

文章编号 1004-924X(2011)11-2582-07

光学成像系统光学波前的高精度测试

邵 晶^{1,2}, 马冬梅^{1*}, 聂真威^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:基于扩展奈波尔-泽尼克理论,分析了不同出瞳振幅分布情况对光学系统焦面处光强分布的影响。针对光学成像系统出瞳振幅实际分布状态,提出了一种新的测试光学波前的方法,解决了相位恢复算法中出瞳振幅分布不均匀和快速傅里叶变换引入计算误差的问题。通过测评实验,对一光学系统进行了测试,获得的光学系统出瞳波前(PV)值为 $0.196\,5\lambda$, RMS 值为 $0.022\,4\lambda$ (测试波长 $\lambda=632.8\,\text{nm}$),此波前中主要含有像散、彗差和高阶像散等像差。该方法亦可用于分析光学系统出瞳振幅分布,数值计算其他焦面处的光强分布。测评实验证明了此方法的有效性。

关键词:光学检测;光学成像系统;光学波前;光瞳函数;出瞳振幅分布;相位复原

中图分类号:TH70;TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2582

Accurate test of optical wave front for optical imaging system

SHAO Jing^{1,2}, MA Dong-mei^{1*}, NIE Zhen-wei^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: dongmei-ma2002@yahoo.com.cn*

Abstract: Based on the Extended Nijboer-Zernike theory, the effect of different amplitudes for exit pupils on the image intensity in the focal plane was analyzed. A novel approach was applied to testing the wavefront according to the actual condition of the amplitude in the exit pupil, which can help eliminating the error caused by the nonuniformity illuminated pupil and the Fast Fourier Transform in the original phase retrieval algorithms. A testing experiment was performed on an imaging optical system, and obtained results show that the tested wave fronts in the exit pupil of a camera lens are $0.196\,5\lambda$ in PV and $0.022\,4\lambda$ in RMS (the testing wavelength λ is $632.8\,\text{nm}$). The aberrations in the wavefront are mainly astigmatism, coma and high order astigmatism. Furthermore, the approach can also be used to analyze the amplitude in the exit pupil of a camera lens and calculate the light intensity distribution on other focal planes. The experiment proves this approach available.

收稿日期:2011-05-10;修订日期:2011-06-21.

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目

Key words: optical testing; optical imaging system; optical wavefront; pupil function; amplitude in the exit pupil; phase retrieval

1 引言

光刻投影物镜像差对光刻质量产生极大的影响,如何评估这些影响已成为光刻领域的研究重点^[1-2]。对于相干照明下的衍射受限系统,物像关系被描述为几何光学理想像的复振幅分布与光学成像系统点扩散函数的卷积。因此,计算光刻曝光系统的复杂物体成像强度图形需要得到光学系统的点扩散函数。奈波尔-泽尼克(Nijboer-Zernike)理论^[3]被提出用于计算光学系统的点扩散函数。最初 Nijboer 只研究了出瞳被均匀照明下小像差的点扩散函数计算。而在实际应用中,光刻投影物镜的出瞳往往被非均匀照明因而会具有较大像差,硅晶可能被放置于曝光系统的离焦位置,所以这种理论一直没有应用在实际工作中。

2002 年, Augustus 和 Joseph 等人^[4-5]推导了 Nijboer-Zernike 离焦的数学表达式,得到了扩展奈波尔-泽尼克(Extended Nijboer-Zernike)理论。利用泽尼克多项式乘以复数系数展开光瞳函数,能够分析出瞳非均匀照明情况下光学系统焦面附近的光强分布。2003 年, Peter Dirksen 等人又提出了利用扩展奈波尔-泽尼克理论反推光学系统光瞳函数的数学算法^[6]。

