

文章编号: 0253-2239(2007)01-0001-4

二次光栅在波前测量中的应用

周素梅^{1,2} 周常河¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用一种特殊的二次光栅用于激光波前测量,它对非零级衍射光束具有不同的聚焦效应,其光栅线为圆弧型而非直线。导出了在会聚光束情况下的两平面成像在单一像平面上的距离关系,实验上实现了二次光栅用于会聚光束的波前测量,测量得到会聚光束具有较大的散焦(-2.93λ)和球差(1.34λ),与该透镜引起波前的离焦像差理论理想值(-2.695λ)基本符合。该技术可以实现波前的高空间分辨率和高精度实时测量,大大减少光学元件数量,降低装置成本。由于大功率激光束的不稳定性,其波前变化非常快,所以该方法的实时性非常适合于这种波前变化的测量。

关键词: 衍射与光栅;二次光栅;波前测量;泽尼克系数

中图分类号: TB96 文献标识码: A

Wavefront Measurement by Using Quadratic Grating

Zhou Sumei^{1,2} Zhou Changhe¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: A laser wavefront measurement technique by using a special quadratic grating is reported. The quadratic grating has a different focusing power in nonzero orders, for the grating lines are not line but arcs of circles, and multiple planes can be imaged onto a single image plane. The spacing relation between two planes imaged on a single plane was deduced for a convergent beam. The experiments of measuring convergent beam wavefront with a quadratic grating are carried out. It is found that the defocusing aberration is as large as -2.93λ and the spherical aberration is equal to 1.34λ , which are in good agreement with theoretical ones (the defocusing aberration is -2.695λ , λ supposed to be wavelength). This technology can realize real-time wavefront measurement with high spatial resolution, high phase accuracy, low cost and simple structure. Because wavefront of high-energy laser beam usually changes rapidly, this real-time technology is a useful measurement method on this application.

Key words: diffraction and gratings; quadratic grating; wavefront measurement; Zernike coefficient

1 引 言

波前传感器是自适应光学补偿系统和激光光束质量检测系统中的重要仪器,利用它可以实现波前的测量,在天文望远镜、激光发射、激光通信、医学应用等方面有着极为重要的应用。目前,成熟的波前传感技术种类很多,包括径向剪切干涉法,点衍射干涉仪;刀口法,横向剪切干涉法,哈特曼传感技术(夏克-哈特曼传感器,扫描哈特曼传感器);以及基于强度的波前传感技术,代表为曲率传感器^[1]。其中最

常用的夏克-哈特曼传感器测量精度高,但空间分辨力低;相移干涉法中,直接从干涉图中提取物光束的相位信息,测量精度高,但装置庞大。因此迫切需要发展一种装置简单、成本较低的、测量精度以及空间分辨力高的波前传感技术。

衍射光学元件是一种低成本的光学元件,制作方法简单。在波前测量中有重要的应用价值^[1~4]。利用强度传输方程复原波前的算法非常简单^[5],由于在复原过程中需要获得两个平面上光强的分布情

作者简介: 周素梅(1976—),女,重庆江津人,博士研究生,主要从事衍射元件的超分辨效应以及衍射元件在波前测量中的研究。E-mail: sumeizhou@163.com

导师简介: 周常河(1966—),男,河南嵩县人,研究员,博士生导师,主要从事微结构光学与飞秒信息处理技术。E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-31; 收到修改稿日期: 2006-05-17

况的变化,即光束的梯度变化,又因为光束一般在短距离上的变化很小,不易测量,而在长距离上测量光束质量又不现实;而且如果分别在两个平面上测量光强分布,又难以实现即时测量,使得波前测量结果与实际波前不一致,所以该方法的应用受到限制。现在利用二次光栅可以使多平面一次成像在单一像平面上,也即利用二次光栅可实现波前的实时测量。而且该方法中,大大减少光学元件,降低测量装置成本。P. M. Blanchard 等^[4,6]对二次光栅在准直光的情况进行讨论,而本文对特殊的会聚光束的情况进行了详细分析,并完成对会聚光束的波前测量。

2 二次光栅的设计

二次光栅的光栅线条满足方程^[4]

$$\frac{x}{d_0} + \frac{W_{20}(x^2 + y^2)}{\lambda R^2} = n, \quad (1)$$

其中 x, y 表示为原点的光栅线的笛卡儿坐标, d_0 为孔径中心的光栅周期, W_{20} 为光栅的散焦度, λ 为光波波长, R 为光栅孔径的半径, n 的整数值定义为光栅线的轨迹 ($n = 0$ 时光栅线经过掩膜中心)。整理(1)式有

$$\left(x + \frac{\lambda R^2}{2d_0 W_{20}}\right)^2 + y^2 = \frac{n\lambda R^2}{W_{20}} + \left(\frac{\lambda R^2}{2d_0 W_{20}}\right)^2. \quad (2)$$

