

基于马赫-曾德尔点衍射干涉仪的激光模式复振幅测量

董哲良 冯国英 胡丽荔 张澍霖

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 利用马赫-曾德尔点衍射干涉仪,通过一幅干涉图,直接恢复激光模式的强度和相位信息,重建模式复振幅。在理论上分析了利用快速傅里叶变换的点衍射干涉法重建激光复振幅分布的原理;推导了激光模式在自由空间中传输时强度和相位的分布情况。将模拟的分布与实验结果做了比较,结果表明,点衍射干涉法可以恢复激光模式的强度和相位信息。

关键词 测量;激光模式;马赫-曾德尔点衍射干涉仪;复振幅

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0708008

Measure the Complex Amplitude of Laser Mode by Mach-Zehnder Point Diffraction Interferometer

Dong Zheliang Feng Guoying Hu Lili Zhang Shulin

Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Mach-Zehnder point diffraction interferometer is used to reconstruct the complex amplitude by obtaining the information of phase and intensity of laser mode from a interferogram. A method to reconstruct the complex amplitude by using point-diffraction interferometry based on fast Fourier transform is analyzed theoretically. The phase and intensity distributions are deduced when laser mode propagates in the free space. The simulation of phase and intensity distributions with the experimental results are compared. The results show that complex amplitude can be restored by point-diffraction interferometry.

Key words measurement; laser mode; Mach-Zehnder point diffraction interferometer; complex amplitude

OCIS codes 120.5050; 260.3160; 010.7350; 140.3460

1 引 言

实现对激光光束强度和相位快速、高精度的测量,在激光光束质量检测、光学测量、激光传输与控制等领域有重要意义。目前,常用的测试方法有曲率波前检测法^[1-2]、四棱锥波前检测法^[3]、夏克-哈特曼波前检测法^[4-5]、剪切干涉法^[6-9]和自参考干涉波前检测法^[10-14]等。由于自参考干涉波前检测系统的参考光由针孔衍射产生,不需要专门设置参考光束,并且测量速度快、精度高,它成为测量激光波前相位的重要方法之一,而马赫-曾德尔型自参考干涉波传感器是常用的自参考干涉波传感器。

1991年,Feldmand等^[10]最早搭建了马赫-曾德尔自参考波前传感系统,用于高能激光器内腔畸变波前的诊断;2002年,Rhoadarmer^[11]对马赫-曾德尔自参考波前传感系统恢复激光复振幅的噪声建立了噪声理论模型;2007和2008年,Paterson等^[15-16]搭建了基于马赫-曾德尔相移干涉的波前传感器和点衍射干涉系统,用于测量湍流中畸变激光的相位和振幅。中国科学院光电技术研究所搭建了基于马赫-曾德尔自参考干涉波前传感系统,并对其基本原理和衍射针孔对测量结果影响进行了详细的仿真^[17-18];四川大学对传统马赫-曾德尔

收稿日期:2015-01-20;收到修改稿日期:2015-03-18

基金项目:国家自然科学基金(60890200)

作者简介:董哲良(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光与光通信方面的研究。E-mail: 756191671@qq.com

导师简介:冯国英(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事新型激光技术方面的研究。

E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn(通信联系人)

点衍射干涉仪进行了改进,比较精确地恢复了激光光束的复振幅,并用于实时测量光束质量^[19-20]。

在此之前,利用自参考干涉波前传感系统对激光光束复振幅进行检测的被测激光基本上是以基模为主要成分的高斯光束,目前还没有对以高阶模式为主要成分的激光光束进行过检测。本文在理论上分析了利用马赫-曾德尔点衍射干涉仪和快速傅里叶变换对激光器高阶模式复振幅进行恢复的原理;同时模拟了高阶模式在自由空间中传输时相位和强度的分布情况;搭建了马赫-曾德尔点衍射干涉仪,并将光源产生的TEM₁₀、TEM₂₀、TEM₃₀模式作为待测光束输入点衍射干涉系统进行实验。

