_{\perp}$,当测试光与参考光通过延迟量不同的波片时,可以在 R 与 $T_{\perp}$ 之间引入不同的延迟量,进而产生多幅移相量不同的移相干涉图;而 $T_{\parallel}$ 与 R 由于偏振方向一致,两者之间不存在相位延迟,产生一组固定的背景条纹.因此,可以通过调整入射光的偏振态,匹配 R 与 $T_{\perp}$ 两者的光强,削弱

背景条纹, 就可以得到对比度良好的空域移相干涉图, 可以进一步实现空域移相偏振点衍射干涉仪.

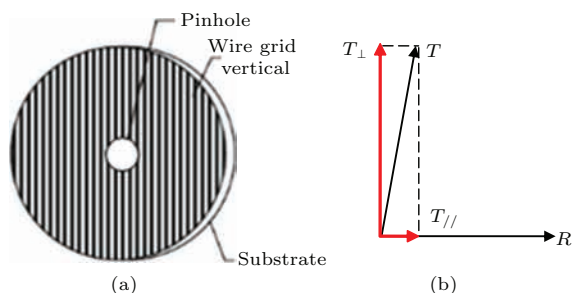


图1 (网刊彩色) 偏振点衍射板 (a) 结构示意图; (b) 参考光与测试光偏振态分析

Fig. 1. (color online) PPDP: (a) Structure; (b) polarization analysis of reference beam and test beam.

2.3 空域移相偏振点衍射干涉斯托克斯矢量分析

如图2所示, 在待测球面波的球心位置放置偏振点衍射板, 小孔衍射参考光 R 与透射测试光竖直

分量 $T_{\perp}$ 合成光束的斯托克斯矢量可以表示为^[19]

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = [a^2 + b^2, a^2 - b^2, 2ab \cos \varphi, 2ab \sin \varphi]^T, \quad (6)$$

式中 a 表示参考光 R 的振幅, b 表示测试光竖直分量 $T_{\perp}$ 的振幅, φ 表示测试光携带的相位信息.

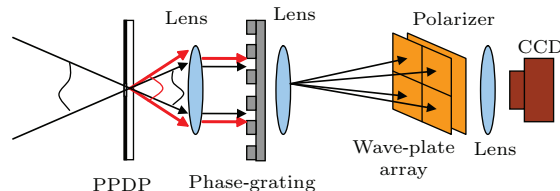


图2 (网刊彩色) 空域移相偏振点衍射干涉仪原理图

Fig. 2. (color online) Principle of spatial phase-shifting polarization point-diffraction interferometer.

测试光与参考光经过二维位相光栅分光, 选取 $(\pm 1, \pm 1)$ 四支衍射效率一致的级次, 分别经过波片组四个延迟量不同的子波片, 再经过偏振片, 得到四幅移相干涉图. 其中快轴方向与水平方向夹角为 γ 、延迟量为 δ 的波片的穆勒矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\gamma + \sin^2 2\gamma \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\gamma \cos 2\gamma & \sin 2\gamma \sin \delta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\gamma \cos 2\gamma & \sin^2 2\gamma + \cos^2 2\gamma \cos \delta & -\cos 2\gamma \sin \delta \\ 0 & -\sin 2\gamma \sin \delta & \cos 2\gamma \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

方案中所采用的波片组四个子波片快轴均沿水平方向, 四个子波片延迟量依次为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, 故 $\gamma = 0$, 波片穆勒矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ 0 & 0 & \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

透振方向与水平方向夹角为 θ 的偏振片的穆勒矩阵

可以表示为

$$\mathbf{M}_P = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

小孔衍射参考光 R 与透射测试光竖直分量 $T_{\perp}$ 合成光束依次经过波片组与偏振片, 其出射光束的斯托克斯矢量可以表示为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_P \mathbf{M}_R \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} a^2 + b^2 + (a^2 - b^2) \cos 2\theta + 2ab \sin 2\theta \cos(\varphi + \delta) \\ (a^2 + b^2) \cos 2\theta + (a^2 - b^2) \cos^2 2\theta + ab \sin 4\theta \cos(\varphi + \delta) \\ (a^2 + b^2) \sin 2\theta + \frac{1}{2}(a^2 - b^2) \sin 4\theta + 2ab \sin^2 2\theta \cos(\varphi + \delta) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

