

Mueller矩阵成像偏振仪的误差标定和补偿研究

李建慧 郑 猛 张雪冰 李艳秋

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 Mueller矩阵成像偏振仪是测量材料和器件偏振特性的重要仪器,也是测量浸没光刻机偏振像差的检测仪器,该偏振仪由偏振态产生器和偏振态分析器组成。其组成中的 $\lambda/4$ 波片相位延迟量误差及其快轴方位角误差与偏振片透光轴的方位角误差是影响Mueller矩阵成像偏振仪测量精度的主要误差源。通过对本课题组研制的Mueller矩阵成像偏振仪中5个主要误差因素进行标定和补偿,显著提高了其测量精度。利用傅里叶分析法获得各项傅里叶系数,并根据各个误差与傅里叶系数的关系,实现了这些误差的标定,即达到对Mueller矩阵成像偏振仪误差标定的目的。根据标定出的误差大小对Mueller矩阵成像偏振仪进行了补偿。实验结果表明,通过对器件参数误差标定和补偿,Mueller矩阵成像偏振仪的测量精度由0.2015提高到0.1051,提高了47.84%。最后用该Mueller矩阵成像偏振仪对一个物镜系统的偏振像差进行了测量,重复测量精度达到了1.1%。

关键词 测量; Mueller矩阵成像偏振仪; 标定; 旋转波片法; 傅里叶分析法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.021202

Study on Calibration and Error Compensation of Mueller Matrix Imaging Polarimeter

Li Jianhui Zheng Meng Zhang Xuebing Li Yanqiu

*Key Laboratory Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

Abstract Mueller matrix imaging polarimeter is an effective instrument in measuring the polarization characteristics of materials and devices as well as the polarization aberration of immersion lithography tool, which is composed by polarization state generator and polarization state analyzer. The retardance and fast axis alignment in the quarter-wave plates and the alignment error in polarizer are the main factors in influencing the measurement accuracy of the Mueller matrix imaging polarimeter. We measure the five primary parameter errors of the Mueller matrix imaging polarimeter of our laboratory developed. The measurement accuracy can be significantly enhanced. The calibration and compensation are carried out by Fourier analysis method. The experiment results show that the measurement accuracy of Mueller matrix imaging polarimeter has been increased from 0.2015 to 0.1051, which is 47.84% better than the un-calibrated one. At last, we measure the polarization aberration of projector with the calibrated Mueller matrix imaging polarimeter. The measurement repeatability is better than 1.1%.

Key words measurement; Mueller matrix imaging polarimeter; calibration; rotating quarter-wave plate method; Fourier analysis method

OSCI codes 120.5405; 120.2130; 260.5430

1 引言

随着光刻机投影物镜^[1-3]数值孔径(NA)的不断增加,光刻曝光系统引入了偏振照明,然而照明系统和投影物镜中存在诸多影响光偏振态的因素,如光学材料的本征双折射及应力双折射、膜层的吸收和散射效应^[4]等,都会导致照明和成像光束的偏振态发生变化,从而影响投影物镜的成像质量^[5-9]。根据Chipman给出的偏振像差^[10]的定义,即偏振光经过光学系统后,出瞳面上光波偏振态的变化称为成像系统的偏振像差,才可控制投影

收稿日期: 2015-07-01; **收到修改稿日期:** 2015-07-15; **网络出版日期:** 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003)、国家科技重大专项、北京高等学校青年英才计划

作者简介: 李建慧(1990—),女,博士研究生,主要从事偏振检测技术方面的研究。E-mail: ljhjy@bit.edu.cn

导师简介: 李艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事高分辨成像及先进光刻技术,传感与微系统技术,微纳检测技术及精密光学仪器等方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

物镜的偏振像差,保证光刻机的高分辨力成像。目前,偏振像差主要由 Jones 光瞳和 Mueller 光瞳^[11],其中 Mueller 光瞳可以方便测量,因此,在偏振检测领域,通常使用 Mueller 光瞳来表示投影物镜的偏振像差。

