

点衍射球面检测中的斜反射波前像差校正

王道档 杨甬英 陈琛 卓永模

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 针对高精度点衍射球面检测系统中金属反射介质的偏振效应, 分析了不同偏振态光束在不同孔径角范围情况下所引入的斜反射波前像差。通过数值仿真, 对金属反射介质所引入的斜反射相移曲线特征进行了分析, 并以此为基础, 提出了相应的斜反射波前像差校正方法。利用高精度球面检测中点衍射干涉仪对所提出的校正方法进行了实验验证, 并给出了相关实验结果。结果表明, 干涉检测系统中选择不同光束偏振态时, 金属反射介质会引入不同的影响, 而利用该校正方法可有效减小其斜反射波前像差, 校正实验中可将波面面形偏差峰谷(PV)值和均方根(RMS)值分别由 0.0452λ 和 0.0075λ 降至 0.0194λ 和 0.0021λ (λ 为光波长)。

关键词 测量; 点衍射干涉仪; 像差校正; 偏振效应; 金属反射介质

中图分类号 T744.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0612003

Calibration of Oblique-Reflection Aberration in Point-Diffraction Interferometer for High-Precision Spherical Surface Testing

Wang Daodang Yang Yongying Chen Chen Zhuo Yongmo

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Based on the polarization effect of metal-dielectric reflector in the point-diffraction interferometer for high-precision spherical surface testing, the oblique-reflection wavefront aberration of beams with different polarized states at various aperture angles is analyzed in detail. According to the numerical simulation result, the characteristic of oblique-reflection phase shift introduced by metal-dielectric reflector is studied, based on which the corresponding calibration method is presented. The experimental validation with the point-diffraction interferometer for high-precision spherical surface testing is carried out. Experimental results indicate that the metal-dielectric reflector introduces various effects on the beams with different polarized states, and the oblique-reflection wavefront aberration can be calibrated by the proposed method, with the residual error peak-valley (PV) value dropping from 0.0452λ to 0.0194λ and root mean square (RMS) value from 0.0075λ to 0.0021λ (λ is wavelength).

Key words measurement; point-diffraction interferometer; calibration of wavefront aberration; polarization effect; metal-dielectric reflector

OCIS codes 120.3180; 120.5700; 120.6650; 260.5430

1 引言

利用光束的偏振特性, 可实现干涉检测系统中干涉条纹对比度的调节以及偏振移相^[1,2]等目的, 并在散射板干涉系统^[3]、点衍射干涉系统^[4]以及 Fizeau 干涉仪等高精度干涉检测系统中得到了很好的应用。目前一些诸如 Zygo^[5,6]等 Fizeau 型商业

干涉仪, 都充分利用了偏振光的偏振特性, 以实现高精度的面形检测。

在大多数干涉系统中, 由于光路布局要求或是为了减小整个检测装置的体积, 通常会在光路中加入镀有金属反射介质的光学平面反射元件, 以实现光路的转折等目的。对用于平面检测的 Twyman-

收稿日期: 2010-11-05; 收到修改稿日期: 2011-02-14

作者简介: 王道档(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光电信息检测方面的研究。E-mail: wangdaodang@yahoo.com.cn

导师简介: 杨甬英(1954—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密检测、纳米测试和气动光学等方面的研究。

E-mail: chuuyy@zju.edu.cn(通信联系人)

Green 干涉仪等检测系统,光束一般是以平行光的形式存在,光束在折光反射镜、参考镜以及测量镜上各方向的入射角一般是一致的。但对用于高精度球面检测的点衍射干涉仪,光束则是以发散的球面波前形式进行传播,不同方向的光线在折光反射镜上的入射角是不一致的,进而会引入不同的影响。通常情况下,当光束孔径角较小时,可将反射镜上的非平行光入射所引入的波前像差(即所谓的斜反射波前像差)加以忽略;而对用于高精度球面检测的点衍射干涉仪,要求光学面形测量的均方根(RMS)精度至少达到 $\lambda/1000$ ^[7~10] (λ 为光波长)的量级,在此情况下必须要考虑斜反射波前像差对于测量精度的影响,并加以有效的校正,以实现高精度的球面检测要求。