因此 CCD 采集得到干涉图光强表达式可以表示为^[19]

$$I_i = a^2 + b^2 + (a^2 - b^2) \cos 2\theta + 2ab \sin 2\theta \cos(\varphi + \delta_i), \quad (11)$$

式中 $\delta_i = (i - 1)\pi/2$, $i = 1, 2, 3, 4$. 根据四步移相算法, 得到待测波面的相位分布:

$$\varphi = \arctan \frac{I_1 - I_3}{I_4 - I_2}. \quad (12)$$

3 实验系统及测量结果

采用激光打孔技术, 在金属纳米线栅结构偏振片金属膜层上制备小孔. 纳米线栅偏振片膜层材料为铝, 膜层厚度为 100 nm, 采用扫描电子显微镜对纳米线栅偏振片微观结构进行测试, 结果如图 3(a) 所示, 线栅周期为 140.1 nm. 相关的文献^[20–22]分析表明, 所采用的纳米线栅偏振片具有良好的偏振透射率和消光比. 实验过程中, 通过控制皮秒脉冲激光器的能量及脉冲持续时间等, 将纳米线栅偏振片表面铝膜层打穿获得小孔, 采用工具显微镜对小孔进行测试, 结果如图 3(b) 所示, 小孔孔径为 10.2 μm .

根据图 2 所示的原理图, 搭建空域移相偏振点

衍射干涉仪, 工作波长为 532 nm; 采用棋盘型位相光栅分光, 基底材料为熔石英, 光栅周期为 34 μm , 占空比为 0.5, 刻蚀深度 577 nm; 采用波片组作为移相器, 波片组为四分之一波片、半波片、四分之三波片和全波片的胶合件, 四个波片快轴均沿水平方向. 采用该空域移相偏振点衍射干涉仪对一平行光管准直物镜 (焦距: 550 mm, $F_{\#}10$) 进行测量, 测试光路如图 4(a) 所示, 激光束两次通过待测准直物镜. 图 4(b) 所示为实验采集得到四幅空域移相点衍射干涉图.

采用四步移相算法对图 4(b) 所示的空域移相点衍射干涉图进行解算, 得到待测准直物镜的透射波前如图 5(a) 所示, 其峰谷 (peak-to-valley, PV) 值为 0.918λ , 均方根 (root-mean-square, RMS) 值为 0.218λ ; 采用法国 Phasics 公司生产的商业化波前传感器 SID4 在对待测准直物镜的透射波前进行测量, 其结果如图 5(b) 所示, 其 PV 值为 0.828λ ,

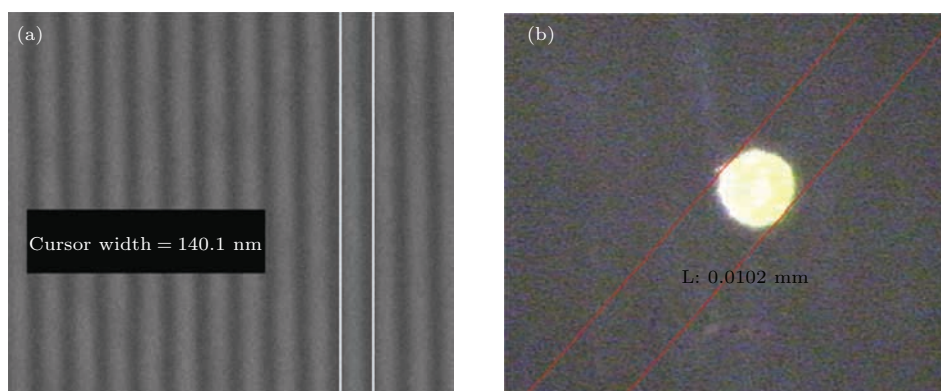


图 3 (网刊彩色) 偏振点衍射板 (a) 纳米线栅偏振片微观结构; (b) 小孔

Fig. 3. (color online) PPDP: (a) Nanowire grid; (b) pinhole.

