

用于相位缺陷检测的动态泰曼干涉仪

马云¹, 陈磊², 朱文华², 刘一鸣², 李建欣²

¹南京理工大学先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 为了实现光学元件相位缺陷的大视场、高分辨率、动态检测,设计了一种动态泰曼干涉仪。该干涉仪采用短相干激光器结合迈克耳孙干涉结构产生 1 对相位延迟的正交偏振光,以此作为光源,通过匹配偏振型泰曼干涉仪干涉腔的相位差,补偿参考光与测试光之间的相位延迟。利用偏振相机瞬时采集 4 幅移相量依次相差 $\pi/2$ 的干涉图,通过移相算法即可求解得到相位缺陷的信息。利用平面波角谱理论进行仿真,分析了二次衍射对测量结果的影响;利用琼斯矩阵法分析了偏振器件误差对测量结果的影响。实验检测了 1 块激光毁伤的 optical flat,测试结果与 Veeco NT9100 白光干涉仪测量结果相比,相对误差为 2.4%。此外,采用所述方法对强激光系统中 optical flat 的相位疵病进行检测,测试结果显示波前峰谷值为 199.2 nm。结果表明,该干涉仪能够有效应用于光学元件相位缺陷的检测。

关键词 测量; 动态干涉; 相位缺陷; 空间移相; 短相干光源

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1204009

Dynamic Twyman Interferometer for Phase Defect Measurement

Ma Yun¹, Chen Lei², Zhu Wenhua², Liu Yiming², Li Jianxin²

¹Advanced Launch Corporative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In order to realize the large field, high resolution and dynamic measurement of optical component phase defects, we design a dynamic Twyman interferometer. Based on low-coherence laser and Michelson interferometer, a pair of orthogonal polarized light produced with phase delay is used as light source. By phase matching of the interference cavity, the phase delay between reference light and test light is compensated. The polarization camera is used to collect four interferograms with phase-shifting step of $\pi/2$, and the information of the phase defect is solved by phase-shifting algorithm. The effect of secondary diffraction on measurement results is analyzed based on the theory of the angle spectrum of plane wave. The influence of the polarizer error on the measurement results is analyzed by Jones matrix method. In the experiment, a laser-damaged optical plate is measured by this interferometer and Veeco NT9100 white light interferometer, and the relative error is 2.4%. In addition, this method is used to detect phase defects of optical flat in high power laser system, and the peak-to-valley value of wavefront is 199.2 nm. The results show that the interferometer can be used to detect phase defects of optical components, effectively.

Key words measurement; dynamic interferometry; phase defect; spatial phase-shifting; low-coherence light source

OCIS codes 120.4630; 260.3160; 070.7345; 350.5030

收稿日期: 2017-07-31; **收到修改稿日期:** 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61505082, U1731115)、江苏省自然科学基金(SBK2015041354)、先进固体激光技术工业和信息化部重点实验室开放基金(30916014112-003)

作者简介: 马云(1994—),女,硕士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: mayun@njust.edu.cn

导师简介: 陈磊(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenlei@njust.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

在光学元件的光切割、磨削和镀膜过程中,由于切除装置是脆性材料,常出现裂缝、划痕、杂质、涂层等缺陷。在抛光过程中,表面污染粒子和抛光粉可能会嵌入表面,形成表面缺陷或内部缺陷^[1-4]。光学元件的缺陷可分为振幅缺陷和相位缺陷。在应用过程中,光学元件中的振幅缺陷往往会导致能量散射,而相位缺陷就像一块小透镜,经常会导致光学系统传输光束的能量会聚,从而破坏光学元件或其膜层^[5]。尤其在高功率激光系统中,光学元件存在的相位缺陷是造成激光损伤的主要原因^[6]。为了实现光学元件相位缺陷的检测和评估,研究人员陆续提出一系列可靠的方法,其中包括空间滤波法^[5]、数字全息法和移相干涉法^[7]等。近年来,纳米级缺陷的测量问题越来越受到广泛关注^[8-9],因而对于具有高分辨率和大视场的精密测量仪器的需求越来越多。吕宪魁等^[10]采用现代光学信息处理技术改变光信号的频谱,使零级频谱与一级频谱发生干涉,以此来检测透明材料的相位缺陷。美国劳伦斯实验室的 Ravizza^[11]提出采用线扫描相位微分成像技术(LPDI)对相位缺陷进行粗略定位,采用移相衍射干涉技术(PSDI)对相位缺陷进行准确求解,该方法能够对大口径光学元件进行快速检测,其中,PSDI中采用 Johnson 提出的一种双光纤结构的点衍射干涉仪^[7]。该方法结构简单,不会引入其他元件的缺陷干扰,但存在以下不足:1) 要求缺陷的分布稀疏,相邻缺陷之间的间距不得超过 12 mm;2) 视场小,1次只能测视场中的1个相位缺陷;3) 需要采用无镜成像技术,将 CCD 靶面的振幅、相位分布映射成像到样品表面,计算复杂;4) 不能抵抗环境扰动。