2 马赫-曾德尔点衍射干涉仪重建激光器模式复振幅理论分析

光源为可产生不同TEM模式氦氖激光器,与一般氦氖激光器不同的是,TEM模式氦氖激光器谐振腔的后反射镜是可调节的,其结构如图1所示,它由一个两面镀有632.8 nm增透膜的凸透镜和镀有全反膜的凹面镜构成,且满足凸透镜焦距 f 和凹面镜曲率半径 R 相等,凹面镜可以在一定范围内前后移动,这样相当于改变了后反射镜的曲率半径和整个谐振腔的腔长,腔内的损耗由此会发生变化,因此可以输出不同的TEM模式^[21]。

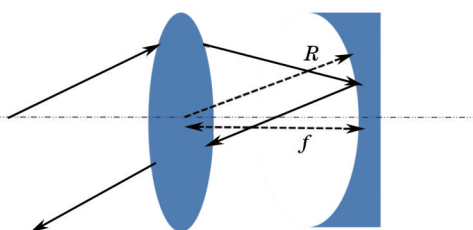


图1 TEM模式氦氖激光器谐振腔后反射镜

Fig.1 TEM mode He-Ne laser resonator reflector

实验中所用的马赫-曾德尔点衍射干涉仪基本光路如图2所示,两条光路上分别为放大倍率一致且互为倒置的望远镜系统。调整TEM模式氦氖激光器的后反射镜,产生需要测试的模式类型。输出的待测模式进入马赫-曾德尔点衍射干涉系统经分光镜BS₁后分为两束,其中一束经过由焦距分别为 $f_3 = 300$ cm, $f_4 = 100$ cm的透镜L₃和透镜L₄组成的放大倍率为 $s_1 = f_3/f_4$ 的倒置望远镜系统,形成包含待测激光全部信息的缩小光束,称为信号光;另一光束则依次经过焦距为 $f_1 = 100$ cm的透镜L₁、衍射针孔和焦距为 $f_2 = 300$ cm透镜L₂组成的放大倍率为 $s_2 = f_2/f_1$ 的正向望远镜系统,形成扩束的参考光束。定义 $S = s_1 \times s_2 > 1$ 为干涉仪的放大倍数,当S足够大的时,经针孔滤波的扩束光束可形成近似于一个平面的理想参考光。信号光和参考光在分光镜BS₂处会合并发生干涉,在成像面P处形成干涉图,由CCD记录。

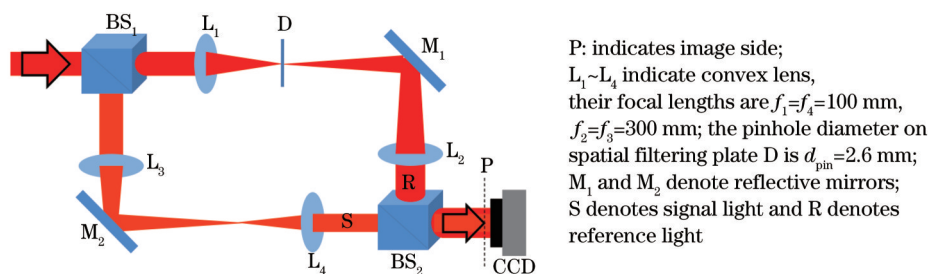


图2 马赫-曾德尔点衍射干涉仪

Fig.2 Mach-Zehnder point diffraction interferometer

令 $E_T = A_T(x,y)\exp[i\phi(x,y)]$ 为经过逆向望远镜系统的信号光的复振幅, $E_R = A_R(x/S,y/S)\exp[i\phi(x/S,y/S)]$ 为经过衍射针孔和正向放大系统的参考光复振幅。两束光在CCD上的干涉图的表达式可以写为

$$I = A_T(x,y)^2 + A_R(x/S,y/S)^2 + 2A_T(x,y)A_R(x/S,y/S)\cos[2\pi(\omega_0x + \nu_0y) + \Phi(x,y)], \quad (1)$$