本文针对高精度点衍射球面检测中金属反射介质的偏振效应,分析其对于发散波前所引入的斜反

射波前像差,进而研究了干涉检测系统中光束偏振态的选择对于面形检测精度的影响。通过数值仿真结果的分析,提出了针对斜反射波前像差的校正方法,最后对校正方法进行了实验验证。

2 原理介绍

可用于高精度球面检测的点衍射干涉仪^[11]的光路示意图如图 1 所示。其中,针孔衍射波前的 W_1 部分为参考波前; W_2 部分为检测波前,该波前经待测球面反射后在衍射掩膜板上的针孔反射镜(镀 Cr 金属反射介质,对应 632.8 nm 波长的复折射率为 $2.65 + 3i$)上反射,再与参考波前 W_1 会合。由图 1 可知,检测波在针孔反射镜不同方向上的入射角是不一致的,并在不同的光线方向产生不同的影响,进而会在反射后的检测波中引入斜反射波前像差。

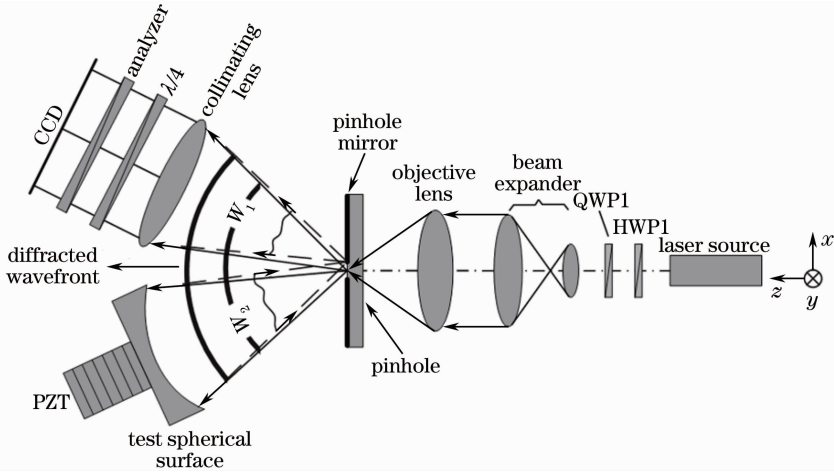


图 1 点衍射干涉装置示意图

Fig. 1 Schematic of point-diffraction interferometric setup

2.1 金属反射介质的偏振效应

对于一般光学系统中反射元件的设计都基于光线遵循几何光学规律的假设,并且系统会均匀地传播所有偏振态,因此光束的反射不会引入波前像差(不考虑反射镜面形误差的影响)。显然,当光束的两个正交偏振分量的复振幅变化足够小时,这一假设是合理的。然而,当光线以一定角度入射到反射元件上时,上述假设已不再成立,此时反射镜中金属反射介质的偏振效应会对入射光产生一定的影响,引入额外的波前像差(即斜反射波前像差)。

当光线斜入射到金属反射介质表面时,反射光中 p 波和 s 波的反射系数 r_p 和 r_s [其中 $r_p = |r_p| \exp(i\delta_p)$, $r_s = |r_s| \exp(i\delta_s)$ 皆为复数]是不同的^[12,13],即存在振幅反射系数 $|r_p| \neq |r_s|$ 和幅角(相位)跃变 $\delta_p \neq \delta_s$ 。