针对上述相位缺陷的检测问题,本文提出了一种动态泰曼干涉仪,其结构主要分为3个部分:短相干光源模块、泰曼干涉仪模块、偏振成像模块。该方法可以在同一时刻采集4幅干涉图,从而解出待测件透射波前信息,得到缺陷的尺寸及位置信息。实验结果表明,该方法既能测振幅型缺陷,也能测相位缺陷,且视场大,分辨率高,抗干扰能力强。

2 短相干动态泰曼干涉仪原理

干涉仪总体设计光路如图1所示,短相干光源发生器发出1对相位延迟的正交偏振光,通过匹配干涉仪主体部分干涉腔的相位差,补偿参考光与测试光之间的相位延迟。利用偏振相机瞬时采集4幅移相量依次相差 $\pi/2$ 的干涉图,通过移相算法求解得到相位缺陷信息。采用短相干正交偏振光源,能够抑制光学元件前后表面反射的光因相互干涉产生的寄生条纹。干涉仪主体部分设计成泰曼干涉仪,使得该干涉仪可以同时测量视场中的所有相位缺陷,同时采用偏振移相系统实现动态测量,避免测量结果受环境振动等的影响。

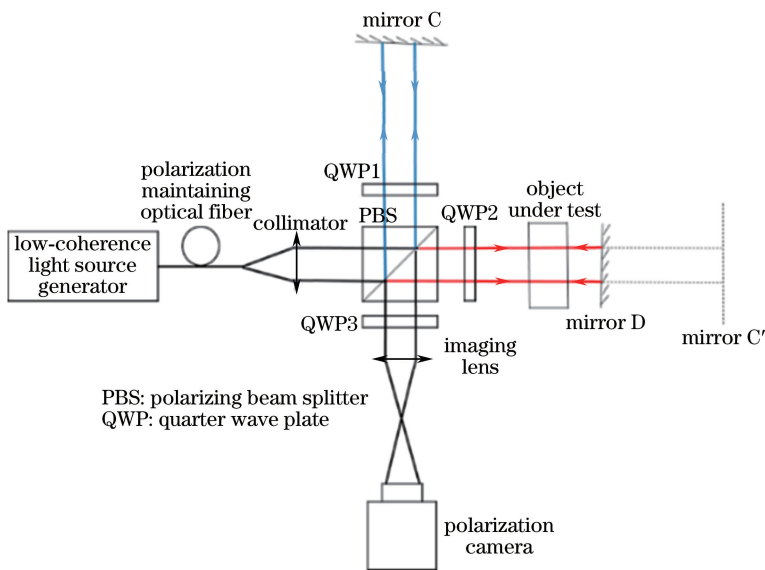


图1 短相干动态泰曼干涉仪

Fig. 1 Dynamic Twyman interferometer with low-coherence light source

2.1 短相干正交偏振光源技术

短相干正交偏振光源模块原理如图2所示。光源模块由短相干激光器和迈克耳孙干涉结构构成。短相

干激光器发出的光经过偏振分束器(PBS)后, s 光反射, p 光透射, s 光经角锥 1 反射后仍经 PBS 反射, 而 p 光经角锥 2 后经 PBS 透射, 故从 PBS 出射的光为 1 对偏振方向正交的线偏振光。在耦合镜焦面位置放置保偏光纤, 将这对线偏振光耦合到保偏光纤中, 作为主干涉仪的光源。角锥 2 放置在电控平移台上, 在测试过程中, 通过调整角锥 2, 使其在水平方向偏离反射光路中角锥 1 镜像位置一定的距离 Δ , 即可获得 1 对具有一定光程差 2Δ 的短相干正交线偏振光。为了在主干涉仪的 CCD 上获取到对比度较好的干涉图, 必须使主干涉仪的参考光和测试光之间的光程差与短相干正交偏振光源的光程差 2Δ 相匹配, 即反射镜 D 与反射镜 C 的镜像位置 C' 之间的光程差为 Δ 。由于所用激光器的相干长度较短, 被测件前后表面的二次反射光与干涉仪内部光学元件前后表面反射的光束叠加之后均不会产生干涉条纹, 有效地抑制了寄生条纹的干扰。