式中 $\Phi(x,y) = \phi(x,y) - \phi(x/S,y/S)$, 表示两光束的相位差。当针孔足够小时,参考光可以近似为理想平面波,所以 $\phi(x/S,y/S)$ 为0或常数,则可以得到 $\Phi(x,y) = \phi(x,y)$ 。 ω_0 和 ν_0 分别是干涉条纹在 x 和 y 方向上的空间载频。

为了便于分析,将(1)式表示为更一般的形式:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos[2\pi(\omega_0x + \nu_0y) + \Phi(x,y)], \quad (2)$$

式中 $a(x,y)=A_T(x,y)^2+A_R(x/S,y/S)^2$ 和 $b(x,y)=2A_T(x,y)A_R(x/S,y/S)$ 分别表示干涉条纹的背景光强和调制度函数。根据欧拉公式的等价关系,(2)式可以改写为

$$I(x,y)=a(x,y)+c(x,y)\exp[i2\pi(\omega_0x+v_0y)]+c^*(x,y)\exp[-i2\pi(\omega_0x+v_0y)], \quad (3)$$

式中 $c(x,y)$ 与 $c^*(x,y)$ 共轭,并且有

$$c(x,y)=\frac{1}{2}b(x,y)\exp[i\Phi(x,y)], \quad (4)$$

对(3)式进行傅里叶变换得到

$$I(w,v)=A(w,v)+C(w-w_0,v-v_0)+C^*(w+w_0,v+v_0), \quad (5)$$

式中 $A(w,v)$ 、 $C(w-w_0,v-v_0)$ 、 $C^*(w+w_0,v+v_0)$ 分别为(3)式中对应各项的傅里叶变换。分别滤出一级频谱分量 $C(w-w_0,v-v_0)$ 和零级频谱分量 $A(w,v)$,将一级频谱分量 $C(w-w_0,v-v_0)$ 移频至零频位置后得到 $C(w,v)$,做逆傅里叶变换后得到调制度函数为

$$c(x,y)=\mathcal{F}^{-1}[C(w,v)], \quad (6)$$

结合(4)式可以得到干涉条纹调制度函数 $b(x,y)$ 和待测相位 $\phi(x,y)$ 为

$$b(x,y)=2\text{abs}[c(x,y)], \quad (7)$$

$$\phi(x,y)=\Phi(x,y)=\text{unwrap}\left\{\arctan\left\{\frac{\text{Im}[c(x,y)]}{\text{Re}[c(x,y)]}\right\}\right\}, \quad (8)$$

式中 $\text{abs}()$ 和 $\text{unwrap}()$ 分别表示取复指数系数和相位展开操作。

同样对零级频谱分量 $A(w,v)$ 进行逆傅里叶变换可以得到干涉条纹光强分布 $a(x,y)$ 。利用 $a(x,y)=A_T(x,y)^2+A_R(x/S,y/S)^2$ 和 $b(x,y)=2A_T(x,y)A_R(x/S,y/S)$ 可得

$$g_1(x,y)=a(x,y)+b(x,y), \quad (9)$$

$$g_2(x,y)=a(x,y)-b(x,y), \quad (10)$$

于是可得

$$A_T(x,y)=\frac{\sqrt{g_1(x,y)}+\sqrt{g_2(x,y)}}{2}. \quad (11)$$

得到待测 TEM 模式相位 $\phi(x,y)$ 和振幅 $A_T(x,y)$ 信息后,即可求得待测模式的复振幅分布为

$$E_T(x,y)=A_T(x,y)\exp[i\phi(x,y)]. \quad (12)$$

3 TEM 模式在自由空间中的传输模拟

为了了解 TEM_{mn} 模式在自由空间中传输时相位和强度的分布情况,为实验结果提供参考,这里模拟了 TEM_{mn} 模式在自由空间中的传输。

当光在自由空间中传输时,遵从亥姆堆兹方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n_0^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad (13)$$

在旁轴近似情况下,(13)式的解可以写为惠更斯-菲涅耳积分公式:

$$\mathbf{E}_2(x_2,y_2)=\frac{\exp(i\mathbf{k}z)}{i\lambda z} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_1(x_1,y_1)\exp\left\{\frac{i\mathbf{k}}{2z}[(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, \quad (14)$$