目前,针对高 NA 光刻投影物镜 Mueller 矩阵的在线检测,国内外公开发表的研究成果相对较少,主要为东芝 Nomura 等^[12-14]开发的基于光调制法的在线检测技术,此检测系统采用自主研发的偏振掩模,实现了投影物镜 Mueller 光瞳的测量,但是其偏振掩模加工困难、成本高。本课题组基于双旋转波片法^[15],对前人的方法进行了改进,研制了测量投影物镜偏振像差的 Mueller 矩阵成像偏振仪^[16-17]。为了研究光刻机偏振及偏振像差检测技术,本课题组自主研发了可见光偏振像差检测平台,该平台主要由激光器、扩束镜、匀光镜组、投影物镜、准直镜组成。本课题组的偏振检测系统主要由偏振态产生器(PSG)、偏振态分析器(PSA)和 CCD 相机组成,即 Mueller 矩阵成像偏振仪。其中,PSG 由固定偏振片和可旋转的 $\lambda/4$ 波片组成(偏振片在前, $\lambda/4$ 波片在后),PSA 也由固定的偏振片和可旋转的 $\lambda/4$ 波片组成($\lambda/4$ 波片在前,偏振片在后),通过旋转 $\lambda/4$ 波片对光强进行调制,由 CCD 相机采集光瞳图像并送入计算机中处理。偏振器件参数误差是影响 Mueller 矩阵成像偏振仪测量精度的主要因素,因此需要对这些误差进行标定。主要考虑 Mueller 矩阵成像偏振仪中的 5 个误差源,分别为 PSG 中 $\lambda/4$ 波片的延迟量误差和快轴方位角误差,PSA 中 $\lambda/4$ 波片延迟量误差、快轴方位角误差和偏振片方位角误差。

针对旋转波片法成像斯托克斯偏振仪,张雪冰等^[18]基于傅里叶分析法,提出了一种误差标定方法,该方法标定出成像斯托克斯偏振仪中 $\lambda/4$ 波片的相位延迟量误差和快轴方位角误差。在此基础上,根据 Goldstein 提出的傅里叶分析方法^[15, 19],利用 Mueller 矩阵各元素与各个误差之间的关系式,计算得到了 Mueller 矩阵成像偏振仪的 5 个主要误差值,从而实现了各个误差标定。本文采用标定好的 Mueller 矩阵成像偏振仪对实验室研制的数值孔径为 0.5 的反射式投影物镜进行了多次测量,重复测量精度达到了 1.1%。

2 标定原理

图 1 是基于双旋转波片法的 Mueller 矩阵成像偏振仪示意图^[15],主要由 PSG、PSA 和 CCD 相机构成,PSG 由固定位置和方向的偏振片 P_1 和可旋转的 $\lambda/4$ 波片 Q_1 组成,PSA 由可旋转的 $\lambda/4$ 波片 Q_2 和透光轴方向与 P_1 相同的偏振片 P_2 组成,PSA 结构与 PSG 结构对称。

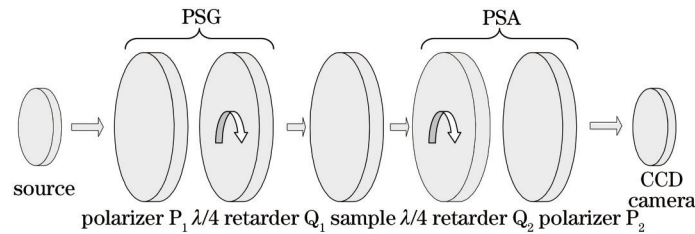


图 1 基于双旋转波片法的 Mueller 矩阵成像偏振仪

Fig.1 Schematic of the dual-rotating-retarder Mueller matrix imaging polarimeter

在偏振仪测量过程中,按一定的旋转角度比 n (Q_1 旋转角度为 θ , Q_2 旋转角度为 $n\theta$, $n \geq 5$) 同时旋转 Q_1 和 Q_2 来调制入射光束^[19],则 CCD 探测到的光强信号 I 可以表示为

