

全息曝光系统轴向调节误差对光栅衍射波像差的影响

韩 建^{1,2,3} 巴音贺希格¹ 李文昊¹ 孔 鹏^{1,3}

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 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042
³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 光栅衍射波像差作为全息光栅重要的技术指标之一, 直接影响光栅分辨率, 其中曝光光学系统的调节误差是引起光栅衍射波像差的主要因素。采用 q 参数讨论了高斯光束在光栅曝光光学系统中的传播和变换, 通过计算高斯光束经准直系统后的相位给出了叠栅条纹相位分布的解析表达式, 由此系统分析了曝光系统调节误差与光栅衍射波像差的关系。理论分析结果表明: 左右曝光光路准直系统的相对离焦对光栅衍射波像差的影响最为显著; 相对离焦量相同时, 光栅衍射波像差随曝光系统焦距的减小而逐渐增大; 理论模拟的条纹分布与实验中获得的叠栅条纹能够很好吻合。

关键词 衍射; 叠栅条纹; 光栅波像差; 相对离焦

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0705002

Wavefront Aberration Analysis of the Interference Image According to Different Axis Alignment Errors in the Grating Exposure System

Han Jian^{1,2,3} Bayanheshig¹ Li Wenhao¹ Kong Peng^{1,3}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract As one of the important technical specifications of holographic gratings, the diffraction wavefront aberration directly influences the grating resolution, which depends on the light path adjustment. The q -parameters of Gaussian beam are used to describe the propagation and the transformation by the collimating system of the exposal system; the spatial phase of the two Gaussian beams and the mathematical expression of Moiré pattern are given; then the relation between the system adjustment error and the wavefront aberration of the resulting interference image is discussed. The conclusion shows that the relative defocus of the left and the right collimating systems is the most critical parameter in exposal system, which influences the wavefront aberration strongly. The wavefront aberration also increases according to the decreased focal length. The results obtained from the initial set of experiments are in good agreement with the theoretical analysis.

Key words diffraction; Moiré pattern; wavefront aberration; relative defocus

OCIS codes 050.1950; 050.5082; 110.2650

收稿日期: 2012-01-09; 收到修改稿日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)和中国科学院知识创新项目(100132H100)资助课题。

作者简介: 韩 建(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事平面全息光栅分波前曝光系统中的基础问题方面的研究。

E-mail: hanjian523@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—), 男, 博士生导师, 主要从事光栅理论、光栅制作技术和光谱技术等方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com

1 引 言

光栅衍射波像差作为衍射光栅重要的技术指标之一^[1],是光栅实际衍射波前与理想状态下衍射波前之间的偏差。全息光栅衍射波前主要取决于干涉光束的波前质量和光栅基底面形,其中干涉光束波前与曝光系统稳定性、曝光光路调节误差及准直系统本身像差有关。

全息光栅制作是通过光栅基底上的光敏物质记录相干光束叠加形成的干涉条纹,经曝光、显影^[2,3]形成特定周期的光栅掩模。理想情况下标准平面波相干涉形成光栅的线性相位分布,但实际平面全息曝光系统中的轴向调节误差如曝光光路的离焦、高斯光束束腰的改变、准直系统与基底距离变化及束腰离轴等因素通过引入曝光光束的相位误差而造成光栅干涉条纹的衍射波像差。为分析光路调整误差、系统使用参数及光栅衍射波像差之间的关系,全息光栅制作者做了多方面的工作。例如,1991年,Anderson等^[4]在电子束曝光系统的光路调整中,提出通过全息方法制作标准栅格,采用信号放大装置及图像处理技术测量叠栅条纹的相位变化;1993~1996年,Ferrera等^[5,6]采用大曲率半径球面波制作平面光栅,通过建立的光线追迹模型算法及四步相移法比较光栅基底不同位置处的相位差分布,进而分析光栅衍射波像差与曝光系统调节误差的关系。近年来,徐福全等^[7]从曝光光束经准直系统传播的几何关系重点分析了离焦对准直光平行度的影响,并给出了离焦调节误差与光栅衍射波像差的计算式;张伟等^[8~12]则从全息光栅成像公式出发,依据光栅衍射波像差与记录光学系统的几何关系,使用光线追迹方法研究曝光光路调节误差对全息光栅衍射波像差的影响,并由此提出了使用叠栅条纹法^[10]调节曝光光路来提高曝光系统的调整精度。以上工作无论是理论上对曝光光学系统调整误差与光栅衍射波像差关系的分析,还是方法上对曝光光学系统调整技术的改进,它们都广泛应用在具体的全息光栅制作过程中,并且为提高光栅制作精度发挥着重要的作用。但是,这些工作采用的是几何光学与光线追迹相结合的分析方法,其不足之处是不能解决高斯光束经扩束系统的传输和变换问题,而全息光栅曝光光束源于高斯光束的扩束和准直。Chen^[13]在扫描干涉场曝光系统中为实时检测波前曾讨论过高斯光束在固定准直系统中的传播,但未分析光栅波像差与准直系统焦距、准直系统使用参数间的相互关系。