式中 $\mathbf{E}_1(x_1,y_1)$ 为光初始位置的场分布, $\mathbf{E}_2(x_2,y_2)$ 为光束传播一段距离后的场分布, z 为传输距离, \mathbf{k} 为波矢, λ 为波长。直接计算(14)式,计算量大、耗时长,为了提高运算速度,一般采用基于快速傅里叶变换的算法。

将(14)式写成函数的卷积形式为

$$\mathbf{E}_z(x,y)=h_z(x,y)\otimes \mathbf{E}_1(x,y), \quad (15)$$

$$h_z(x,y)=\frac{\exp(i\mathbf{k}z)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{i\mathbf{k}}{2z}(x^2+y^2)\right], \quad (16)$$

式中 \otimes 表示卷积。对(16)式作傅里叶变换得到

$$H(f_x, f_y) = \exp(i2\pi z/\lambda) \exp[-i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)], \quad (17)$$

对(15)式作傅里叶变换并将(17)式代入,再逆傅里叶变换后可得

$$E_z(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(f_x, f_y)F[E_1(x, y)]\}, \quad (18)$$

式中 $f_x = \frac{x}{\lambda z}$, $f_y = \frac{y}{\lambda z}$ 。

在模拟 TEM_{mn} 模式传输时,将模式表达式 $E_{mn}(x, y)$ 替换(18)式中的 $E_1(x, y)$, $E_{mn}(x, y)$ 具体表达式为

$$E_{mn}(x, y) = H_m\left(\sqrt{\frac{2\pi}{L\lambda}}x\right)H_n\left(\sqrt{\frac{2\pi}{L\lambda}}y\right) \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{L\lambda/\pi}\right), \quad (19)$$

式中 λ 为波长, L 为激光器腔长, H_m 和 H_n 为第 m 和第 n 阶厄米多项式。模拟了 TEM₁₀, TEM₂₀, TEM₃₀ 模式在束腰前后一定范围内传输时,相位和强度的分布。为了简单明了地表现模式强度和相位分布随传播距离的变化情况,仅取三维图中沿 X 方向的包络线,如图 3 所示。

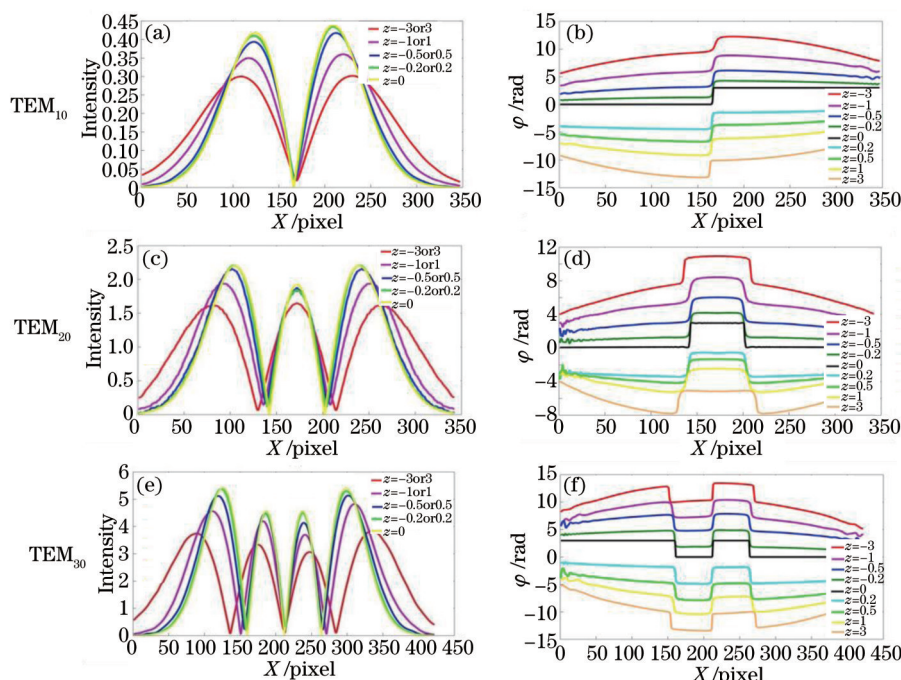


图 3 TEM₁₀、TEM₂₀、TEM₃₀ 模式传输过程中相位和强度的变化情况。分别在模式束腰前 -3、-1、-0.5、-0.2 m、束腰处以及束腰后 3、1、0.5、0.2 m 9 处记录了模式相位和强度的值