$$I = AMP = [1 \ 0 \ 0 \ 0] M_{P_2} M_{Q_2} M_S M_{Q_1} M_{P_1} S_0, \quad (1)$$

式中 P 是 PSG 产生的偏振态, A 为 PSA 的 Mueller 矩阵, S_0 为光源偏振态, M_S 为样品的 Mueller 矩阵。(1) 式可以写为

$$I = \sum_{i,j=1}^4 a_i p_j m_{ij}, \quad (2)$$

式中 m_{ij} 为样品 Mueller 矩阵各元素, a_i 为 A 中的元素, p_j 为 P 中的元素。令 $\mu_{ij} = a_i p_j$, 代入(2)式可得:

$$I = \sum_{i,j=1}^4 \mu_{ij} m_{ij}, \quad (3)$$

当 Q_1 和 Q_2 按旋转角度比为 1:5 同时旋转时,则 μ_{ij} 可以写为如下形式^[19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_{11} = 1 \\ \mu_{12} = \cos^2(2\theta) \\ \mu_{13} = \sin(2\theta)\cos(2\theta) \\ \mu_{14} = \sin(2\theta) \\ \mu_{21} = \cos^2(10\theta) \\ \mu_{22} = \cos^2(2\theta)\cos^2(10\theta) \\ \mu_{23} = \sin(2\theta)\cos(2\theta)\cos^2(10\theta) \\ \mu_{24} = \sin(2\theta)\cos^2(10\theta) \\ \mu_{31} = \sin(10\theta)\cos(10\theta) \\ \mu_{32} = \cos^2(2\theta)\sin(10\theta)\cos(10\theta) \\ \mu_{33} = \sin(2\theta)\cos(2\theta)\sin(10\theta)\cos(10\theta) \\ \mu_{34} = \sin(2\theta)\sin(10\theta)\cos(10\theta) \\ \mu_{41} = -\sin(10\theta) \\ \mu_{42} = -\cos^2(2\theta)\sin(10\theta) \\ \mu_{43} = -\sin(2\theta)\cos(2\theta)\sin(10\theta) \\ \mu_{44} = -\sin(2\theta)\sin(10\theta) \end{array} \right. , \quad (4)$$

式中 θ 为 Q_1 的旋转方位角。实验中光强 I 通过旋转 $\lambda/4$ 波片角度进行调制,可以对光强 I 进行傅里叶展开,当 Q_1 和 Q_2 按旋转角度比为1:5同时旋转时,光强 I 可以展开为如下形式^[19]:

$$I = a_0 + \sum_{n=1}^{12} (a_{2n} \cos 2n\theta + b_{2n} \sin 2n\theta). \quad (5)$$

P_2 透光轴方位角固定在水平方向时,基于Mueller矩阵运算和傅里叶分析,可得到Mueller矩阵各元素^[19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{11} = a_0 - a_2 + a_8 - a_{10} + a_{12} \\ m_{12} = 2a_2 - 2a_8 - 2a_{12} \\ m_{13} = 2b_2 + 2b_8 - 2b_{12} \\ \vdots \end{array} \right. . \quad (6)$$

上式等号右端均为傅里叶系数。以上推导过程没有考虑任何偏振器件的参数误差,然而,偏振器件存在加工、装调等误差,因此,必须要考虑Mueller矩阵成像偏振仪中偏振器件误差。

在Mueller矩阵成像偏振仪的实际装调中,将 P_1 固定的透光轴方位角作为旋转方向的参考轴,并以该参考轴来确定 Q_1 、 Q_2 的快轴方位角,以及 P_2 的透光轴方位角。假设 Q_1 相位延迟量误差为 ε_1 ,快轴方位角误差为 ε_3 , Q_2 相位延迟量误差为 ε_2 ,快轴方位角误差为 ε_4 , P_2 的透光轴方位角误差为 ε_5 ,则 Q_1 、 Q_2 的相位延迟量分别为 δ_1 、 δ_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_1 = \frac{\pi}{2} + \varepsilon_1 \\ \delta_2 = \frac{\pi}{2} + \varepsilon_2 \end{array} \right. . \quad (7)$$