本文采用 q 参数讨论高斯光束经曝光光学系统的传播和变换,通过给出的叠栅条纹相位分布的数学解析式,主要系统分析光路轴向调节误差、系统使用参数变化及光栅干涉条纹衍射波像差的关系,为实现传统静态曝光光学系统的设计及光路精确调整提供一定的理论指导,同时对正在设计中的扫描干涉场曝光系统光路准直、波前检测及系统曝光参数选择具有一定的实用价值。

2 曝光光学系统中光栅干涉条纹衍射波像差的计算

2.1 高斯光束通过透镜后的相位计算

平面全息光栅制作是使用光刻胶记录光栅基底上相互干涉形成的干涉条纹,通过曝光显影等工艺制作出所需要的光栅掩模。图1为平面全息光栅干涉示意图。光栅干涉条纹周期与光束干涉角变化关系为^[14]

$$d_0 = \frac{\lambda}{2n_0 \sin \theta}, \quad (1)$$

式中 λ 为激光相干波长, θ 为入射光束与基底法线的夹角, n_0 为曝光空间折射率,在空气中通常取 $n_0 = 1$ 。

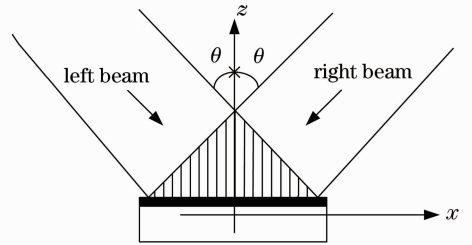


图1 平面全息光栅干涉示意图

Fig. 1 Setup of interference lithography

实际曝光光学系统的相干平面波是高斯光束通过准直系统获得的,依据高斯光束在曝光系统中的传播和变换关系,可获得干涉光束的波前相位分布。在均匀透明介质中,高斯光束沿 z 轴方向传播的光振幅分布可表示为^[15]

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left\{k\left[z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right] - \Phi(z)\right\}\right\}, \quad (2)$$

式中 $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/b)^2}$, ω_0 为高斯光束束腰半径, $\omega(z)$ 为高斯光束截面半径; $b = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$, 称为高斯光束的焦参数; $R(z) = z[1 + (b/z)^2]$, 称为高斯光束波面曲率半径; $\Phi(z) = \arctan \frac{z}{b}$, 称为高斯光束相

位因子。由(2)式知, 高斯光束经准直系统后在距激光束腰距离 z 处的波前相位分布 $\varphi'(z)$ 为

$$\varphi'(z) = -kz + \Phi(z) - k \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}. \quad (3)$$

图2为单光束曝光光路准直系统结构示意图。曝光光束通过光学系统的参数传输过程采用高斯光束复参数 $q(z)$ 表示^[15,16]:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{z + ib} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)}, \quad (4)$$

式中 f 为光栅曝光系统中准直系统焦距, 在距离激

光束腰不同位置处, 结合图2所示, 高斯光束复参数可表示为

$$\begin{cases} q_0 = ib \\ q_1 = q_0 + z_0 \\ \frac{1}{q_2} = \frac{1}{q_1} - \frac{1}{f} \\ q_3 = q_2 + d \end{cases}, \quad (5)$$

由(3)、(5)式可知光栅基底处高斯光束波面曲率半径及相位因子表示为

$$\frac{1}{R(Z)} = \frac{Z(z_0^2 - 2fz_0 + f^2 + b_0^2) - z_0^3 + fz_0^2 - b_0^2z_0 - b_0^2f}{(z_0^2 - z_0Z + fZ)^2 + (b_0z_0 - b_0Z + b_0f)^2}, \quad (6)$$

$$\Phi(Z) = \frac{b_0^2(-f + d) + fz_0^2 + Zz_0^2 - 2fz_0Z + Zf^2 - z_0^3}{b_0f^2}, \quad (7)$$