由(2)式可知,光栅线条是由以一固定点为圆心,以半径不同的圆弧构成。其中固定点圆心的坐标为 $[-\lambda R^2/(2d_0 W_{20}), 0]$, 半径表示为

$$C_n = \left\{n\lambda R^2/W_{20} + [\lambda R^2/(2d_0 W_{20})]^2\right\}^{1/2}.$$

我们选取光栅参量:半径为 $R = 3 \text{ mm}$, $W_{20} = 15\lambda$, $d_0 = 0.085 \text{ mm}$, 光栅的结构图如图 1 所示。

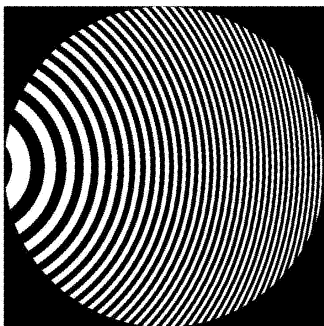


图 1 二次光栅的结构图

Fig. 1 Illustration of a quadratic grating

3 将多个像成像在一个平面的原理

光栅在各衍射级中的焦距效应表示为^[4]

$$f_m = R^2/(2mW_{20}), \quad (3)$$

其中 m 为光栅的衍射级次, f_m 为对应级次的焦距效

应。从(3)式可知,对不同衍射级次的光,其焦距不同,因此该二次光栅对衍射光束的非零级具有不同的聚焦效应,因此可以假设, +1 级、0 级和 -1 级三个衍射光斑正好是三个平面所成的像,这样利用二次光栅,就可以将不同平面的目标成像在同一平面上。这个假设将在距离关系的推导中得到证实。利用这种功能,可以实现实时的波前测量,光路如图 2 所示, z 为平面成像时的物距。

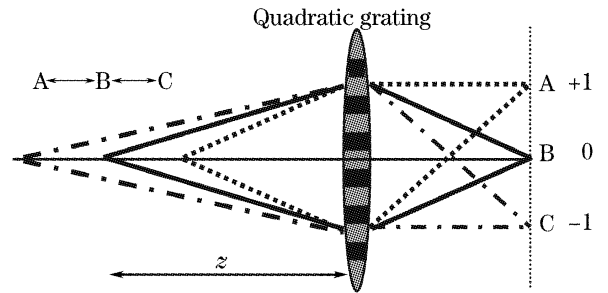


图 2 三平面成像的光路图

Fig. 2 Schematic for three object planes imaging

对会聚光束,如果会聚系数足够大,就可以不用外加透镜,也可采用图 3 所示的实验结构图。我们将证明光栅三个衍射级光斑成像在一个平面上时的间距关系。对 +1 级光斑,满足物像关系

$$1/z + 1/z_1 = 1/f_{+1}, \quad (4)$$

其中 z_1 为第一平面成像时的物距。由(4)式可得

$$z_1 = R^2 z / (2W_{20} z - R^2). \quad (5)$$

同理对 -1 级光斑,可以得到

$$z_2 = -R^2 z / (2W_{20} z + R^2). \quad (6)$$

因而两平面的间距可表示为

$$\Delta z = 4W_{20} R^2 z^2 / (4W_{20}^2 z^2 - R^4). \quad (7)$$

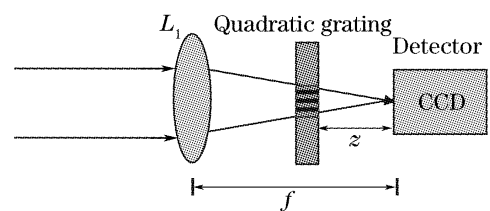


图 3 利用二次光栅对会聚波前进行测量的结构示意图

Fig. 3 Schematic of wavefront measurement by quadratic grating for convergent beam

4 光束的波前重构理论

利用强度传输方程^[5]

$$-k \frac{\partial I(\mathbf{r})}{\partial z} = I(\mathbf{r}) \nabla^2 \varphi(\mathbf{r}) + \nabla \cdot I(\mathbf{r}) \cdot \nabla \varphi(\mathbf{r}), \quad (8)$$