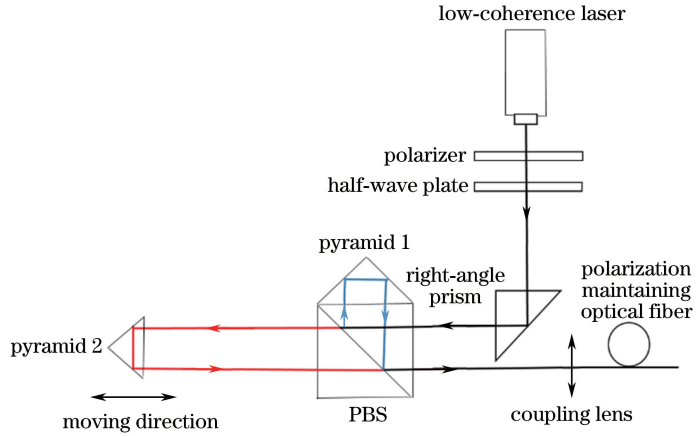


图 2 光源模块原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the light source module

2.2 偏振移相系统

为了实现动态测量, 干涉仪采用空间移相干涉法, 在 CCD 前紧贴 1 块相位掩模板。如图 3 所示, 相位掩模板上 4 个微偏振元构成 1 个移相单元^[12-14], 1 个微偏振元与 CCD 的 1 个像素点相对应, 且 1 个移相单元内 4 个微偏振元的透振方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$, 即分别引入 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 的相移量, 从而得到 4 幅干涉图, 由四步移相算法即可解出被测光学元件的相位缺陷分布。

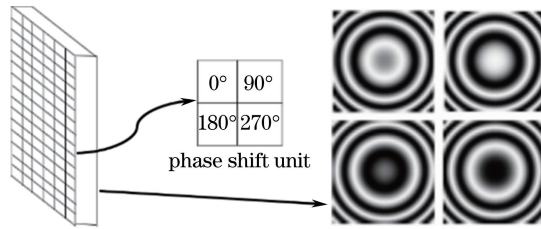


图 3 相位掩模板

Fig. 3 Phase mask plate

由于干涉仪需要在 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 视场内实现 $5 \mu\text{m}$ 的分辨率, 而 CCD 靶面的尺寸为 7.4 mm , 因而成像系统的放大倍率应为 $\beta = y'/y = 1.48$ 倍。为了避免干涉仪对不同深度的缺陷所成的像重叠, 同时实现高分辨率测量, 需将成像系统设计成长焦系统, 因而根据设计指标要求, 将成像系统的焦距设计成 180 mm , 此时工作距离达到 300 mm 。此外, 还需要根据激光器的中心波长对各光学元件进行镀膜, 从而消除鬼像。

3 实 验

根据系统设计搭建实验光路, 选用中心波长为 640 nm 、相干长度约为 2 mm 的 LSR-PS-II 型固体激光器, 保偏波段为 $400 \sim 680 \text{ nm}$ 的保偏光纤以保证偏振态, 以及靶面尺寸为 7.4 mm , $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 的 4D PolarCam 偏振相机以实现高分辨率、动态测量。