早在 20 世纪,国外发达国家开始了通过位相复原技术获得光学系统波像差的研究,并已应用在大型空间望远镜的在轨调试中^[7-11]。这种方法是通过采集和分析焦面处的星点图像,利用相位复原算法得到系统的出瞳波前。目前,国内对这种检测方法也积极地展开了研究^[12-15]。诸如 GS 算法,通过估算出瞳振幅分布,采用快速傅里叶变换的方法计算点扩散函数(PSF);但如果遇到出瞳非均匀照明的情况,这种计算会引入误差,而且采用快速傅里叶变换的方法也会引入高频误差。

本文基于扩展奈波尔-泽尼克理论,分析了不同光学系统出瞳振幅分布情况对光学成像质量的影响。针对光学系统出瞳振幅实际分布状态,提出了基于扩展奈波尔-泽尼克理论高精度测试光学成像系统光学波前的方法,解决了原有相位恢

复算法中出瞳分布不均匀和快速傅里叶变换引入计算误差的问题。并通过实验证实了这种方法的可靠性。该方法不仅能够测试光学系统出瞳波前,也能够分析光学系统出瞳振幅分布,可以数值计算其他焦面处的光强分布,为准确评估光刻曝光系统提供了另一种途径。

2 出瞳振幅分布对成像的影响^[4-5]:

在成像系统中,点扩散函数与光瞳函数有着密切的关系,将光瞳函数 $P(u, v)$ 展开为泽尼克多项式的线性组合:

$$P(u, v) = \sum \beta_n Z_n^m(u, v) = \sum \beta_n R_n^m(\rho) \cos m\varphi, \quad (1)$$

为了简便,这里只考虑余弦项。其中 $n, m \geq 0$; β_n 是复数。这样光学系统的点扩散函数为:

$$U(r, \varphi) = \sum \beta_n 2i^m \int_0^1 \exp(if\rho^2) \rho R_n^m(\rho) \cdot J_m(2\pi\rho r) d\rho \cos m\varphi = \sum \beta_n 2i^m V_n^m(r, f) \cos m\varphi, \quad (2)$$

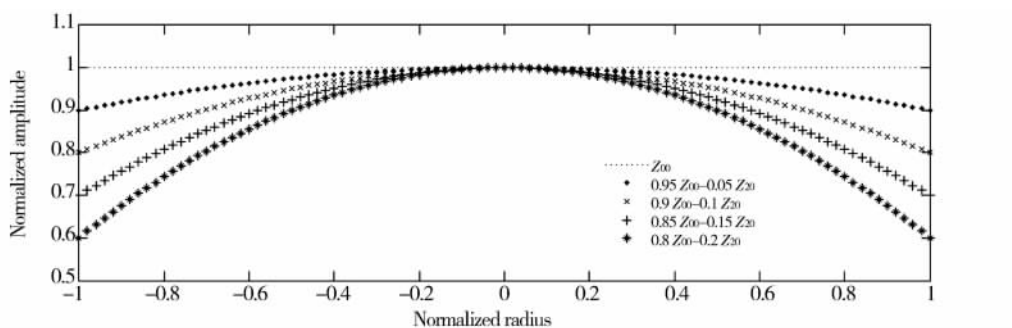
$$\text{其中, } V_n^m(r, f) = \int_0^1 \exp(if\rho^2) \rho R_n^m(\rho) \cdot J_m(2\pi\rho r) d\rho. \quad (3)$$