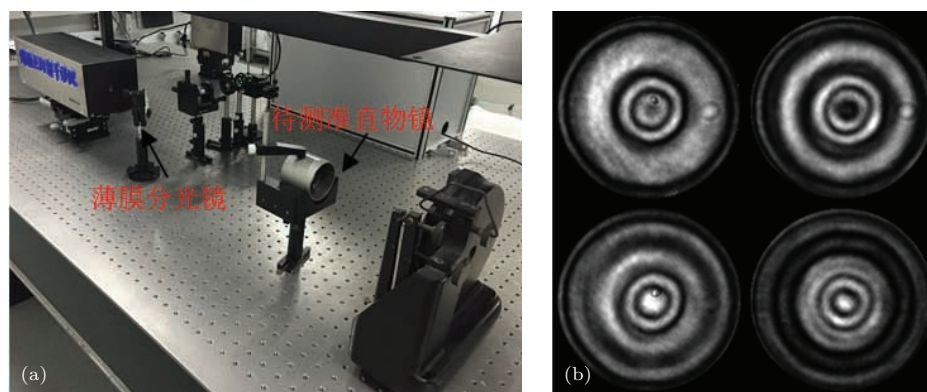


图 4 (网刊彩色) 空域移相偏振点衍射波前检测 (a) 实验装置; (b) 空域移相点衍射干涉图

Fig. 4. (color online) Wavefront measurement with SPSPDI: (a) Experimental apparatus; (b) spatial phase-shifting point-diffraction interferograms.

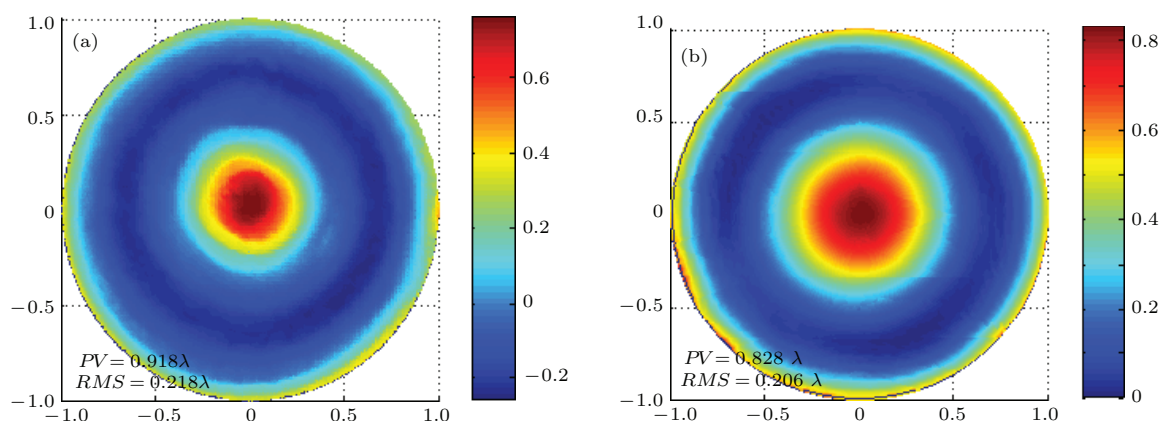


图5 (网刊彩色) 实验结果 (a) 空域移相偏振点衍射干涉仪测量结果; (b) SID4测量结果

Fig. 5. (color online) Experiment results: (a) Measurement result by SPSPDI; (b) measurement result by SID4.

RMS值为 0.206λ . 利用35项Zernike多项式拟合图5(a)和图5(b)所示的波面, 将拟合得到的系数在同一坐标轴下绘制成如图6所示的曲线, 两者基本重合. 通过以上数据的比对可以看出, 两者的测试结果基本符合, 验证了空域移相偏振点衍射干涉仪的测量精度.

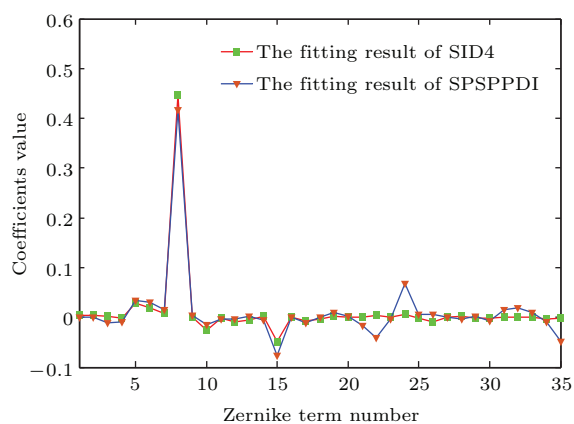


图6 (网刊彩色) Zernike拟合系数曲线

Fig. 6. (color online) Curves of Zernike polynomial fit coefficients.