因而在光束斜入射情况下,其反射光的偏振态会相对入射光发生变化,并且有

$$\begin{cases} r_p = |r_p| \exp(i\delta_p) = \frac{\bar{n}_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \bar{\theta}_2}{\bar{n}_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \bar{\theta}_2} \\ r_s = |r_s| \exp(i\delta_s) = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \bar{n}_2 \cos \bar{\theta}_2}{n_1 \cos \theta_1 + \bar{n}_2 \cos \bar{\theta}_2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 n_1 和 θ_1 分别为第一介质(空气)的折射率和光波入射角; \bar{n}_2 为第二介质(金属反射介质)的复折射率,且 $\bar{n}_2 = n - i\kappa$, n 为金属的折射率, κ 为衰减系数。由于 $\bar{n}_2 \sin \bar{\theta}_2 = n_1 \sin \theta_1$, 可得

$$\cos \bar{\theta}_2 = (1 - \sin^2 \bar{\theta}_2)^{1/2} = \left[\frac{n^2 (1 + \kappa^2)^2 - (1 - \kappa^2 + 2i\kappa) \sin^2 \theta_1}{n^2 (1 + \kappa^2)^2} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

根据(1)式,可将金属反射介质等效为一个二向色性线偏振器和一个相位延迟器^[14,15],并且其对应

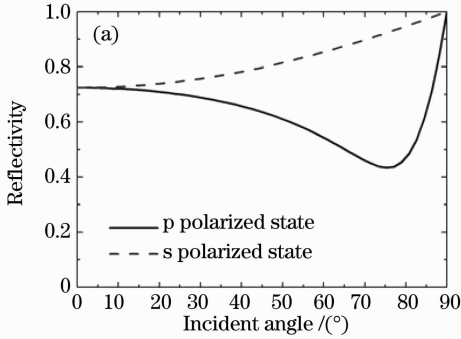
的等效琼斯矩阵 \mathbf{J}_r 为

$$\mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} \exp(i\delta_d) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |r_p| & 0 \\ 0 & |r_s| \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 δ_d 为 p 波与 s 波之间的反射系数幅角差值,且 $\delta_d = \delta_p - \delta_s$ 。通过(1)式和(3)式即可得反射镜中金属反射介质对于斜入射光线的影响,进而得到对应的斜反射波前像差。

2.2 数值仿真分析

光线斜入射情况下的金属反射膜可等效为一个二向色性线偏振器和一个相位延迟器,因而它会对图 1 所示检测系统中的检测光束产生一定影响。由于图 1 中针孔反射镜上所镀的材料为 Cr 金属介质,由此可根据(1)~(3)式得到不同入射角情况下的振幅反射系数和相位跃变差 δ_d ,进而可得 Cr 金属反射膜对 632.8 nm 光波长的振幅反射系数和相



位延迟曲线分别如图 2(a)和(b)所示。

由图 2 所示的 Cr 金属偏振特性曲线可知,对于不同光线入射角,金属反射介质对于 p 波和 s 波的振幅反射系数以及相位跃变差 δ_d 都是不同的,进而在斜反射的发散光中引入波前像差。为分析金属反射介质的偏振效应对不同偏振态的入射光的影响,现分别将入射光的偏振态取为 p 线偏振光 \mathbf{E}_1 、s 线偏振光 \mathbf{E}_2 、左旋圆偏振光 \mathbf{E}_3 、左旋椭圆偏振光 \mathbf{E}_4 及左旋椭圆偏振光 \mathbf{E}_5 ,对应的椭偏度 ϵ 分别为 0, $\infty, 1, 0.5$ 和 2,即有

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}_4 &= \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{bmatrix} 2 \\ i \end{bmatrix}, \mathbf{E}_5 = \frac{1}{\sqrt{5}} \begin{bmatrix} 1 \\ 2i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