式中 Z 为基底中心与高斯光束束腰的距离, 即 $Z = z_0 + d$, 将(6)、(7)式代入(3)式, 从而获得高斯光束通过透镜后的相位变化分布。

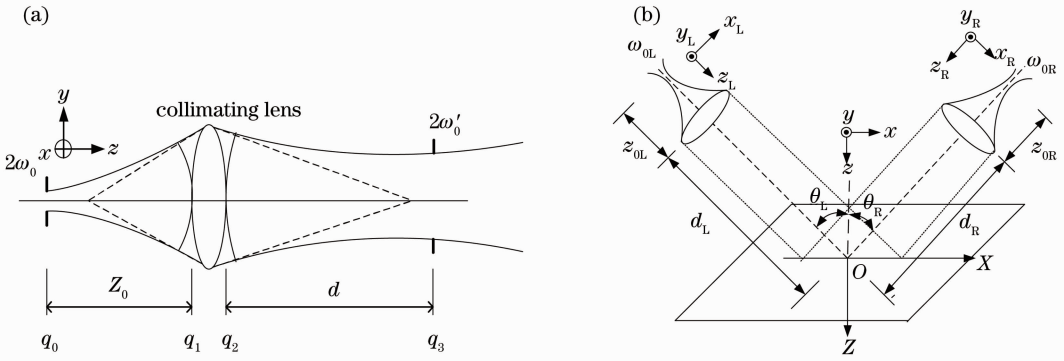


图2 曝光光学系统结构示意图。(a)准直系统结构; (b)曝光系统坐标系

Fig. 2 Setup of interference lithography. (a) Setup geometry for collimating system; (b) coordinate frames for exposure system

2.2 高斯光束在基底处的坐标变换

干涉光束的相位分布是使用左右曝光光路准直系统坐标系 x_L, y_L, z_L 和 x_R, y_R, z_R 表示的, 分析曝光系统调节误差对光栅干涉条纹衍射波像差的影响, 需统一到光栅基底坐标系 xyZ 中, 根据图2(b)建立的基底光栅坐标系, 其准直系统与光栅基底坐标系间的坐标变换为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_L \\ y \\ x \sin \theta_L + z_{0L} + d_L \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_R \\ y \\ -x \sin \theta_R + z_{0R} + d_R \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (8)$$

在基底坐标系中, 左右干涉光束的相位分布 φ'_L, φ'_R 分别表示为

$$\varphi'_L = -kz_L + \Phi(z_L) - k \frac{x_L^2 + y_L^2}{2R_L(z_L)}, \quad (9)$$

$$\varphi'_R = -kz_R + \Phi(z_R) - k \frac{x_R^2 + y_R^2}{2R_R(z_R)}. \quad (10)$$

在光栅制作过程中, 左右曝光光束在基底处的入射角相同, 满足条件: $\theta = \theta_R = \theta_L$, 结合(8)~(10)式, 左右曝光光束相互叠加形成的光栅干涉条纹相位分布 φ' 为

$$\varphi' = k(z_R - z_L) - [\Phi(z_R) - \Phi(z_L)] - \frac{k(x^2 \cos^2 \theta + y^2)}{2} \left[\frac{1}{R_L(z_L)} - \frac{1}{R_R(z_R)} \right]. \quad (11)$$

标准光栅的空间相位分布是以坐标原点为零点进行计算的, 则根据(11)式, 光栅干涉条纹在坐标原点 ($x=0, y=0$) 处的相位常数 φ'_c 表示为

$$\varphi'_c = k(z_R - z_L) - [\Phi(z_R) - \Phi(z_L)] |_{x=y=0}, \quad (12)$$

叠栅条纹表示光栅干涉条纹与标准干涉条纹间的相位差值,结合(8)、(11)、(12)式,则叠栅条纹相位分布 φ 表示为

$$\varphi = \varphi' - \varphi'_c - \frac{2\pi}{d_0}x, \quad (13)$$

式中等号右侧第一项和第二项表示曝光光学系统中左右曝光光束相互叠加形成的以坐标原点为零点的光栅干涉条纹空间相位,第三项表示周期为 d_0 的标准光栅的空间相位,则(13)式所计算的叠栅条纹形状反映了曝光光学系统调节误差对光栅干涉条纹衍射波像差的影响。