用该干涉仪对强激光系统中光学平晶的相位疵病进行测量。加入被测件,将条纹数目调到最少,移动角锥,使得参考光束和测试光束的光程相匹配,得到对比度最好的干涉图。对光学平晶上相位疵病的位置进行清晰成像,瞬间采集 4 幅干涉图,利用四步移相法解算相位,测得经过该相位疵病的透射波前峰谷(PV)值为 199.2 nm,如图 4 所示。

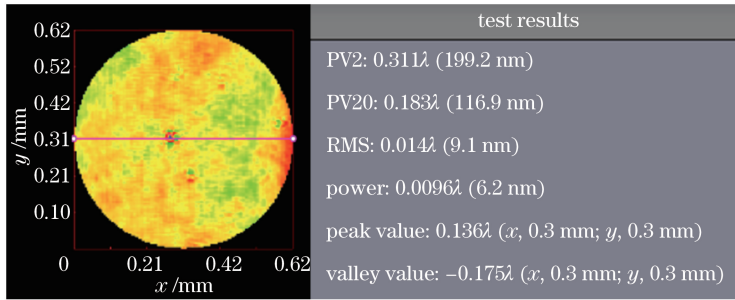


图 4 动态泰曼干涉仪对光学平晶相位缺陷的测量结果

Fig. 4 Measurement result of phase defect of optical flat by dynamic Twyman interferometer

为验证测量结果的准确性,用 Quanta-Ray 公司生产的 INDI-40-10_HG 型激光器轰击 1 块 K9 玻璃平板,产生深度不同的小孔,利用该干涉仪测量光束通过小孔的波前变化,从而计算小孔深度。对某一小孔进行 100 次测量,取平均值,实验结果如图 5 所示,PV 值为 0.084λ,均方根(RMS)值为 0.009λ,由透射波面与实际孔深之间的关系式 $(n-1)\Delta h=d$,其中 $n=1.52$,得到孔的实际深度 Δh 为 103.85 nm。

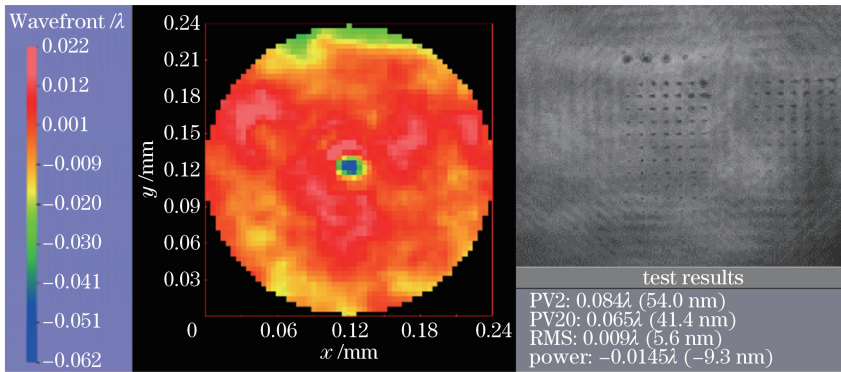


图 5 动态泰曼干涉仪对激光毁伤板的测量结果

Fig. 5 Measurement result of laser-damaged plate by dynamic Twyman interferometer

同时使用美国 Veeco 公司生产的 NT9100 型白光干涉仪,测得上述小孔的孔深为 106.40 nm,如图 6 所示。对比 2 次实验结果可得,两者之间的相对误差为 2.4%,验证了短相干动态泰曼干涉仪测量结果的准确性。