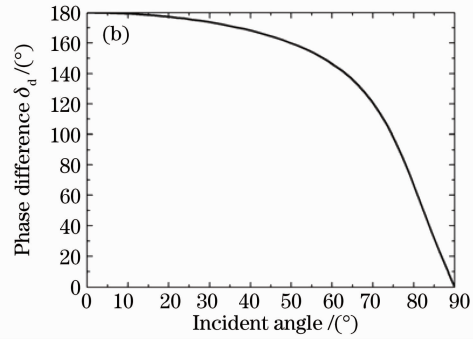


图 2 Cr 金属反射介质偏振效应。不同入射角对应的反射率(a),相位延迟量(b)

Fig. 2 Polarization properties of Cr coating reflector. (a) reflectivity and (b) phase shift at various incident angles

对于不同偏振态的入射光以不同入射角范围入射到镀 Cr 的反射镜时,可得对应斜反射波前像差如图 3 所示。不论是何种偏振态的入射发散光,其反射光的波前畸变量都会随着其光线入射角范围的增大而增大,且对于最大入射角为 40° 的 p 偏振光,对应的波前畸变量峰谷(PV)值和 RMS 值分别达到了 0.0143λ 和 0.0054λ ;同时,对于不同偏振态的入射光所引入的波前畸变量也不一样,其中 p 线偏振光(对应椭偏度为 0)和 s 线偏振光(对应椭偏度为 ∞)的影响最大,而圆偏振光(对应椭偏度为 1)的影响最小,对应 40° 入射角范围的波前畸变量 PV 值和 RMS 值分别为 0.0012λ 和 0.0002λ 。

3 斜反射波前像差的校正

由于当入射到金属反射介质的发散光束入射角范围为 $0^\circ \sim 40^\circ$ 时,所引入的斜反射波前像差 PV 值不超过 0.0143λ ,对应的 RMS 值在 0.0050λ 量级以

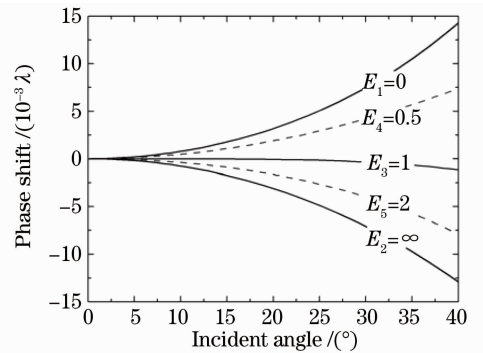


图 3 Cr 金属膜层反射引入的相移曲线

Fig. 3 Phase shift introduced by reflection on Cr metal coating

内。虽然在一般面形检测要求中,斜反射波前像差的影响可以忽略不计,但对于检测精度达到甚至优于 $1/1000\lambda$ 量级的高精度球面检测要求,必须对其进行分析进行有效的校正。由图 3 所示的分析结果可知,可利用以下两种方法来校正斜反射波前像差。

3.1 圆偏振光法

由图 3 可知,对于椭偏度为 1 的圆偏振光,其在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的入射角范围内的波前畸变量都很小,并且当最大入射角为 40° 时,其波前畸变量 PV 值仅约为 0.0012λ (对应的 RMS 值为 0.0002λ),几乎可以忽略不计。因而在图 1 所示光路中,可利用偏振光学元件将光束偏振态调整为圆偏振光,进而可将由于检测光在针孔反射镜上反射而引入的波前像差降为最小,且其影响可忽略不计。目前,Zygo 干涉仪等一些高精度商业干涉仪也正是基于该原理,将光路中的光束偏振态调整为圆偏振光,进而使得系统装置中的折光反射镜等光束反射元件对波前引入的影响可加以忽略。

3.2 波片旋转补偿法

圆偏振光法虽然可在很大程度上减小斜反射波前像差的影响,但实际情况中并非都能将光束偏振态调整至所需的圆偏振光,此时可利用波片旋转补偿法对斜反射波前像差进行校正,并且该方法适用于任何偏振态的偏振光。由图 3 可知,对于椭偏度分别为 0.5 和 2 的椭圆偏振光,以及 0 和 ∞ 的线偏振光所对应的斜反射相移曲线都关于零相移曲线存在一定的对称性,因而可利用该对称性将二者进行叠加,进而可对斜反射波前像差进行有效的校正。