3 光栅曝光系统中轴向调节误差与光栅衍射波像差的关系

采用 q 参数获得的两束高斯光束经准直系统干涉形成的叠栅条纹形状,取决于曝光光学系统的调节误差,因此可通过讨论叠栅条纹相位变化分析光路调节误差与光栅衍射波像差的关系。当激光束腰设置在准直系统物方焦平面时,则曝光光束经准直系统变换后得到的光束束腰半径 ω'_0 表示为^[17]

$$\omega'_0 = \frac{f\lambda}{\pi\omega_0}, \quad (14)$$

式中 ω_0 为准直系统前束腰半径。通常光栅曝光光束干涉位置选择在最大束腰处,由(14)式可知,其束腰半径大小取决于准直系统的使用参数 f/ω_0 。

图3为($\omega_0 = 3 \mu\text{m}$, $f = 1200 \text{ mm}$)理想静态曝光光路形成的光栅干涉条纹衍射波像差分布,图中黑色方形区域表示所需要的光栅制作面积。当改变曝光光学系统的使用参数($\omega_0 = 12 \mu\text{m}$, $f = 4800 \text{ mm}$),而其比值 f/ω_0 不变时,系统形成的叠栅条纹与图3相

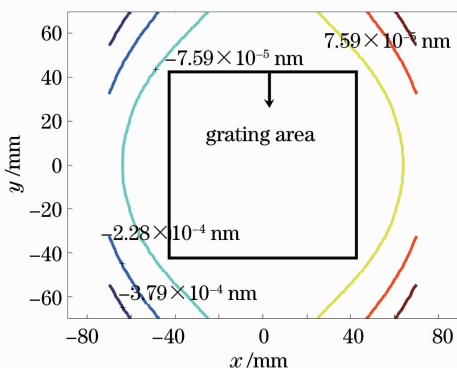


图3 理想曝光光学系统形成的叠栅条纹相位分布(1200 line/mm)

Fig. 3 Moiré phase map for ideal exposure system (1200 line/mm)

同,故在没有系统调节误差时光栅干涉条纹衍射波像差取决于系统的使用参数 f/ω_0 ,相同准直系统参数形成的干涉条纹衍射波像差相同。图中表明,理想曝光光路干涉条纹衍射波像差较小可忽略不计。但存在调节误差条件下叠栅条纹形状则与准直系统焦距选择有关。

3.1 曝光光学系统中离焦量与光栅波像差的关系

理想曝光光学系统中高斯光束束腰位于准直系统焦平面上,但实际曝光光路调整中实现高斯光束束腰与准直系统焦点完全重合是不可能的,即左右曝光光路准直系统的离焦误差总是不可避免的。通过几何光线追迹分析准直系统存在离焦 Δf 而引起的波前弯曲 $\Delta\omega$ 表示为

$$\Delta\omega = \frac{\Delta f(x^2 + y^2)}{f^2}, \quad (15)$$

式中 $x^2 + y^2$ 的大小取决于光栅的制作面积, Δf 表示离焦量,离焦系数为 $\Delta f/f^2$,该数值主要影响光栅波像差的大小。在实际曝光光路调整中,光栅干涉条纹衍射波像差随单光路离焦及左右准直系统同时离焦等调节误差的不同而变化。

图4为光栅干涉条纹衍射波像差随左右曝光光路准直系统($\omega_0 = 3 \mu\text{m}$, $f = 1200 \text{ mm}$)不同离焦条件下的变化。图4(a)中,左准直系统离焦1 mm而右光路不存在离焦时,叠栅条纹相位呈圆环形,光栅面内波像差约为951 nm,在右准直系统光路存在离焦而左准直系统理想时,光栅波像差大小不变,符号相反;如果左右准直系统离焦量相同,此时光栅干涉条纹衍射波像差较小可忽略不计,如图4(b)所示;当左、右准直系统分别离焦2 mm与1 mm,即左右准直系统相对离焦1 mm时,图4(c)产生的光栅干涉条纹衍射波像差近似等同于图4(a)。由此可知,在全息光栅曝光光学系统中,与单曝光光路准直系统离焦相比,左右准直系统相对离焦是影响光栅干涉条纹衍射波像差的主要因素。曝光光路离焦量对光栅干涉条纹波像差的影响与准直系统焦距及光栅干涉条纹周期有关,如图5所示。