4 讨论

4.1 小孔直径与待测波前 F 数分析

根据图6所示的拟合结果, 仿真待测入射会聚波前, 分析了小孔衍射残差波面与入射波前 F 数和小孔直径之间的关系. 针对 $F_{\#10}$ 的待测波前, 我们分析了衍射残差波面随小孔孔径的变化情况, 仿真结果如图7所示, 衍射残差波前 PV 值随着孔径的增大而增大, 在孔径为 $10\ \mu\text{m}$ 处, PV 值优于 $\lambda/100$; 针对直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的小孔, 我们分析了衍射残差波面随 F 数的变化情况, 仿真结果如图8所

示, 衍射残差波前 PV 值随着 F 数的增大而减小, 在 $F_{\#10}$ 处, PV 值优于 $\lambda/100$. 以上结果表明所搭建的实验装置中, 衍射参考波面精度 PV 值优于 $\lambda/100$, 满足测量要求.

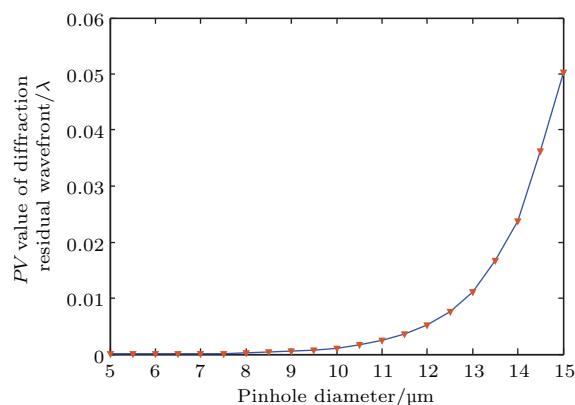
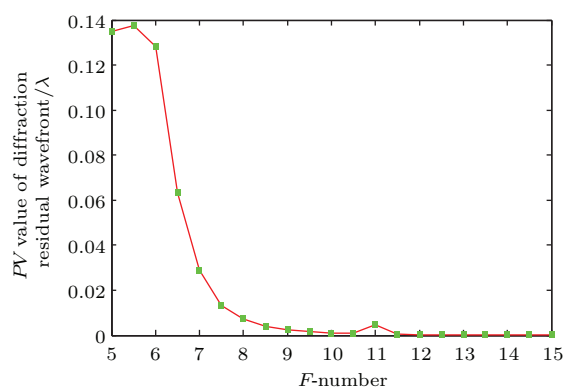


图7 (网刊彩色) 衍射波面精度与小孔直径关系曲线

Fig. 7. (color online) Relationship between diffraction wavefront precision and pinhole diameter.

图8 (网刊彩色) 衍射波面精度与入射波前 F 数关系曲线Fig. 8. (color online) Relationship between diffraction wavefront precision and F -number of incident wavefront.

4.2 波片组延迟量误差

由于受到加工工艺的限制, 实验系统中所采用的波片组的延迟量很难保证依次为 $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π . 通常情况下, 普通波片的延迟量精度一般在 2° 以内, 低级波片的延迟量精度将达到 1° . 设定波片组的延迟量误差在 2° 以内随机取值, 相位恢复误差波面均方根值如图 9 所示.

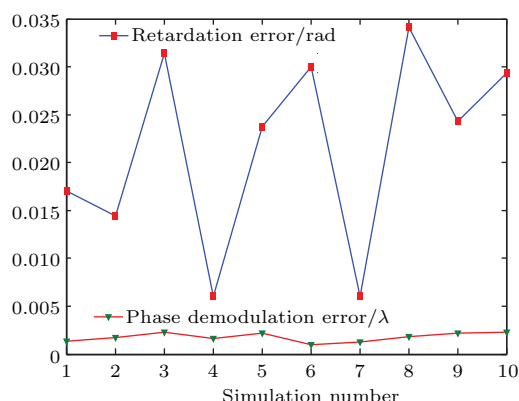


图9 (网刊彩色) 波片组延迟量误差引入的相位解调误差
Fig. 9. (color online) Phase demodulation error caused by retardation error.

由图 9 可以看出, 当波片组延迟量误差在 2° 以内时, 相位恢复精度优于 $\lambda/200$, 因此选用延迟量精度高的低级波片就可以保证系统的精度.