可利用波片旋转补偿法获得对称相移值,并实现对斜反射波前像差进行有效的校正,具体处理过程为:在图 1 所示光路的光源前面处放入 $\lambda/2$ 波片(HWP1),并进行一次波面测量,得到面形数据 W_1 ;将 $\lambda/2$ 波片在 xy 平面内旋转 45° ,使得光束偏振平面相对待测面旋转了 90° ,进而得到椭偏度为原光束偏振态对应椭偏度的倒数,得到面形数据 W_2 ;最后,将两次测得数据进行叠加,从而可将任意偏振态光束的斜反射波前像差从面形数据中加以有效地校正,即有实际待测面形数据 $W = (W_1 + W_2)/2$,对应的处理流程图如图 4 所示。其中,斜反射波前像差已通过两组测得数据叠加过程得以校正,并且上述波片旋转过程实际上实现了光束偏振平面与待测面在垂直光轴平面内相对转动 90° 。

通过对椭偏度分别为 0 和 ∞ ,0.5 和 2 两对偏振光运用波片旋转补偿法,可以得到波前畸变量 PV 值和 RMS 值分别为 0.0014λ 和 0.0004λ , 0.0009λ 和 0.0003λ ,由此可将其影响加以忽略。此外,波片旋转补偿法相对圆偏振光法的另一个优点在于,它将两次测量结果进行了叠加,在多次测量过程中对随机噪声进行了一定的抑制。

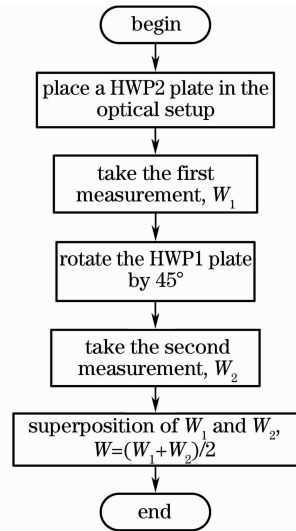


图 4 斜反射波前像差校正的波片旋转补偿法流程图

Fig. 4 Procedure of waveplate-rotation compensation method for oblique-reflection wavefront aberration calibration

4 实验结果及分析

由于斜反射波前像差的 RMS 值一般都为 $1/1000\lambda$ (甚至更小)的量级,为此利用了自行搭建的点衍射干涉仪实验装置(如图 1 所示)对一全反射球面进行检测,进而可利用该装置对针孔反射镜上引入的斜反射波前像差进行分析和校正。来自于 He-Ne 激光器的光束经 $\lambda/2$ 波片(HWP1)调节得到不同偏振方向的线偏振光,再通过一快轴方向与 x 轴方向(即水平方向)成 45° 的 $\lambda/4$ 波片(QWP1)后变为圆偏光,并经准直扩束系统后由显微物镜会聚到衍射掩模板的衍射针孔上。其中衍射针孔是利用聚焦离子束工艺在 Cr 金属反射膜层(即针孔反射镜)上蚀刻出直径约为 $1 \mu\text{m}$ 的圆孔。利用针孔衍射原理可以得到较为理想的球面波前,并可将其作为检测球面时的参考波前。针孔衍射球面波前的其中一部分作为参考波前 W_1 ,另一部分作为检测波前 W_2 。检测波前 W_2 经待测球面(数值孔径 NA 为 0.4,口径为 137.7 mm)反射后再经衍射掩模板上的 Cr 金属反射膜层反射,此时参考波和检测波会合,并经准直透镜后由球面波变为平面波,再通过一 $\lambda/4$ 波片(快轴方向与 x 轴方向成 45°)和检偏器后产生干涉,进而在 CCD 探测器上得到干涉条纹。其中,利用压电微位移器对待测球面进行多步移相测量,即可实现待测球面面形的高精度测量。