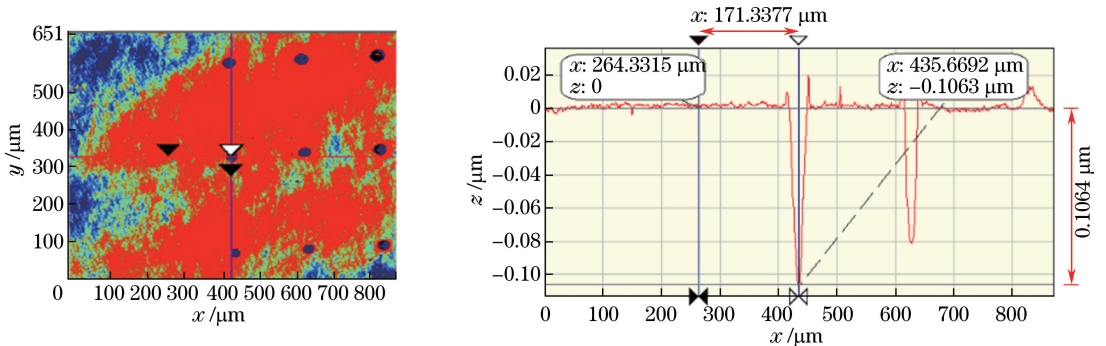


图 6 Veeco NT9100 型白光干涉仪对激光毁伤板的测量结果

Fig. 6 Measurement result of laser-damaged plate by Veeco NT9100 white light interferometer

4 讨 论

4.1 二次衍射

实验过程中,由于干涉仪主体部分采用泰曼干涉仪的结构,测试光 2 次经过被测件,存在二次衍射现象,而成像镜头不能同时对 2 个位置的相位缺陷清晰成像,因而要分析二次衍射对实验结果的影响。由平面波角谱理论可知,平面波经过相位缺陷后相位发生变化,从衍射屏传播到观察屏,光场频谱会发生变化。当衍射距离为 z 时,观察屏上的光场分布可以表示为衍射屏上的光场频谱 $A_0(f_x, f_y)$ 与相位延迟因子 $\exp\left(i \frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1-\alpha^2-\beta^2}\right)$ 的乘积^[15],即

$$A_z(f_x, f_y) = A_0(f_x, f_y) \exp\left(i \frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1-\alpha^2-\beta^2}\right), \quad (1)$$

式中 $\alpha = \lambda f_x, \beta = \lambda f_y, \lambda$ 为激光器的中心波长, (f_x, f_y) 为平面波的空间频率, $(\alpha, \beta, \sqrt{1-\alpha^2-\beta^2})$ 为平面波的方向余弦, i 为虚数单位, z 为衍射距离。该相位延迟因子即线性系统理论中频域的传递函数。

根据平面波角谱理论,在衍射距离不同的情况下,对平面波经过直径为 $80 \mu\text{m}$ 、峰值为 0.2λ 、呈高斯分布的圆形相位缺陷时的相位变化进行仿真,当衍射距离分别为 $0, 50, 300 \text{ mm}$ 时,平面波经相位缺陷后的相位分别如图 7(a)、(b)、(c) 所示,相位变化与衍射距离之间的关系如图 7(d) 所示。由图 7(d) 可以看出,随着衍射距离 z 的增大,各个角谱分量迅速衰减,直至接近于 0,可近似看成平面波。在实际实验过程中,被测件与测试镜之间的距离为 450 mm ,当对第 1 次经过相位缺陷的位置进行成像时,对于第 2 次经过相位缺陷的位置来说,相当于衍射孔径为 $80 \mu\text{m}$,衍射距离为 900 mm 。此时,由于二次衍射而产生的相位变化几乎为 0,因而测试过程中尽管测试光 2 次经过被测件,但其引入的相位变化仅为相位缺陷的 1 倍。