根据 Nijboer-Zernike 扩展理论,用级数的形式展开 V_n^m 代数式,使用数学计算的方法解决了快速傅里叶变换引入高频误差的问题。

假设光学系统的出瞳波前没有像差 $\Delta W = 0$, 根据公式(1),出瞳振幅分布可以表示成实数系数乘以 Zernike 多项式的线性组合形式。对归一化的出瞳振幅分布引入误差进行分析,光学系统的数值孔径 $NA = 0.5$, 波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 如图 1 所示。其中图 1(a) 为出瞳振幅分布, 分别表示为 $Z_{00}, 0.95Z_{00} - 0.05Z_{20}, 0.9Z_{00} - 0.1Z_{20}, 0.85Z_{00} - 0.15Z_{20}, 0.8Z_{00} - 0.2Z_{20}$ 5 种不同状态下的出瞳振幅分布。经计算,得到焦面处的中心光强分布,如图 1(b) 所示,获得中心光强最大值分别为 4.00, 3.61, 3.24, 2.89, 2.56。随着出瞳边缘振幅的下降,焦面处的中心光强降低,对比出瞳振幅分布为 1 的理想情况 $Z_{00}, 0.95Z_{00} - 0.05Z_{20}, 0.9Z_{00} - 0.1Z_{20}, 0.85Z_{00} - 0.15Z_{20}, 0.8Z_{00} - 0.2Z_{20}$ 的中心最大光强分别下降了 9.75%、19%、27.75%、36%。根据公式 $0.61\lambda/NA$, 得到理想

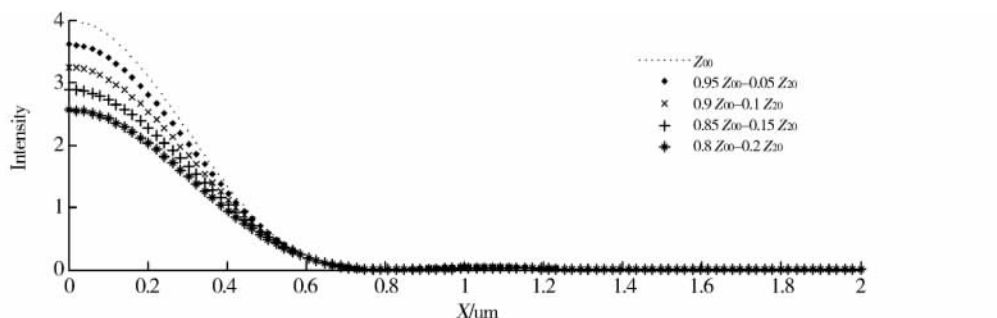
状态下艾里斑半径为 $0.77 \mu\text{m}$, 从图 1(b) 的计算结果可以看出, 5 种出瞳分布的中心光强极小值基本不变。按照瑞利准则^[16], 两个衍射图样的能量合成曲线的能量峰值和谷值之比为 $1:0.735$, 得到 5 种振幅分布状态下能分辨的最小线度分别为 $0.3847, 0.3896, 0.3928, 0.3977, 0.4042$

μm 。对比出瞳振幅分布为 1 的理想情况 Z_{00} , $0.95Z_{00} - 0.05Z_{20}$, $0.9Z_{00} - 0.1Z_{20}$, $0.85Z_{00} - 0.15Z_{20}$, $0.8Z_{00} - 0.2Z_{20}$ 的分辨能力分别下降了 1.17% 、 2.11% 、 3.38% 、 5.07% 。可见出瞳振幅分布不仅影响焦面处的中心光强值, 对光学系统的分辨率也会产生影响。



(a) 不同的出瞳振幅分布

(a) Different amplitudes in exit pupil



(b) 焦面处的光强分布

(b) Intensity of focal region

图 1 不同出瞳振幅分布下的焦面处光强分布

Fig. 1 Intensity of focal region with different amplitudes in exit pupil

3 相位恢复算法^{[6][17-18]}:

由公式(3)可以得到去除交叉项的点扩散函数的光强表达式:

$$I \approx I_d = 4\beta_0^2 |V_0^0|^2 + 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \text{Re}(\beta_n^m) \text{Re}[i^m V_n^m V_0^{0*}] \cos m\varphi - 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \text{Im}(\beta_n^m) \text{Im}[i^m V_n^m V_0^{0*}] \cos m\varphi, \quad (4)$$

式(4)中“ $\cdot$ ”代表 $n=m=0$ 项已被删除, 交叉项 $C(x,y)$ 的表达式如下:

$$C(x,y) = 4 \sum_{n_1, m_1; n_2, m_2} \left\{ \text{Re}[\beta_{n_1}^{m_1} \beta_{n_2}^{m_2*}] i^{m_1-m_2} V_{n_1}^{m_1} V_{n_2}^{m_2*} \right\} \times \cos m_1 \varphi \cos m_2 \varphi, \quad (5)$$