4.3 分光系统误差

实验系统基于光栅分光、波片组移相, 测试光与参考光以发散光束通过波片组. 相关研究指出, 当发散光束通过双折射晶体时, 可以认为携带了一个附加延迟量^[23]:

$$\Delta\delta_i = \delta_i \left\{ \frac{3 \sin^2 j}{2} \left[\frac{\cos^2(\gamma - \kappa)}{2n_0^2} - \frac{\sin^2(\gamma - \kappa)}{2n_e n_0} \right] \right\}, \quad (13)$$

式中 δ_i 是理想相位延迟; κ 是入射面与波片表面的交线和 x 轴夹角, 它的变化范围是 $(0, 2\pi)$; j 为入射角; γ 为光轴方位角. 使用 (13) 式计算得到的延迟量误差可以确定为

$$-\frac{3\delta_i}{4n_0 n_e} \sin^2 j < \Delta\delta_i < \frac{3\delta_i}{4n_0^2} \sin^2 j. \quad (14)$$

选用石英晶体制作的 5 级波片, 其参数 $n_e = 1.54264$, $n_0 = 1.55170$, $\delta_i = 10\pi + \frac{i\pi}{2}$ ($i =$

1, 2, 3, 4), 最大入射角与光束的数值孔径有关, 实验系统中光栅出射光束的数值孔径大致为 0.1, 通过 (14) 式计算得到对应的最大延迟量为 $\pm 1.7^\circ$, 根据 4.2 节波片延迟量误差讨论的结果, 此因素不会引入较大的测量误差.

5 结 论

本文采用激光打孔技术, 在金属纳米线栅偏振片上实现了偏振点衍射板的制备, 实现了传统点衍射干涉术与空域移相技术的相结合, 搭建了偏振点衍射干涉仪, 并且对一焦距为 550 mm, $F_{\#}10$ 的平行光管准直物镜透射波前进行了测量, 与现有的法国 Phasics 公司生产的商业化波前传感器 SID4 相比较, 两者的测量结果基本一致, 验证了空域移相偏振点衍射干涉仪测量结果的可靠性. 所搭建的空域移相偏振点衍射干涉仪充分结合了传统点衍射干涉仪共光路特性以及空域移相干涉仪抗干扰能力强等特点, 实现对波前的高分辨率、高精度、实时检测, 并且提高了抗环境干扰能力.

参考文献

- [1] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094201
- [2] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Li F, Rao C H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069501 (in Chinese) [罗群, 黄林海, 顾乃庭, 李斐, 饶长辉 2012 物理学报 **61** 069501]
- [3] Mu T K, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060702
- [4] Li C H, Xian H, Jiang W H, Rao C H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4289 (in Chinese) [李超宏, 鲜浩, 姜文汉, 饶长辉 2007 物理学报 **56** 4289]
- [5] Smartt R N, Strong J 1972 *J. Opt. Soc. Am.* **62** 726
- [6] Paturzo M, Pignatiello F, Grilli S 2006 *Opt. Lett.* **45** 3463
- [7] Claudio R, Eva O, Claudio I 2013 *Opt. Ex.* **21** 8116
- [8] Wang D D, Wang F M, Yang Y Y 2013 *Optik* **124** 5481
- [9] Gao P, Harder I, Nercissian V, Mantel K, Yao B L 2010 *Opt. Lett.* **35** 712
- [10] Medeck H, Tejnil E, Goldberg K A, Bokor J 1996 *Opt. Lett.* **21** 1526
- [11] Sugisaki K, Okada M, Zhu Y C, Otaki K, Liu Z Q, Kawakami J, Ishii M, Saito J, Murakami K, Hasegawa M, Ouchi C, Kato S, Hasegawa T, Suzuki A, Yokota H, Niibe M, Takeda M 2005 *Proc. SPIE* **5921** 59210D
- [12] Ouchi C, Kato S, Hasegawa M, Hasegawa T, Yokota H, Sugisaki K, Okada M, Murakami K, Saito J, Niibe M, Takeda M 2016 *Proc. SPIE* **6152** 61522O
- [13] Wang G Y, Zheng Y L, Sun A M, Wu S D, Wang Z J 1991 *Opt. Lett.* **16** 1352