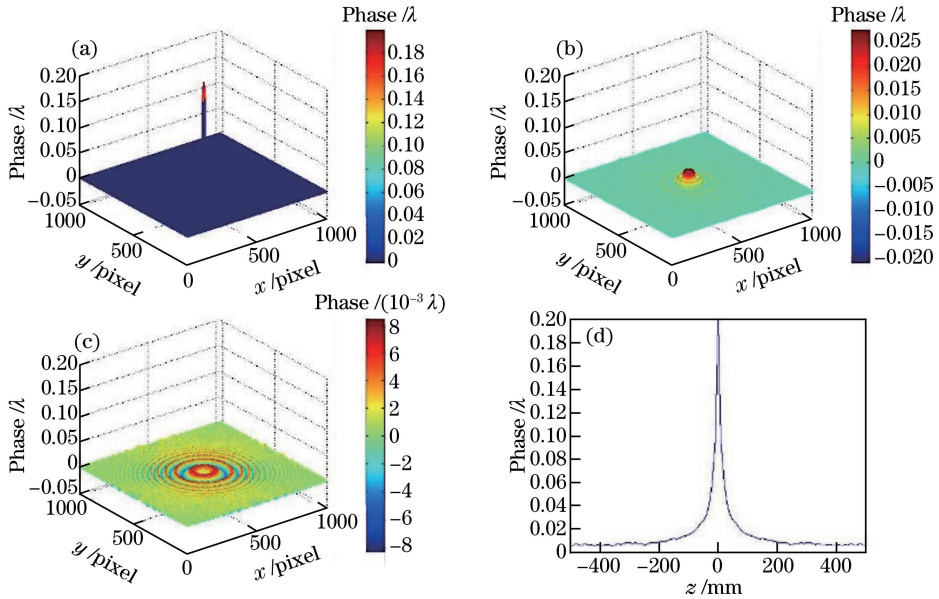


图 7 经相位缺陷的平面波的传播。(a) 衍射距离为 0 mm ; (b) 衍射距离为 50 mm ;
(c) 衍射距离为 300 mm ; (d) 相位变化与衍射距离之间的关系

Fig. 7 Transmission of plane wave passing through phase defects. (a) Phase at 0 mm ; (b) phase at 50 mm ;
(c) phase at 300 mm ; (d) phase changes under different distances

4.2 系统误差分析

该系统的主要误差来源为 $1/4$ 波片 QWP3 的方位角误差 $\Delta\gamma$ 、相位延迟量误差 $\Delta\delta$ 以及偏振阵列中 4 个偏振片的方位角误差 $\Delta\alpha_i$ 。对于第 i 幅 ($i = 1, 2, 3, 4$) 干涉图来说,利用琼斯矩阵法计算可得其光强表达式为

$$I_i = I_R \left[\cos^2 \alpha_i + \sin 2\gamma \cdot \sin 2(\alpha_i - \gamma) \cdot \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right] + I_T \left[\sin^2 \alpha_i - \sin 2\gamma \cdot \sin 2(\alpha_i - \gamma) \cdot \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \right] + \sqrt{I_R I_T} \cos \varphi [\sin 2\alpha_i - \sin 2(\alpha_i - \gamma) \cdot \cos 2\gamma \cdot \sin \delta] - \sqrt{I_R I_T} \sin \varphi [\sin 2(\alpha_i - \gamma) \cdot \sin \delta], \quad (2)$$

式中 I_R, I_T 分别为参考光和测试光的光强, α_i 为偏振阵列中 4 个偏振片的方位角, γ 为 1/4 波片 QWP3 的方位角, δ 为 1/4 波片 QWP3 的相位延迟量, φ 为待测波面的相位。理想情况下, α_i 应分别为 $0, 45, 90, 135^\circ$, γ 为 45° , δ 为 $\pi/2$ 。而在实际调整过程中, 这 3 个量会存在一定的偏差, 从而导致波面求解结果中存在移相误差。

由相位解算公式 $\varphi = \arctan \left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} \right)$ 可解得引入的移相误差为

$$\Delta\varphi = \left[\frac{\cos \varphi}{2\sqrt{I_R I_T}} \left(\frac{\partial I_1}{\partial e} - \frac{\partial I_3}{\partial e} \right) \Big|_{e=e_0} + \frac{\sin \varphi}{2\sqrt{I_R I_T}} \left(\frac{\partial I_4}{\partial e} - \frac{\partial I_2}{\partial e} \right) \Big|_{e=e_0} \right] \cdot \Delta e, \quad (3)$$

式中 e 为误差来源, e_0 为其理想值, Δe 为其误差。

下面针对这几项误差来源进行分析, 令参考光与测试光光强之比 $I_R/I_T = \eta$ 。

1) 假设 1/4 波片 QWP3 的方位角误差为 $\Delta\gamma$, 其余误差因素均为理想值, 得到由 1/4 波片 QWP3 的方位角误差引入的移相误差为

$$(\Delta\varphi)_\gamma = -\frac{(1-\eta)\sin\varphi}{\sqrt{\eta}} \cdot \Delta\gamma. \quad (4)$$