其中 $I(\mathbf{r})$ 为波前的光强分布, $\varphi(\mathbf{r})$ 为波前的相位分布。如果已知波前的光强 $I(\mathbf{r})$ 的三维分布,就可以

求出波前的三维相位分布。实际上只要求获得波前的二维相位分布,且只要已知轴上两个截面的光强分布,就能解出某一平面上的相位分布。

(8) 式的解为

$$\varphi_0(\mathbf{r}) = \iint_R d\mathbf{r}' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \left[\frac{-2\pi}{\lambda I_0} \frac{\partial I_0(\mathbf{r}')}{\partial z} \right] + \int_P ds' \varphi_0(\mathbf{r}') \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'), \quad (9)$$

其中 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为第一类边界下的格林函数, a 为圆域 R 的半径。令 $S(\mathbf{r}') = -\frac{k}{I_0} \frac{\partial}{\partial z} I_z(\mathbf{r}')$, (9) 式中第二项为一常数,可以忽略,由此仅引入一个很小的常数误差,也即为引入一个平移误差,不会影响需要的结果,则(9)式可改写为

$$\varphi_0(\mathbf{r}) = \iint_R d\mathbf{r}' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') S(\mathbf{r}'). \quad (10)$$

由(10)式,即可重构出光波的相位分布。由于波差函数可表示为 $W(r) = \varphi(r)/k$, 如果波差函数展开为泽尼克多项式表示,则泽尼克系数可表示为

$$a_i = \frac{1}{k} \iint S(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') u_i(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}' d^2 \mathbf{r}$$

又 $S(\mathbf{r}') \approx \frac{k}{I_0} \sum_{n,m} S_{n,m} q(\mathbf{r}' - \boldsymbol{\rho}_{n,m})$, 所以

$$a_i = \iint \left[\sum_{n,m} S_{n,m} q(\mathbf{r}' - \boldsymbol{\rho}_{n,m}) \right] G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') u_i(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}' d^2 \mathbf{r},$$

假设 $G(\mathbf{r}') = G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') u_i(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}$, 改变积分与求和的顺序,令

$$G_{i,n,m} = \int q(\mathbf{r}' - \boldsymbol{\rho}_{n,m}) G_i(\mathbf{r}') d^2 \mathbf{r}', \quad (11)$$

$$\text{得} \quad a_i = \sum_{n,m} S_{n,m} G_{i,n,m}, \quad (12)$$

根据(12)式,只要求出格林函数矩阵,即可迅速获得表示波前的泽尼克系数。

5 实验结果

实验装置示意图如图 3 所示,利用 CCD 在透镜的焦点处拍摄得光斑图样。实验中,我们采用的是振幅型二次光栅,其光栅参量分别是:半径为 $r=3$ mm, $W_{20}=15\lambda$, $d_0=0.085$ mm。用于改变波前的透镜焦距为 $f=150$ mm,光束为 He-Ne 激光束(波长为 632.8 nm),二次光栅离零级焦点的距离 $z=85$ mm,根据(7)式计算得两平面的间距 $\Delta z=31.49$ mm。图 4 为实验中拍摄的光斑图样。

数据分析时,轴向强度梯度分布近似为

$$S(\mathbf{r}') = -\frac{k}{I_0} \frac{\partial}{\partial z} I_z(\mathbf{r}') = -\frac{k}{I_0} \frac{I_-(\mathbf{r}') - I_+(\mathbf{r}')}{\Delta z}, \quad (13)$$

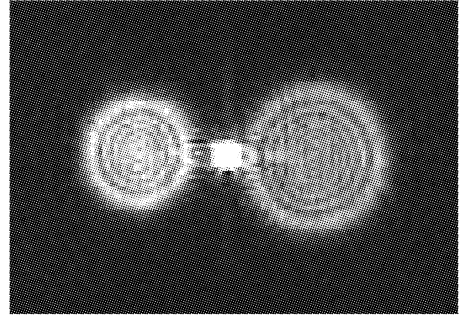


图 4 实验光斑图样

Fig. 4 Experimental light spots captured by CCD

两平面的强度差如图 5 所示。根据上述原理计算得波前的泽尼克系数^[7],如图 6 所示,根据泽尼克系数,可以获取波前各项像差的含义。图 7 和图 8 分别表示波前的形貌和轮廓。实验中,经过透镜后的会聚光束有着较大的散焦 (-2.93λ) 和球差 (1.34λ),由于透镜的制作缺陷原因有较小的像散和彗差,而计算得理想情况下该透镜引起波前的离焦像差为 -2.695λ ,与实验结果 (-2.93λ) 基本符合。