其中“ $\cdot$ ”表示所有 $n_1=m_1=0$ 或者 $n_2=m_2=0$ 项

被删除, 对采样光强进行余弦变换, 得到:

$$I_d^m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d(r, \varphi; f) \cos m\varphi d\varphi =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} (\beta_0^0)^2 x_0^0 + \sum_n \left[\beta_0^0 \text{Re}(\beta_n^0) x_n^0 + \sum_n \beta_0^0 \text{Im}(\beta_n^0) \Psi_n^0 \right], m=0 \\ \sum_n \beta_0^0 \text{Re}(\beta_n^m) x_n^m + \sum_n \beta_0^0 \text{Im}(\beta_n^m) \Psi_n^m, m>0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\text{其中}, x_n^m = 8\epsilon_m \text{Re}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)], \quad (7)$$

$$\Psi_n^m = -8\epsilon_m \text{Im}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)], \quad (8)$$

如果 $m=0, \epsilon_m=1$; 否则, $\epsilon_m=0.5$ 。定义内积如下:

$$(\Psi, x) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \Psi(r, f) x(r, f)^* df dr. \quad (9)$$

这里假设 β_0^0 为实数, 根据文献[17]建立方程

组,求解方程组得到系数 β_n^m 。为了消除交叉项引入的高阶误差,引入 Predict-Correct 迭代算法。将求解的系数 $\beta_n^m(k)$ 带入交叉项表达式(5)中,使用公式(4) $I_d = I - C(x, y; k)$ 替换测得的光强 I 进行下一步迭代运算,最终得到求解系数 β_n^m 。将系数 β_n^m 代入公式(1),对获得的光瞳函数提取相位和振幅,便可以获得光学系统的出瞳波前和振幅分布。

4 测试实验

按照测试原理搭建了实验平台,对焦距为 102 mm、相对口径为 1:16 的镜头进行了测试分析,如图 2 所示。其中由卤素灯作为照明光源,利用中心波长为 632.8 nm 的窄带滤光片得到近似单色光,经过反射式平行光管,产生单色平行光束。将待测镜头放置于光路中,显微物镜、适配镜头和 CCD 相机组成了测试系统。CCD 相机为 BASLER 黑白相机,12 bit 模数转换,1394 接口。

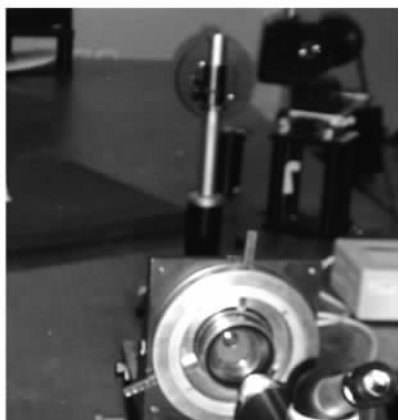


图 2 测试装置的照片

Fig. 2 Photograph of testing device

以焦面为中心,对称等间距采集离焦图像(如图 3)。从采集的星点图像中可以看出,该镜头带有像散和少量的彗差。按照上述的测试原理,对采集的图像选取有效数据,利用 MATLAB 编写的软件进行运算,得到复原结果,如图 4 所示。

图 4(a)是利用波前分析软件^[19]进行波前拟合分析得到的结果。出瞳波前 $PV=0.196\ 5\lambda$, $RMS=0.022\ 4\lambda$, $\lambda=632.8\text{ nm}$ 。其中 $Z_5=-0.017\ 47\lambda$; $Z_6=-0.025\ 30\lambda$; $Z_7=-0.026\ 42\lambda$; $Z_9=0.016\ 66\lambda$; $Z_{14}=-0.031\ 27\lambda$ 。SEIDEL 像差中,像散为 0.061

4λ , 角度为 207° ; 彗差为 $0.080\ 6\lambda$, 角度为 -10° ; 球差为 $0.099\ 9\lambda$ 。得到结果与前述的判断基本一致。