通过上述光路介绍可知,待测球面反射回的检测光波(发散波前)经针孔反射镜反射后才与参考波前会合,因而 Cr 金属反射膜会对斜反射波前引入一

定的波前像差。可通过调整激光器前面的 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片,将针孔衍射球面波调整为圆偏振光,得到对应的面形数据 W_o 。如图 5(a)所示。根据分析可

知,金属反射介质对圆偏振光所引入的斜反射波前像差可以忽略不计,因而可将该测量结果 W_o 作为理想测量数据。

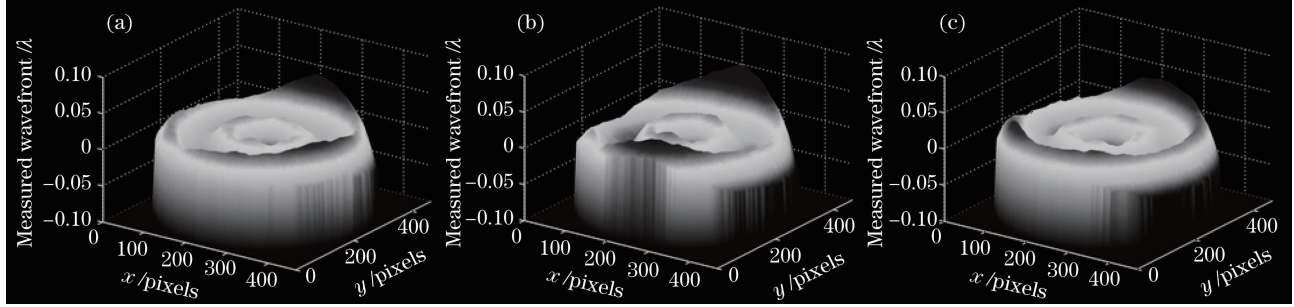


图 5 斜反射波前像差校正实验结果。(a)圆偏光,(b)p线偏振光,(c)对(b)校正后的波前

Fig. 5 Experimental results of calibration of oblique-reflection wavefront aberration. (a) circular polarization, (b) p-linear polarized light, (c) calibrated wavefront of (b)

为分析金属反射介质对于其它偏振态的影响,移去光路中的两个 $\lambda/4$ 波片,并按照图 4 所示的处理流程图进行测量。通过旋转 $\lambda/2$ 波片将针孔衍射波前调整为 p 线偏振光,测得的面形数据 W_p 如图 5(b)所示。由图 5(a)和(b)的对比可知,金属反射介质对于 p 线偏振光所引入的斜反射波前像差有了较为明显的影响,二者之间的面形偏差 PV 值和 RMS 值分别达到了 0.0452λ 和 0.0075λ 。为对 p 线偏振光的金属反射介质斜反射波前像差进行校正,将 $\lambda/2$ 波片旋转 45° ,进而得到 s 线偏振光,将测得的面形数据与 p 偏振光对应的面形数据进行叠加,最后得到校正后的待测面形数据 $W_{c,p}$ 如图 5(c)所示。从图 5(a)和(c)的分析可知,利用本文提出的方法能有效的校正发散波前的斜反射波前像差,经校正后的面形偏差 PV 值和 RMS 值分别为 0.0194λ 和 0.0021λ ,同时也验证了圆偏振光法以及波片旋转补偿法的可行性。关于图 5 中实验结果的具体数据说明如表 1 所示。

表 1 实验中的波前像差分析结果

Table 1 Analysis results of measured wavefront aberration

Wavefront data	Aberration		Residual error	
	PV / λ	RMS / λ	PV / λ	RMS / λ
W_o	0.1189	0.0172	0	0
W_p	0.1436	0.0208	0.0452	0.0075
$W_{c,p}$	0.1242	0.0184	0.0194	0.0021