根据Mueller矩阵理论,并采用小角度近似^[19],即 $\sin x \approx x$, $\cos x \approx 1$,则傅里叶系数与各个误差之间的关系^[19]:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{1}{2} \sin \delta_1 \sin 2\varepsilon_3 m_{14} + \frac{1}{4} \beta_4 \sin \delta_1 \sin 2\varepsilon_3 \cos 2\varepsilon_5 m_{24} + \frac{1}{4} \beta_4 \sin 2\varepsilon_3 \sin 2\varepsilon_5 m_{34} \\ a_2 = \frac{1}{4} \beta_1 \cos 4\varepsilon_3 m_{12} + \frac{1}{4} \beta_1 \sin 4\varepsilon_3 m_{13} + \frac{1}{8} \beta_1 \beta_4 \cos 4\varepsilon_3 \cos 2\varepsilon_5 m_{22} + \\ \frac{1}{8} \beta_1 \beta_4 \sin 4\varepsilon_3 \cos 2\varepsilon_5 m_{23} + \frac{1}{8} \beta_1 \beta_4 \cos 4\varepsilon_3 \sin 2\varepsilon_5 m_{32} + \frac{1}{8} \beta_1 \beta_4 \sin 4\varepsilon_3 \sin 2\varepsilon_5 m_{33} \\ \vdots \end{array} \right. , \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= 1 - \cos \delta_1 & \beta_2 &= 1 - \cos \delta_2 \\
\beta_3 &= 1 + \cos \delta_1 & \beta_4 &= 1 + \cos \delta_2 \\
\alpha_1 &= 2\varepsilon_4 - 2\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5 & \alpha_2 &= 2\varepsilon_4 + 2\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5 \\
\alpha_3 &= 2\varepsilon_4 - 4\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5 & \alpha_4 &= 2\varepsilon_4 + 4\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5 \\
\alpha_5 &= 2\varepsilon_5 - 2\varepsilon_4 & \alpha_6 &= 2\varepsilon_5 - 4\varepsilon_4 + 2\varepsilon_3 \\
\alpha_7 &= 2\varepsilon_5 - 4\varepsilon_4 - 2\varepsilon_3 & \alpha_8 &= -2\varepsilon_5 + 4\varepsilon_4 - 2\varepsilon_3 = -\alpha_6 \\
\alpha_9 &= 4\varepsilon_4 - 4\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5 & \alpha_{10} &= 4\varepsilon_4 + 2\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5 \\
\alpha_{11} &= 4\varepsilon_4 - 2\varepsilon_5 & &
\end{aligned} \tag{9}$$

当 PSG 和 PSA 之间不加任何样品时,即空气的 Mueller 矩阵应为单位矩阵,将其对应的 Mueller 元素代入(8)式中,得到误差参量与傅里叶系数之间的关系式^[19]:

$$\begin{cases}
\varepsilon_3 = \frac{1}{4} \arctan^{-1}\left(\frac{b_8}{a_8}\right) - \frac{1}{4} \arctan^{-1}\left(\frac{b_{10}}{a_{10}}\right) \\
\varepsilon_4 = \frac{1}{2} \arctan^{-1}\left(\frac{b_2}{a_2}\right) - \frac{1}{2} \arctan^{-1}\left(\frac{b_6}{a_6}\right) + \frac{1}{4} \arctan^{-1}\left(\frac{b_8}{a_8}\right) - \frac{1}{4} \arctan^{-1}\left(\frac{b_{10}}{a_{10}}\right) \\
\varepsilon_5 = \frac{1}{2} \arctan^{-1}\left(\frac{b_2}{a_2}\right) + \frac{1}{2} \arctan^{-1}\left(\frac{b_6}{a_6}\right) - \frac{1}{2} \arctan^{-1}\left(\frac{b_{10}}{a_{10}}\right) \\
\delta_1 = \arccos^{-1}\left(\frac{a_{10} \cos \alpha_9 - a_8 \cos \alpha_{11}}{a_{10} \cos \alpha_9 + a_8 \cos \alpha_{11}}\right) \\
\delta_2 = \arccos^{-1}\left[\frac{a_2 \cos \alpha_9 - a_8 \cos(4\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5)}{a_2 \cos \alpha_9 + a_8 \cos(4\varepsilon_3 - 2\varepsilon_5)}\right]
\end{cases} \tag{10}$$