Fig.3 Phase and intensity distributions of TEM₁₀、TEM₂₀ and TEM₃₀ at the process of propagation. Record the values of phase and intensity at the distance of -3、-1、-0.5、-0.2、0、0.2、0.5、1、3 m from the beam waist

由图 3(a)、3(c)、3(e)可以看出,在一定传播范围内,传播距离越远,光束直径越大,强度峰峰值越小;而由图 3(b)、3(d)、3(f)可以看出在一定传播距离内相位的峰谷值随着传播距离的增加而增大,相位还存在一个很明显的特征:在同一模式中,一个光斑过渡到另一个光斑时,相位会发生跳变^[22]。

4 实验结果

为了验证方法的可行性,调节 TEM 模式氦氖激光器后反射镜的凸透镜和凹面镜之间的距离,改变激光器腔长和曲率半径,产生 TEM₁₀, TEM₂₀, TEM₃₀ 模式。分别将各个模式作为待测光束输入马赫-曾德尔点衍射干涉仪,由 CCD 记录像平面上的干涉图像,通过计算机处理干涉图,可以得到 TEM₁₀, TEM₂₀, TEM₃₀ 模式的相位和强度分布,分别如图 4~图 6 所示。

由图 4(c)、图 5(c)和图 6(c)可以看出,在一个光斑到另一个光斑的过渡区域,相位不是平缓地变化,从图 4(d)、图 5(d)和图 6(d)的包络线可以清楚地看到相位在这些地方发生了跳变,与之前 TEM₁₀, TEM₂₀, TEM₃₀ 模式传输模拟得到的相位分布吻合。

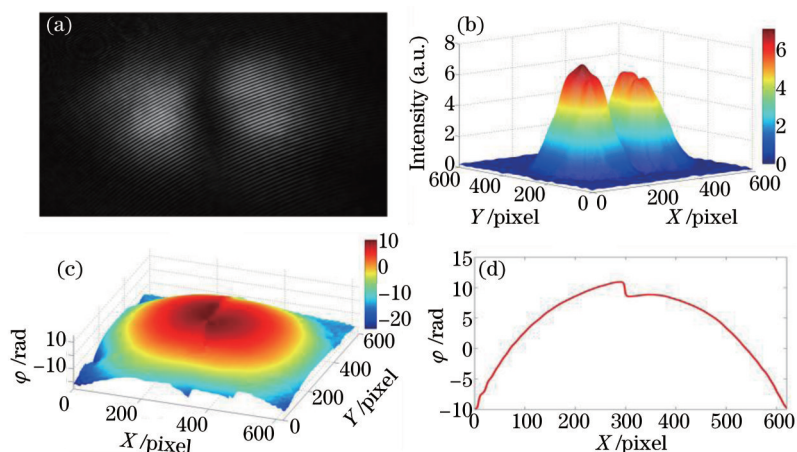


图4 TEM₁₀模式相位、强度分布。(a) TEM₁₀模式干涉图;(b) TEM₁₀模式强度分布;(c) TEM₁₀模式相位分布;(d) TEM₁₀模式相位沿X方向的包络线

Fig.4 Phase and intensity distributions of TEM₁₀. (a) Interferogram of TEM₁₀; (b) intensity distribution of TEM₁₀; (c) phase distribution of TEM₁₀; (d) envelope of phase distribution in X direction