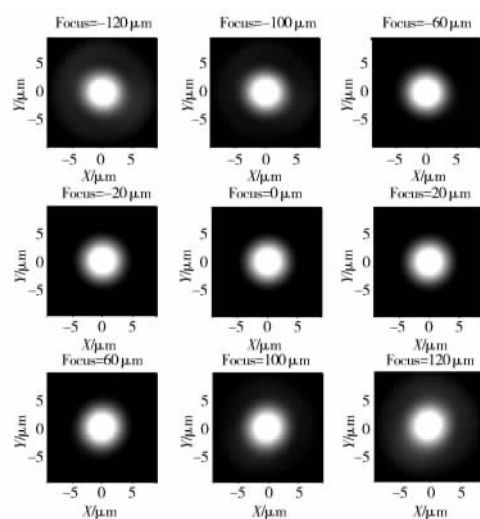
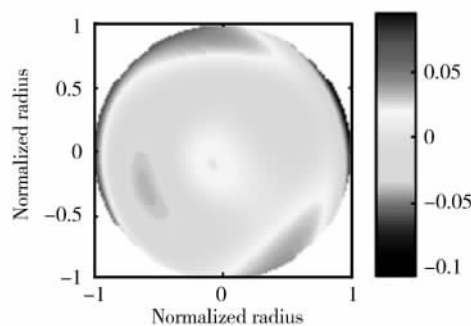


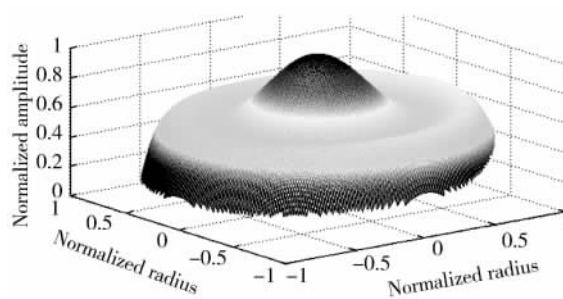
图 3 采集的离焦图像

Fig. 3 Defocus images



(a) 计算得到的出瞳波前拟合结果

(a) Result of calculated wavefront fitting in exit pupil



(b) 出瞳振幅分布

(b) Amplitude in exit pupil

图 4 测试结果

Fig. 4 Testing results

图 5 为不同离焦量情况下,采集的星点图像和反演得到的点扩散函数的轮廓图。其中,从(a)

到(i)离焦距离分别为 $-120, -100, -60, -20, 0, 20, 60, 100, 120 \mu\text{m}$ 。可以看出二者基本重叠在一起,通过这种方法验证了计算结果的正确性。