由此,即可得到各个偏振器件的误差值。根据得到的误差值,对 Mueller 矩阵成像偏振仪进行补偿,提高其测量精度。

3 实验与结果分析

3.1 实验系统标定

对 Mueller 矩阵成像偏振仪进行离线标定,将标定好的 Mueller 矩阵成像偏振仪移植到偏振检测集成系统中,然后对投影物镜偏振像差进行测量。Mueller 矩阵成像偏振仪标定装置如图 2 所示,由 He-Ne 激光器、衰减器、针孔滤波器、准直镜、PSG(偏振片 P_1 和 $\lambda/4$ 波片 Q_1 组成)、偏振态分析器 PSA(偏振片 P_2 和 $\lambda/4$ 波片 Q_2 组成)、毛玻璃和 CCD 相机构成。其中,PSG 结构与 PSA 结构对称;毛玻璃可由电机带动匀速旋转,目的是减小图像的相干噪声^[16]。

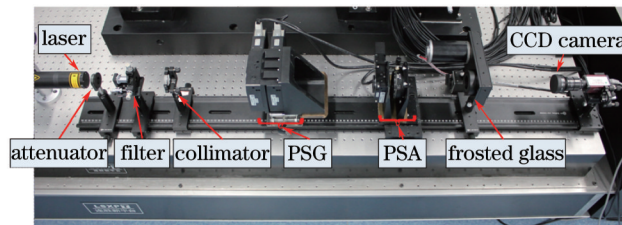


图 2 Mueller 矩阵成像偏振仪标定装置

Fig.2 Calibration schematic of the Mueller matrix imaging polarimeter

实验系统中,He-Ne 激光器输出波长为 632.8 nm;针孔滤波器由数值孔径为 0.4、倍率为 20 倍的物镜和针孔组成,针孔直径为 15 μm ,可产生标准的球面波; P_1 和 P_2 消光比均优于 4000:1,可近似为理想偏振片; Q_1 和 Q_2 为零级石英波片,其相位延迟量精度优于 $\lambda/300$; Q_1 和 Q_2 固定在电动旋转台上,其旋转精度优于 5',旋转带来的误差对 Mueller 矩阵各元素的误差不超过 0.29%,引起的 Mueller 光瞳各个参量总均方根偏差不超过 0.41%,与考虑的主要误差源带来的误差相比可以忽略。

PSG 和 PSA 之间不加任何器件时,即为空气时,取 P_1 透光轴方位角作为实验系统的旋转参考轴,并以此参考轴来确定 Q_1 、 Q_2 的快轴方位角和 P_2 透光轴方位角,使 P_2 透光轴与 P_1 透光轴相互平行。测量过程基于双旋转波片法, Q_1 从 0° 开始,每 5° 旋转一次,共旋转 36 次, Q_2 按 5 倍 Q_1 角度同时旋转,在每对旋转角度下分别采

集一幅光强图像,并通过图像处理计算出各个参数误差大小。

3.2 标定结果

CCD相机采集得到的光强图像如图3所示,图中角度为 Q_1 快轴对应的角度,对每幅图像进行处理,根据(5)~(10)式求出各个参数误差大小,如表1所示。

表1 Mueller矩阵成像偏振仪参数误差

Table 1 Parameter errors of Mueller matrix imaging polarimeter

Parameter error	Value /($^{\circ}$)
ε_1	0.7794
ε_2	0.2237
ε_3	1.9309
ε_4	1.9251
ε_5	1.1459