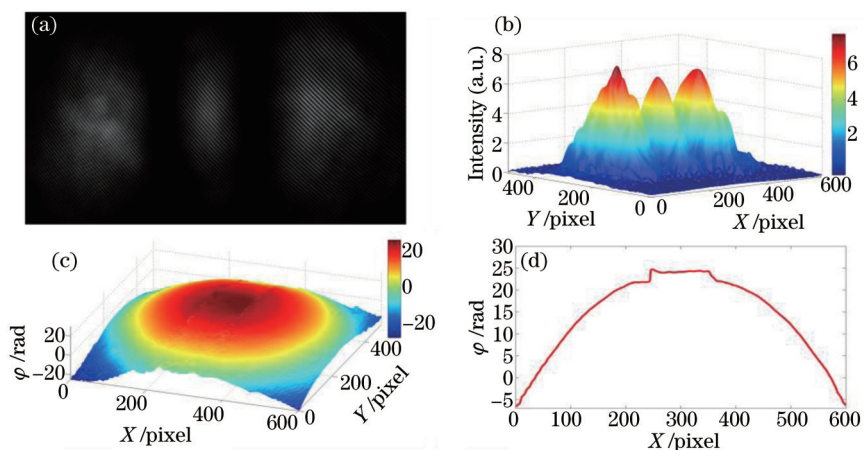


图5 TEM₂₀模式相位、强度分布。(a) TEM₂₀模式干涉图;(b) TEM₂₀模式强度分布;(c) TEM₂₀模式相位分布;(d) TEM₂₀模式相位沿X方向的包络线

Fig.5 Phase and intensity distributions of TEM₂₀. (a) Interferogram of TEM₂₀; (b) intensity distribution of TEM₂₀; (c) phase distribution of TEM₂₀; (d) envelope of phase distribution in X direction

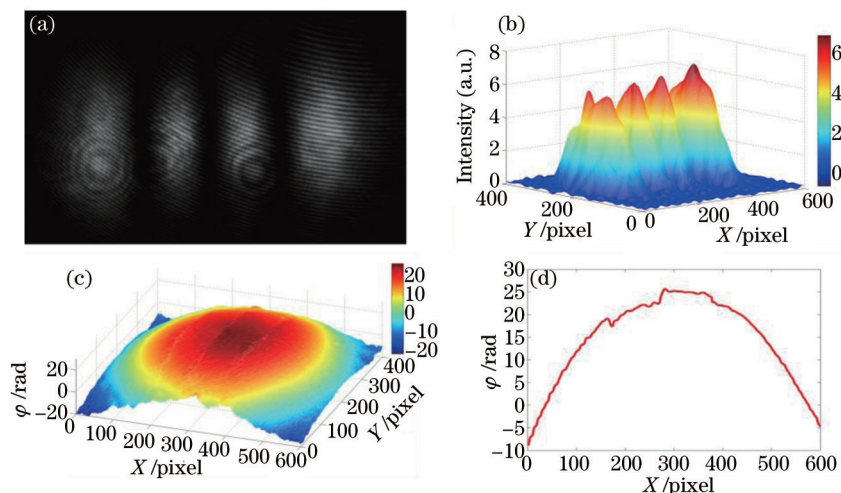


图6 TEM₃₀模式相位、强度分布。(a) TEM₃₀模式干涉图;(b) TEM₃₀模式强度分布;(c) TEM₃₀模式相位分布;(d) TEM₃₀模式相位沿X方向的包络线

Fig.6 Phase and intensity distributions of TEM₃₀. (a) Interferogram of TEM₃₀; (b) intensity distribution of TEM₃₀; (c) phase distribution of TEM₃₀; (d) envelope of phase distribution in X direction

5 结 论

采用马赫-曾德尔点衍射干涉仪和快速傅里叶变换对激光器高阶模式 TEM_{10} , TEM_{20} , TEM_{30} 的强度和相位进行了测量。恢复出了高阶模式光斑之间过渡地带相位的跳变,与理论情况相符。结果表明,采用基于快速傅里叶变换的点衍射干涉法可以恢复高阶模式或主要成分为高阶模式的激光器光束的复振幅。