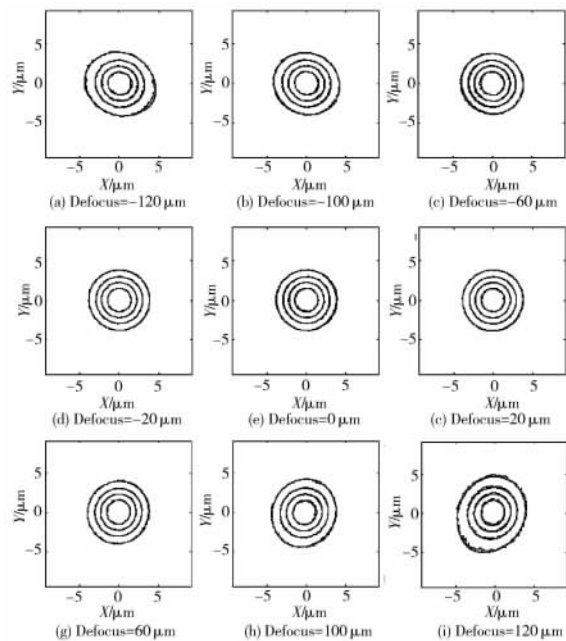


图 5 不同离焦量情况下采集的星点图像和反演得到的点扩散函数的轮廓图

Fig. 5 Profiles of PSF and image at different defocus distances

5 实验误差分析

利用干涉仪对此光学系统进行波前测试,光学系统的波像差为 0.015λ (RMS),与实验结果相比,二者相差 0.0074λ 。从图 5 的实验结果中可以看出,本次实验结果误差产生有以下几个原因:测试镜头的 NA 以及实际采样数值的不准确会给计算带来较大误差;同时,由于小孔截断了照明光源的大部分能量,导致 CCD 相机接收能量偏低,噪声较大,信噪比下降;采用 1394 接口的 CCD 相机,探测弱光的能力下降;振动也会改变采集图像的中心,会给测试精度带来影响。以上几个方面可以通过改进实验条件消除影响。

CCD 相机采样率过低也会对计算带来误差,

其原理如图 6 所示:进行离散化数值计算,图中 B 的数值为真实值,但是 CCD 相机的像元尺寸是一定的,经过 CCD 采样得到的数值 D 是数值 A, B, C 三者的平均值,以数值 D 代替数值 B 进行计算,会给计算带来误差。在 CCD 的非线性响应得到很好校正的前提下,低采样率引入的误差是最主要的。这个问题可以通过提高采样率或者利用亚像元的方法解决。同时,利用相位恢复的系数生成星点图像,对其引入 55 dB 的噪声和相同的采样率误差,经计算分析,上述测试过程中噪声和采样率过低对波前测试引入的误差为 0.00746λ (RMS)。进一步证明上述实验的数据在误差范围内是有效的。

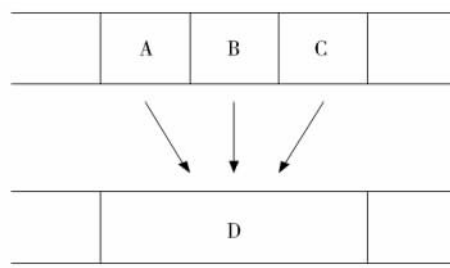


图 6 CCD 采集示意图

Fig. 6 Schematic of sampling with CCD camera

6 结 论

本文基于扩展奈波尔-泽尼克理论,分析了出瞳振幅分布不均匀对光学成像质量的影响。针对出瞳振幅分布不均匀的光学系统,提出了一种高精度测试光学成像系统光学波前的方法,该方法能够解决出瞳振幅分布不均匀和快速傅里叶变换引入计算误差的问题。按照测试原理进行了测评实验,获得光学系统的出瞳波前值 $PV = 0.1965\lambda$, $RMS = 0.0224\lambda$ (测试波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。利用计算得到的泽尼克多项式复数系数重新计算 PSF,并与原采集图像进行比较,二者基本相同。实验证明了这种方法对出瞳非均匀照明的情况下进行相位复原的有效性。

参考文献:

[1] FLAGELLO D, DER LAAN H V. *et al.*. Under-

standing systematic and random CD variations using predictive modelling techniques[J]. *SPIE*, 1999, 3679:162-175.