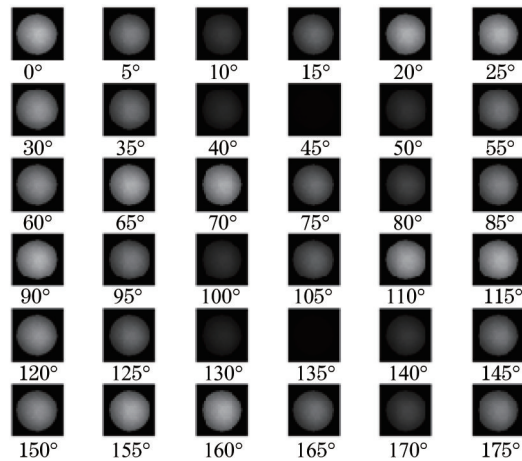


图3 CCD采集的光强图像

Fig.3 Intensity images captured by CCD

3.3 补偿前后 Mueller 矩阵成像偏振仪测量精度对比

本课题组对 $\lambda/4$ 波片 Q_1 、 Q_2 旋转角度进行了优化,提出了测量投影物镜偏振像差的新方法^[7],优化之后只需要旋转 Q_1 的快轴方位角为 $\pm 15^{\circ}$ 和 $\pm 52^{\circ}$,在每个角度下旋转 Q_2 快轴方位角为 $\pm 15^{\circ}$ 和 $\pm 52^{\circ}$,这样共采集16幅图像就可求得光学系统或光学元件的Mueller矩阵,与采用傅里叶分析法求样品的Mueller矩阵相比,此方法减少了测量次数,提高了测量效率。采用本课题组提出的方法对空气的Mueller光瞳进行测量,对Mueller矩阵成像偏振仪进行参数误差补偿前,计算得到的空气的归一化Mueller光瞳分布如图4所示。由于存在表1所示的参数误差,导致测量结果有较大误差。对Mueller矩阵成像偏振仪进行参数误差补偿后,测量结果如图5所示。由于只考虑了波片快轴方位角误差、延迟量误差及偏振片透光轴方位角误差,还有其

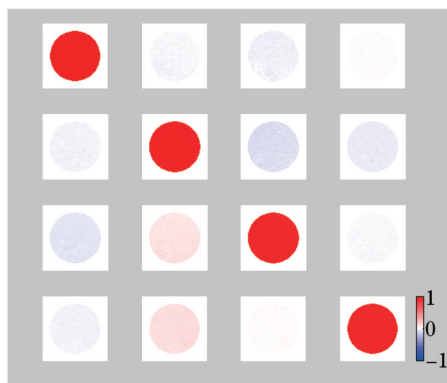


图4 误差补偿前空气的归一化 Mueller 光瞳分布

Fig.4 Normalized Mueller pupils of air before error compensation

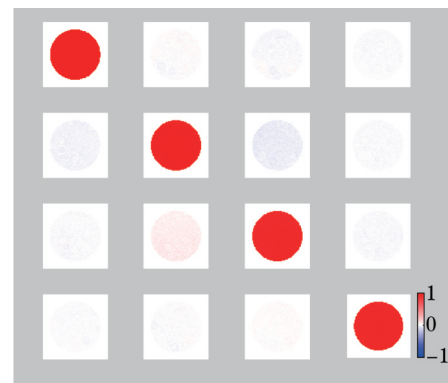


图5 误差补偿后空气的归一化 Mueller 光瞳分布

Fig.5 Normalized Mueller pupils of air after error compensation

他误差存在,因此,补偿后测得的空气的 Mueller 矩阵不是单位矩阵。但是,对比图 4 和图 5,可以看出,补偿后 m_{13} 、 m_{23} 、 m_{24} 、 m_{31} 、 m_{32} 和 m_{42} 误差明显减小。为了更直观地对比误差补偿前后测量精度,对图 4 和图 5 中各项 Mueller 光瞳求平均值,计算结果如下式所示:

$$M_{\text{before}} = \begin{bmatrix} 1 & -0.0131 & -0.0314 & 0.0033 \\ -0.0248 & 0.9995 & -0.0890 & -0.0482 \\ -0.0671 & 0.0863 & 0.9515 & -0.0093 \\ -0.0249 & 0.1031 & 0.0095 & 0.9468 \end{bmatrix}, \quad (11a)$$

$$M_{\text{after}} = \begin{bmatrix} 1 & -0.0056 & -0.0070 & -0.0056 \\ -0.0135 & 0.9919 & -0.0423 & -0.0060 \\ -0.0048 & 0.0530 & 0.9409 & -0.0099 \\ -0.0028 & -0.0006 & 0.0094 & 0.9517 \end{bmatrix}. \quad (11b)$$

求得了误差补偿前后 Mueller 光瞳各个参量总均方根偏差;误差补偿前,归一化 Mueller 光瞳各个参量总均方根偏差 ΔM 为 0.2015;误差补偿后,归一化 Mueller 光瞳各个参量总均方根偏差 ΔM 为 0.1051, Mueller 矩阵成像偏振仪测量精度提高了 47.84%。总之,对 Mueller 矩阵成像偏振仪进行器件参数误差标定和补偿后,有效减小了测量误差,提高了偏振测量精度。

3.4 光刻机投影物镜偏振像差测量结果

图 6 为本课题组研制测量投影物镜偏振像差的检测系统,投影物镜为 Schwarzschild 结构,NA 为 0.5,其中,PSG 和 PSA 为偏振检测器件,利用标定后的 Mueller 矩阵成像偏振仪对投影物镜的 Mueller 光瞳进行测量,测量结果如图 7 所示,进行了 10 次测量,重复测量精度达到 1.1%。通过实验装置可测大数值孔径光刻投影物镜的偏振像差,进而可以分析偏振像差对光刻的影响,为补偿偏振像差、提高光刻分辨力奠定了基础。