由(4)式可以看出, 当 $\eta=1$ 时, 引入的移相误差为 0。而在实际情况下, 参考光与测试光光强不可能完全相等, 由(4)式可得, 在波面恢复时引入的最大误差为

$$(\Delta W)_\gamma = \frac{\lambda(1-\eta)}{2\pi\sqrt{\eta}} \cdot \Delta\gamma. \quad (5)$$

当 η 分别为 0.7, 0.8, 1.2, 1.3 时, 1/4 波片的方位角误差对解算的波面最大误差所造成的影响如图 8 所示。若调节半波片, 将参考光与测试光光强之比控制在 0.8~1.2 之间, 则当 1/4 波片的方位角误差 $\Delta\gamma$ 小于 5° 时, 测得波面的误差可以控制在 $\lambda/300$ 以内。

2) 假设 1/4 波片 QWP3 的相位延迟量误差为 $\Delta\delta$, 其余误差因素均为理想值, 得到由 1/4 波片 QWP3 的相位延迟量误差引入的移相误差为

$$(\Delta\varphi)_\delta = \frac{(1-\eta)\cos\varphi}{2\sqrt{\eta}} \cdot \Delta\delta. \quad (6)$$

由(6)式可以看出, 当 $\eta=1$ 时, 引入的移相误差为 0; 当 $\eta \neq 1$ 时, 引入的最大误差可表示为

$$(\Delta W)_\delta = \frac{\lambda(1-\eta)}{4\pi\sqrt{\eta}} \cdot \Delta\delta. \quad (7)$$

当 η 分别为 0.7, 0.8, 1.2, 1.3 时, 1/4 波片的相位延迟量误差对解算的波面最大误差所造成的影响如图 9 所示。若调节半波片, 将参考光与测试光光强之比控制在 0.8~1.3 之间, 则当 1/4 波片的相位延迟量误

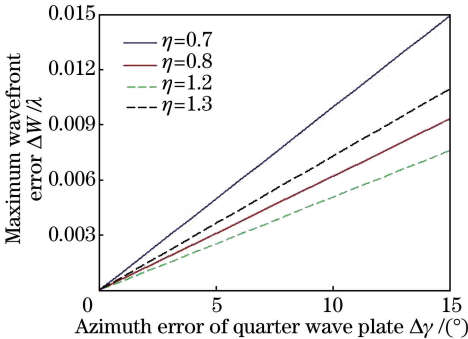


图 8 最大波面误差与 1/4 波片方位角误差之间的关系曲线

Fig. 8 Relationship of maximum wavefront error and azimuth error of quarter wave plate

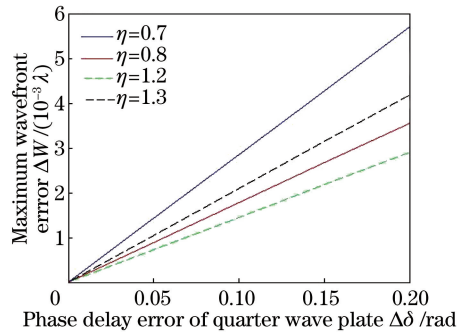


图 9 最大波面误差与 1/4 波片相位延迟量误差之间的关系曲线

Fig. 9 Relationship of maximum wavefront error and phase delay error of quarter wave plate

差小于 0.1 rad 时,测得波面的误差可以控制在 $\lambda/500$ 以内,对结果的影响较小。

3) 假设 4 个偏振片的方位角误差为 $\Delta\alpha_i$,其中 $i=1,2,3,4$,其余误差因素均为理想值,得到由偏振片的方位角误差引入的移相误差为

$$(\Delta\varphi)_a = \cos^2\varphi \cdot (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_3) + \sin^2\varphi \cdot (\Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_4), \quad (8)$$

若 4 个偏振片的平均方位角误差为 $\Delta\alpha$,则由 (8) 式可得,在波面恢复时引入的最大误差为

$$(\Delta W)_a \approx \frac{2\lambda}{\pi} \cdot \Delta\alpha. \quad (9)$$

由(9)式可以看出,偏振片的方位角误差对波面测量结果的影响较大。在实际实验中,微偏振阵列采用光刻方法制作,能够将其平均方位角误差严格控制在 0.1° 以内,此时波面误差可以控制在 $\lambda/900$ 以内。