- [2] SMITH B W, SCHLIEF R. Understanding lens aberration and influences to lithographic imaging[J]. *Optical Microlithography XIII*, 2000 :294-306.
- [3] NIJBOER B R A. *The diffraction theory of aberrations*[D]. Groningen: University of Groningen, 1942.
- [4] JANSSEN A J E M. Extended Nijboer Zernike approach for the computation of optical point-spread functions[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002 ,19 : 849-856.
- [5] BRAAT J, DIRKSEN P, JANSSEN A J E M. Assessment of an extended Nijboer Zernike approach for the computation of optical point-spread functions [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002 ,19 : 858-870.
- [6] DIRKSEN P, BRAAT J, JANSSEN A J E M. Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach[J]. *SPIE*, 2003, 4691:61-68.
- [7] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optic*, 1971, 34: 275-283.
- [8] FIENUP J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. *Optic Letters*, 1978,3(1):27-29.
- [9] FIENUP J R, MARRON J C, SCHULZ T J, *et al.*. Hubble space telescope characterized by using phase-retrieval algorithms [J]. *Applied optics*, 1993, 32:1747-1767.
- [10] DEAN B H, ARONSTEIN D L, SMITH J S, *et al.*. Phase retrieval algorithm for WST flight and tested telescope[J]. *SPIE*, 2006, 6265:1-17.
- [11] BRADY G R, FIENUP J R. Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function[J]. *Optics Express*, 2006, 14:474-486.
- [12] 马冬梅, 陈士泉, 刘志祥, 等. 位相复原技术在光学成像质量测评中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):2912-2918.
- MA D M, CHEN T Q, LIU ZH X, *et al.*. Application of phase retrieval technology in evaluation of optical imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):2912-2918. (in Chinese)
- [13] 吴元昊, 王斌, 赵金宇等. 利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1849-1854.
- WU Y H, WANG B, ZHAO J Y, *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1849-1854. (in Chinese)
- [14] 马冬梅, 陈士泉. 点衍射波前位相的测评[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2390-2397.
- MA D M, CHEN T Q. Testing and evaluation of wavefront phase of point diffraction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2390-2397. (in Chinese)
- [15] 黄利新, 姚新, 蔡冬梅, 等. 一种快速高精度的相位恢复迭代算法[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1218-1221
- HUANG L X, YAO X, CAI D M, *et al.*. A high accuracy and fast iterative algorithm for phase retrieval[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1218-1221. (in Chinese)
- [16] 胡家升. 光学工程导论[M]. 第二版. 大连: 大连理工大学出版社, 2005:579-583.
- HU J SH. *Introduction to Optical Engineering* [M]. Second Edition. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005: 579-583. (in Chinese)
- [17] DER AVOORT C V, BRAAT J J M, DIRKSEN P. *et al.*. Aberration retrieval from the intensity point-spread function in the focal region using the extended Nijboer Zernike approach [J]. *Modern Optics*, 2005 , 52(12):1695-1728.
- [18] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. *Handbook of Mathematical Functions* [M]. New York: Dover, 1970: 480-481.
- [19] 刘志祥. 大口径光学系统波前分析技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008: 19-36.
- LIU ZH X. *Study on the wavefront analysis of large aperture optical system*[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008: 19-36. (in Chinese)

作者简介:



邵晶(1984—),男,山东人,博士研究生,2008年于山东大学获得学士学位,主要从事相位复原等方面的研究。E-mail: qunying12@163.com



聂真威(1982—),男,辽宁鞍山人,助理研究员,2005年于大连理工大学获得学士学位,主要从事可见与红外光学系统的像质评价的研究。E-mail: cray-rayn@sohu.com

导师简介:



马冬梅(1963—),女,吉林人,研究员,博士生导师,1986于天津大学获得学士学位,1993年、2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学检测、光电成像系统的性能测评等方面的研究。E-mail: dongmei_ma2002@yahoo.com.cn

●下期预告

修正双晶技术诊断激光等离子体 X 射线极化度

王洪建^{1,2}, 肖沙里², 施 军²

(1. 重庆工商大学 重庆市发展信息管理工程技术研究中心, 重庆 400067;

2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

为了诊断波长为 0.2~20 nm 的激光等离子体 X 射线的极化度,推断该等离子体内部的各向异性状态,研制了结构新颖的激光等离子体极化光谱仪。该谱仪在电子束垂直入射面内正交布置色散元件均为 PET 晶体,两通道均用成像板接收光谱信号,其有效面积为 30 mm×80 mm,从光源经晶体到成像板的光程分别为 980 mm 和 310 mm。在中国工程物理研究院激光聚变研究中心 20 J 激光器上进行固体靶实验,获得 Al 离子类氢谱线,经过对类氢共振线和互组合线校正,推算出两谱线的极化度分别为 0.123 3 和 0.148 1。结果表明激光等离子体内部存在弱各向异性,该谱仪能够满足激光等离子体极化光谱诊断要求。