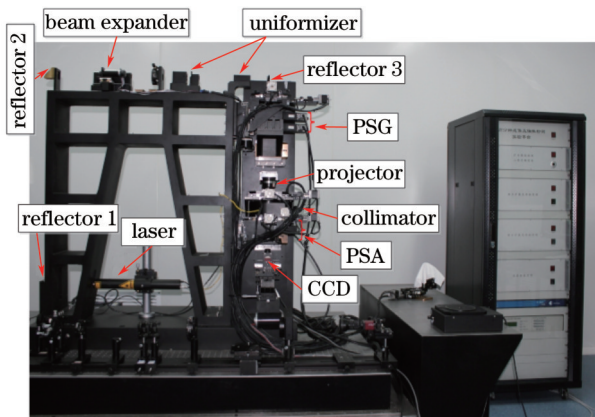


图 6 投影物镜偏振像差检测装置

Fig.6 Polarization aberration detection device of the projector

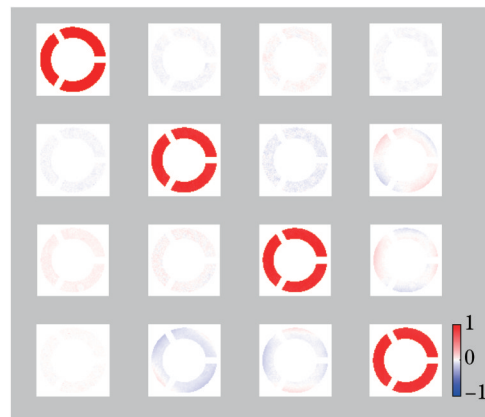


图 7 投影物镜 Mueller 光瞳分布

Fig.7 Mueller pupils of the projector

4 结 论

采用傅里叶分析法,对 Mueller 矩阵成像偏振仪存在的主要误差进行了标定,得到了 PSG 中 Q_1 、PSA 中 Q_2 的快轴方位角误差和相位延迟量误差,及 P_2 透光轴方位角误差,从而实现对 Mueller 矩阵成像偏振仪的误差标定和补偿。实验结果表明,通过器件参数误差标定和补偿, Mueller 矩阵成像偏振仪的平均测量精度由 0.2015 提高至 0.1051,测量精度提高了 47.84%,偏振测量精度得到有效提高,并利用补偿后的系统对投影物镜的 Mueller 光瞳进行了多次测量,重复测量精度达到了 1.1%。

参 考 文 献

- 1 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 2 Rui Dawei, Shi Zhenguang, Yuan Wenquan, *et al.*. Pupil non-balance calibration for lithographic lens[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0916002.

- 芮大为, 史振广, 袁文全, 等. 光刻物镜光瞳极平衡性标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0916002.
- 3 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Optical design of lithography projective lens with variable total track[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416003.
- 蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰, 共轭距可变的光刻投影物镜光学设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416003.
- 4 D Flagello, B Geh, S Hansen. Polarization effects associated with hyper-numerical-aperture lithography[J]. J Microlith, Microfab, Microsyst, 2005, 4(3): 031104.
- 5 M Totzeck, P Gräupner. How to describe polarization influence on imaging[J]. Optical Microlithography, 2005, 5754: 23-37.
- 6 T Matsuyama, T Nakashima. Study of high NA imaging with polarized illumination[C]. SPIE, 2005, 5754: 1078-1089.
- 7 C Kohler, W Boeij, K IngenSchena. Imaging enhancements by polarized illumination: theory and experimental verification [C]. SPIE, 2005, 5754: 734-750.
- 8 Bernd Geha, Johannes R uoff. The impact of projection lens polarization properties on lithographic process at hyper-NA [J]. Optical Microlithography, 2007, 6520: 1-18.
- 9 J Kye, G McIntyre, Y Norihiro. Polarization aberration analysis in optical lithography systems[C]. SPIE, 2006, 6154: 61540E-1-11.
- 10 Russell Chipman. Polarization Aberration[D]. USA: University of Arizona, 1987.
- 11 Gregory R McIntyre, Jongwook Kye, Harry Levinson, *et al.*. Polarization aberrations in hyper-numerical aperture projection printing: a comparison of various representations[J]. Journal of Microlithography Microfabrication and Microsystems, Microsyst, 2006, 5(3): 1-13.
- 12 H Nomura, Y Furutono. In-situ polarimetry of illumination for 193-nm lithography[C]. SPIE, 2008, 6924: 69241T.
- 13 H Nomura, I Higashikawa. In-situ Mueller matrix polarimetry of projection lenses for 193-nm lithography[C]. SPIE, 2010, 7640: 76400Q.
- 14 H Nomura, I Higashikawa. Mueller matrix polarimetry for immersion lithography tools with a polarization monitoring system at the wafer plane[C]. SPIE, 2009, 7520: 752012-1.
- 15 D H Goldstein. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter[J]. Appl Opt, 1992, 31: 6676-6683.
- 16 Li Lei, Li Yanqiu, Chi Quan, *et al.*. Optimized imaging polarimeter for measuring polarization properties of hyper numerical aperture lithography tools[C]. SPIE, 2014, 9282: 928232.
- 17 Li Lei. Research on Polarimetric Technology for Lithography Exposer System[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- 李 磊. 光刻投影曝光系统的偏振检测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- 18 Zhang Xuebing, Li Yanqiu, Zheng Meng, *et al.*. Calibration and error compensation of an imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708007.
- 张雪冰, 李艳秋, 郑 猛, 等. 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708007.
- 19 Dennis H Goldstein, Russell A Chipman. Error analysis of a Mueller matrix imaging polarimeter[J]. J Opt Soc Am A, 1990, 7(4): 693-700.

栏目编辑: 韩 峰