- [14] Bai F Z, Rao C H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4056 (in Chinese) [白福忠, 饶长辉 2010 物理学报 **59** 4056]
- [15] Millerd J E, Martinek S J, Brock N J, Hayes J B, Wyant J C 2004 *Proc. SPIE* **5380** 422
- [16] Neal R M, Wyant J C 2006 *Appl. Opt.* **45** 3463
- [17] Gong L 2008 *M. S. Dissertation* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [宫磊 2008 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [18] Li Y S 1998 *Laser Tech.* **22** 98 (in Chinese) [李又生 1998 激光技术 **22** 98]
- [19] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics (7th Ed.)* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [20] Zhang Z G, Dong F L, Zhang Q C, Chu W G, Qiu K, Cheng T, Gao J, Wu X P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 184204 (in Chinese) [张志刚, 董凤良, 张青川, 褚卫国, 仇康, 程腾, 高杰, 伍小平 2014 物理学报 **63** 184204]
- [21] Kang G G, Tan Q F, Chen W L, Li Q Q, Jin W Q, Jin G F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014218 (in Chinese) [康果果, 谭峤峰, 陈伟力, 李群庆, 金伟其, 金国藩 2011 物理学报 **60** 014218]
- [22] Li J Z, Huang Y S, Wang Z F, Wang Q, Zhang D W, Zhuang S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144214 (in Chinese) [凌进中, 黄元申, 王中飞, 王琦, 张大伟, 庄松林 2013 物理学报 **62** 144214]
- [23] Chen X Y, Shan M 2004 *Opto-Elec. Eng.* **31** 65 (in Chinese) [陈西园, 单明 2004 光电工程 **31** 65]

Spatial phase-shifting polarization point-piffraction interferometer for wavefront measurement*

Zheng Dong-Hui¹⁾ Li Jin-Peng²⁾ Chen Lei^{1)†} Zhu Wen-Hua¹⁾ Han Zhi-Gang³⁾
Wulan Tu-Ya¹⁾ Guo Ren-Hui¹⁾

1) (School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2) (Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

3) (Corporative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 26 January 2016; revised manuscript received 11 February 2016)

Abstract

Wavefront measurement is widely used in the field of optical manufacturing, military, astronomy, medical treatment, etc., and it reflects the performance of the optical system through evaluating aberrations. Relevant studies have been carried out by many researchers. Among them, point-diffraction interferometer and spatial phase-shifting interferometer are two significant instruments for the wavefront measurement. Point-diffraction interferometer is a simple self-referencing configuration with high precision, and spatial phase-shifting interferometer can be used in the vibration environment or for measuring the dynamic object. Owing to these advantages, they have been widely used in the field of wavefront measurement. In this paper, to realize the combination of these two techniques, we propose a new method of fabricating a polarization point-diffraction plate. Through laser drilling technology, we fabricate a pinhole at a micron level on a wire grid polarizer with a period and depth of 140 nm and 100 nm respectively, and fabricate a polarization point-diffraction plate. We analyze the principle of laser drilling, the orthogonally polarized reference beam and test beam generation mechanism of the polarization point-diffraction plate. The principle of spatial phase-shifting interferometer is deduced by adopting Stokes vector and mueller matrix. Combining with the spatial phase-shifting system with beam splitter, a spatial phase-shifting polarization point-diffraction interferometer is built. In the experimental apparatus, the diameter of the pinhole on the polarization point-diffraction plate is 10.2 μm , the beam splitter is a chessboard phase grating whose period, duty cycle, and etched depth are 34 μm , 0.5, and 577 nm respectively, and the phase-shifting component is a 2×2 wave-plate array which is glued together with a $1/4$ wave-plate, a $1/2$ wave-plate, a $3/4$ wave-plate and a full wave-plate; the four fast-axes of the wave-plates are all along the horizontal direction. The spatial phase-shifting polarization point-diffraction interferometer is used to measure the transmitted wavefront through a collimating lens with a focal length of 550 mm and $F_{\#}10$ which are used on a collimator. The measured peak-to-valley value, root-mean-square value and Zernike fitting coefficients are in good agreement with those obtained by SID4 wavefront sensor made by Phasics Corporation in France, which verifies the reliability of the measuring results obtained by spatial phase-shifting polarization point-diffraction interferometer. The spatial phase-shifting polarization point-diffraction interferometer introduces spatial phase-shifting technology into traditional point-diffraction interferometer, thereby achieving real-time wavefront measurement with high resolution and precision, and also improving the immunity to vibration, air turbulence, etc.

Keywords: measurement, point-diffraction interferometry, polarization, spatial phase-shifting

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Ja, 42.25.Fx, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.65.114203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1231111, 61108041, 61405092, 61505082, 11402120), and the Graduate Student Innovation Project of Jiangsu Province, China (Grant No. KYZZ15_0121).

† Corresponding author. E-mail: chenlei@njust.edu.cn