实验中,由于图 1 所示点衍射干涉系统中属于非完全共路系统,因而外界环境的干扰(主要包括空气扰动以及机械振动等)会在测量结果中引入一定的波形误差;空气中的尘埃堵塞衍射针孔会影响衍射波前的质量;同时,光路中元器件的调整误差也会对测量结果造成一定的影响。其中,波片旋转补偿

法相对于圆偏振光法而言,其在校正过程中需要对 $\lambda/2$ 波片进行一次旋转,在此过程中,波片旋转定位误差等误差因素也可能会对测量结果引入一定的误差。实验装置中采用了旋转定位精度优于 $10''$ 的高精度调节机构来实现 $\lambda/2$ 波片的高精度定位旋转,以最大程度降低 $\lambda/2$ 波片调整误差的影响。此外,为了在一定程度上降低外界的影响,实验过程中将实验装置至于隔振平台上并加以屏蔽。在不考虑外界环境影响的情况下,实际可获得更高的校正精度。

5 结 论

针对高精度球面检测系统中金属反射介质在光线斜反射情况下所表现出来的偏振效应,分析了不同光束偏振态的选择对应的斜反射波前像差。数值分析结果表明:金属反射介质的偏振效应对于斜入射光波存在着一定的影响,所引入的斜反射波前像差随着入射光波的入射角范围增大而增大;同时还与光波偏振态有关,即线偏振光的影响最大,圆偏振光的影响最小。根据数值仿真结论,提出了相应的斜反射波前像差校正方法:根据金属反射介质对圆偏振光的影响最小的特点,可利用圆偏振光法将所引入的斜反射波前像差加以忽略;根据椭圆度互为倒数的偏振光的斜反射相移曲线关于零相移曲线存在一定对称性的特点,可利用波片旋转补偿法将光束的偏振平面与待测面之间相对转动 90° ,进而可对所引入的斜反射波前像差进行有效的校正。实验中对本文提出斜反射波前像差校正方法进行了验证,并使得校正后的面形偏差 PV 值和 RMS 值分别低于 0.0194λ 和 0.0021λ 。

参 考 文 献

- 1 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*, 2010, **36**(5): 1156~1159
- 2 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
- 3 K. Patorski, L. Salbut. Simple polarization phase-stepping scatterplate interferometry [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(2): 393~397
- 4 Robert M. Neal, James C. Wyant. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(15): 3463~3476
- 5 P. F. Forman. The Zygo interferometer system [C]. *SPIE*, 1979, **192**: 41~48
- 6 D. Malacara. Optical Shop Testing [M]. 3rd ed. New Jersey: John & Sons, Inc., 2007. 24~25
- 7 Liu Guogang, Zhang Xuejun, Wang Quandou *et al.*. Fiber point diffraction interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 142~145
刘国淦, 张学军, 王权陡等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(2): 142~145
- 8 G. E. Sommargren, D. W. Phillion, M. A. Johnson *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL [C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 316~328
- 9 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2321~2324
马强, 刘伟奇, 李香波等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波前误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2321~2324
- 10 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffractive in extreme ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2849~2854
卢增雄, 金春水, 张立超等. 极紫外三位小孔矢量衍射波面质量分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2849~2854
- 11 K. Otaki, T. Yamamoto, Y. Fukuda *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(1): 295~300
- 12 Chen Jun. Optical Electromagnetic Fields Theory [M]. Beijing: Science Press, 2005. 96~108
陈军. 光学电磁理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 96~108
- 13 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 198~201
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 198~201
- 14 K. Rabinovitch, G. Toker. Polarization effects in optical thin films [C]. *SPIE*, 1994, **2253**: 89~102
- 15 Li Gang, Sun Lianchun, Yu Zhaobo *et al.*. Polarization effects in optical thin films [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(6): 647~651
李刚, 孙连春, 于兆波等. 光学薄膜中的偏振效应 [J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(6): 647~651