参 考 文 献

- 1 Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. *Appl Opt*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- 2 Jiang Zongfu, Xi Fengjie, Xu Xiaojun, *et al.*. Theory and applications of defocus grating wavefront curvature sensing[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 205-210.
姜宗福, 刁锋杰, 许晓军, 等. 光栅型波前曲率传感器原理和应用[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 205-210.
- 3 LeDue J M. A Study of the Pyramid Sensor: Analytic Theory, Simulation and Experiment[D]. Victoria: University of Victoria, 2005.
- 4 Lane R, Tallon M. Wave-front reconstruction using a Shack-Hartmann sensor[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(32): 6902-6908.
- 5 Murphy K, Burke D, Devaney N, *et al.*. Experimental detection of optical vortices with a Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Opt Express*, 2010, 18(15): 15448-15460.
- 6 Wyant J C. Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems[J]. *Appl Opt*, 1975, 14(11): 2622-2626.
- 7 Lago E L, Fuente R d l. Amplitude and phase reconstruction by radial shearing interferometry[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(3): 372-376.
- 8 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei, *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(6): 503-508.
李大海, 陈怀新, 陈祯培, 等. 径向剪切干涉波前重建算法和不同倍数下重建精度的研究[J]. *中国激光*, 2002, 29(6): 503-508.
- 9 Liu Lei, Zeng Aijun, Zhu Linglin, *et al.*. Lateral shearing interferometer for the wavefront test of small beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0108003.
刘 蕾, 曾爱军, 朱玲玲, 等. 可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108003.
- 10 Feldman M, Mockler D J, English R E, *et al.*. Self-referencing Mach-Zehnder interferometer as a laser system diagnostic[C]. *SPIE*, 1991, 1542: 490-501.
- 11 Rhoadarmer T A. Development of a self-referencing interferometer wavefront sensor[C]. *SPIE*, 2004, 5553: 112-126.
- 12 Zheng Meng, Li Yanqiu, Liu Ke. Design of mask for phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 031201.
郑 猛, 李艳秋, 刘 克. 相移点衍射干涉仪用衍射板结构设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 031201.
- 13 Liu Jian, Tian Ailing, Liu Bingcai, *et al.*. A phase extraction algorithm in wavelength tuning interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0312001.
刘 剑, 田爱玲, 刘丙才, 等. 一种变频相移干涉测量的相位提取算法[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0312001.
- 14 Yang Pengqian, Stefan Hippler, Casey Deen, *et al.*. Smart and quantitative near-infrared point-diffraction interferometer based on the self-referencing wavefront sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0508001.
杨朋千, Stefan Hippler, Casey Deen, 等. 基于自参考的高精度红外点衍射干涉仪研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0508001.
- 15 Paterson C, Notaras J. Demonstration of closed-loop adaptive optics with a point-diffraction interferometer in strong scintillation with optical vortices[J]. *Opt Express*, 2007, 15(21): 13745-13756.
- 16 Notaras J, Paterson C. Point-diffraction interferometer for atmospheric adaptive optics in strong scintillation[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(3): 360-367.
- 17 Bai F, Rao C. Experimental validation of closed-loop adaptive optics based on a self-referencing interferometer wavefront sensor and a liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(14): 2782-2786.
- 18 Bai Fuzhong, Rao Changhui. Effect of pinhole diameter on measurement accuracy of self-referencing interferometer wavefront sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 4056-4064.
白福忠, 饶长辉. 针孔直径对自参考干涉波前传感器测量精度的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(6): 4056-4064.
- 19 Du Y, Feng G, Li H, *et al.*. Circular common-path point diffraction interferometer[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 3927-3929.
- 20 Du Y, Feng G, Li H, *et al.*. Real-time determination of beam propagation factor by Mach-Zehnder point diffraction interferometer[J]. *Opt Commun*, 2013, 287(1): 1-5.

21 Guo Dongdong, Wu Fengtie, Chen Yunbing, *et al.*. Bessel-Gauss resonator based on an axicon with a plane output mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 26-30.

郭东栋, 吴逢铁, 陈云彬, 等. 基于轴棱锥带平面耦合输出镜的贝塞尔-高斯谐振腔[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 26-30.

22 Chen Yuqing, Wang Jinghuan. Principles of Laser[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 115-117.

陈钰清, 王静环. 激光理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992: 115-117.

栏目编辑: 何卓铭