5 结 论

本文研究了一种主要用于测量相位缺陷的动态泰曼干涉仪,该干涉仪利用短相干光源有效抑制了被测件前后表面及干涉仪内部光学元件前后表面发射的光因干涉产生寄生条纹,利用微偏振阵列和空间移相干涉法有效避免了环境振动对测量结果的影响。并且将成像系统设计成长焦系统,在实现高分辨率的同时,保证了其景深足够小,从而使得对于不同深度的相位缺陷所成的像不会重叠在一起。通过数学推导及仿真,分析了衍射强度随衍射距离的变化,结果表明实验中存在的二次衍射现象对测量结果的影响可以忽略。讨论了 $1/4$ 波片的方位角误差、相位延迟量误差及微偏振阵列的方位角误差对于测量结果的影响。分析结果表明,微偏振阵列的方位角误差需要严格控制在 0.1° 以内,此时引入的波面测量误差最大值为 $\lambda/900$;当参考光与测试光光强之比控制在 $0.8\sim 1.2$ 之内时,需要将 $1/4$ 波片的方位角误差控制在 5° 以内,从而能将波面测量结果误差控制在 $\lambda/300$;而 $1/4$ 波片的相位延迟量误差对测量结果的影响较小,将其控制在 0.1 rad 以内时,波面测量误差小于 $\lambda/500$ 。经测试,该干涉仪能够实现光学元件相位缺陷的大视场、高分辨率及动态检测。

参 考 文 献

- [1] Miller P E, Suratwala T I, Wong L L, *et al.* The distribution of subsurface damage in fused silica[C]. SPIE, 2005, 5991: 599101.
- [2] Suratwala T I, Wong L L, Miller P E, *et al.* Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2006, 352(52/53/54): 5601-5617.
- [3] Golini D. Transition between brittle and ductile mode in loose abrasive grinding[C]. SPIE, 1990, 1333: 80-91.
- [4] Zhang Bo, Ni Kaizao, Wang Linjun, *et al.* New algorithm of detecting optical surface imperfection based on background correction and image segmentation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911004.
张博, 倪开灶, 王林军, 等. 基于背景校正和图像分割定量分析光学元件表面疵病的新算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911004.
- [5] Luo Mao, Bu Yang, Xu Jinghao, *et al.* Optical element surface defect measurement based on multispectral technique [J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(1): 0104001.
罗茂, 步扬, 徐静浩, 等. 基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0104001.
- [6] Bercegol H, Bouchut P R, Lamaignere L, *et al.* The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers[C]. SPIE, 2004, 5273: 312-324.
- [7] Sommargren G E, Phillion D W, Johnson M A, *et al.* 100-picometer interferometry for EUVL[C]. SPIE, 2002, 4688: 316-328.
- [8] Arima K, Shigetoshi T, Inoue H, *et al.* Nano-scale characterization of surface defects on CMP-finished Si wafers by scanning probe microscopy combined with laser light scattering[C]. MRS Online Proceedings Library, 2007, 991: 227-232.
- [9] Stover J C. Use of new technology for enhanced detection of crystalline defects on silicon wafers[C]. SPIE, 1998, 3275: 138-144.
- [10] Lü Xiankui, Tao Chunkuang. Phase disfigurement for transparent material[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(11): 552-553.

- 吕宪魁, 陶纯匡. 透明材料位相缺陷的检测[J]. 无损检测, 2004, 26(11): 552-553.
- [11] Ravizza F L. Imaging of phase objects using partially coherent illumination[D]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2013.
- [12] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, *et al.* Pixelated phase-mask dynamic interferometer[C]. SPIE, 2004, 5531: 304-314.
- [13] Brock N J, Hayes J B, Kimbrough B T, *et al.* Dynamic interferometry[C]. SPIE, 2005, 5875: 58750F.
- [14] Kimbrough B T. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors [J]. Applied Optics, 2006, 45(19): 4554-4562.
- [15] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. Qin Kecheng, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 40-43.
- 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 40-43.