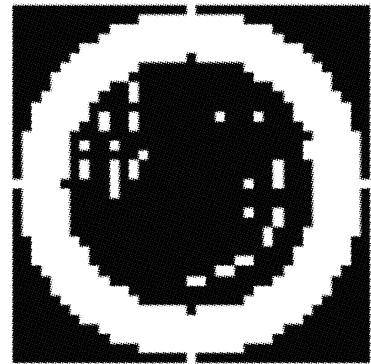


图 5 会聚光束的两光斑之间的差异

Fig. 5 Intensity distribution difference of the two spots of convergent beam

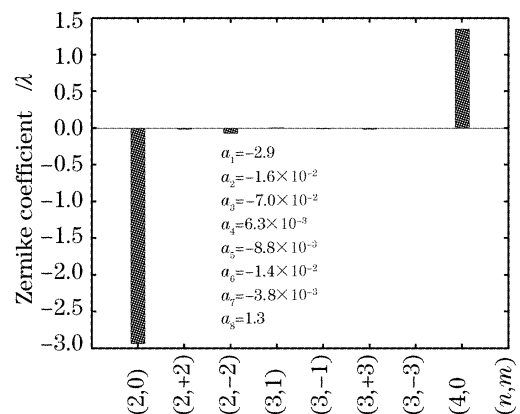


图 6 泽尼克系数表示

Fig. 6 Expression of Zernike coefficient

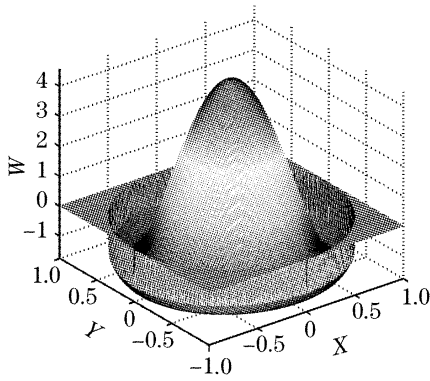


图 7 波前的三维形貌

Fig. 7 Three-dimensional shape of retrieved wavefront

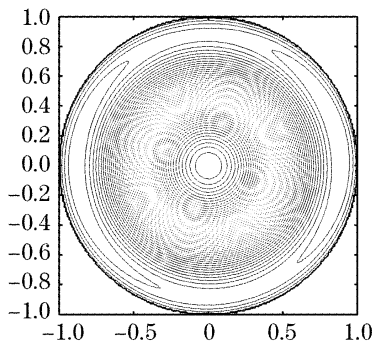


图 8 波前轮廓图

Fig. 8 Contour of retrieved wavefront

6 结 论

报道了一种特殊的二次光栅用于激光波面测量的技术。二次光栅对非零级衍射光束具有不同的聚焦效应,其光栅线为圆弧型而非直线,这样就可以用于光束的波前测量。导出了在会聚光束情况下的两平面成像在单一像平面上的距离关系,对会聚光束

进行波前测量,给出了波前的泽尼克系数表示,测量结果与理论计算值基本相符。在波前重构过程中,格林矩阵的计算会花费不少时间,针对具体的激光束,可以事先计算好对应的格林矩阵,这样在实时测量中的高速重构波前是可以实现的。由于大能量激光束的不稳定性,因此可以将此方法用于大能量激光器光束诊断中,这样大大减少光学元件,降低装置成本,将低能量取样光束导入由二次光栅和匹配透镜以及 CCD 组成的波前传感器中就可以分析光束的质量。

致谢 感谢范滇元院士对本项目的指导。

参 考 文 献

- 1 Geary J. M. *Introduction to Wavefront Sensors* [M]. SPIE Press, 1995
- 2 Mark A. A. Neil, Martin J. Booth, Tony Wilson. New modal wave-front sensor; a theoretical analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(6): 1098~1107
- 3 Hongxin Luo, Changhe Zhou, Hua Zou. Highly sensitive wave-front sensor with a non-zero-order phase plate[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(22): 4654~4658
- 4 P. M. Blanchard, A. H. Greenaway. Simultaneous multiplane imaging with a distorted diffraction grating [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(32): 6692~6699
- 5 Michael Reed Teague. Deterministic phase retrieval: a Green's function solution [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1983, **73** (11): 1434~1441
- 6 P. M. Blanchard, D. J. Fisher, S. C. Woods *et al.*. Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6649~6655
- 7 T. E. Gureyev, A. Roberts, K. A. Nugent. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation: matrix solution with use of Zernike polynomials[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12** (9): 1932~1941