图5为光栅干涉条纹衍射波像差随准直系统焦距及光栅周期的变化曲线。从图中可知,离焦对光栅干涉条纹衍射波像差的影响与准直系统焦距及光栅干涉条纹周期有关,相同离焦量时,准直系统焦距越小,光栅干涉条纹周期越大,光栅干涉条纹衍射波像差越大,因此在待制作光栅周期及光路调整精度确定时,增大曝光光路准直系统焦距可减小由于离焦量引起的光栅干涉条纹衍射波像差。

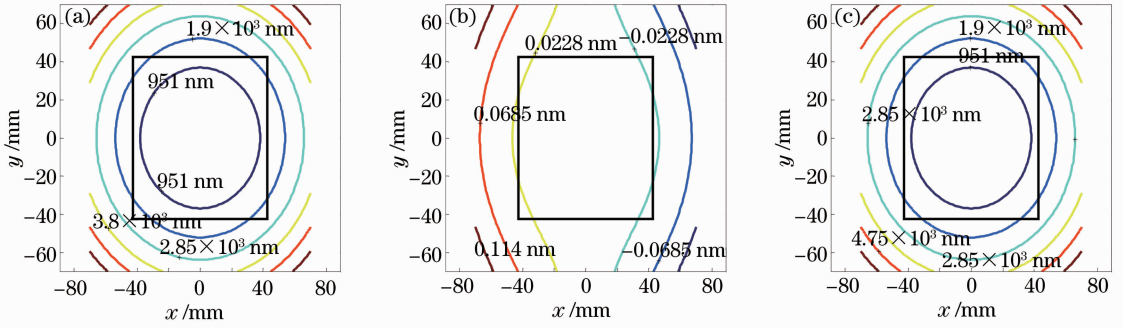


图 4 不同离焦条件下相位分布。(a)左光路离焦 1 mm；(b)左右同时离焦 1 mm；(c)左右相对离焦 1 mm

Fig. 4 Moiré phase maps for different defoci. (a) Defocus of the left path is 1 mm; (b) defocus of the left and the right path is the same 1 mm; (c) relative defocus is 1 mm

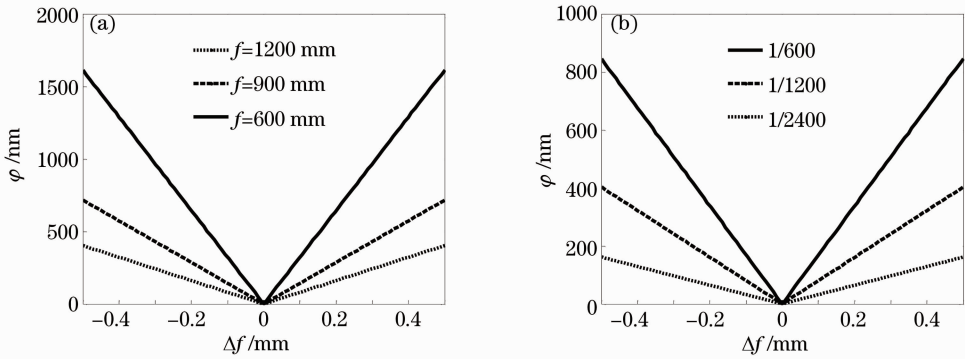


图 5 干涉条纹衍射波像差随离焦变化曲线。(a)准直系统焦距不同(1/1200 mm)；(b)光栅条纹周期不同($f=1200$ mm)

Fig. 5 Curves of the fringe wavefront aberration as a function of defocus. (a) For different focal lengths (1/1200 mm); (b) for different periods ($f=1200$ mm)

3.2 激光束腰半径变化对光栅干涉条纹衍射波像差的影响

采用几何光线追迹法分析光路调节误差与光栅干涉条纹衍射波像差关系时,将激光束腰位置看作为点光源,其大小只与离焦系数有关如(15)式,但实际的激光束腰半径变化也会影响干涉条纹衍射波像差。

图 6(a)分析了准直系统存在离焦时干涉条纹衍射波像差随高斯光束束腰半径的变化曲线,三条曲线焦距不同而离焦系数相同($D = \Delta f / f^2 = 0.5 / 1200^2$)。从图中可知,当高斯光束束腰半径 ω_0 较小时,焦距不同而离焦系数相同的准直系统具有相同的干涉条纹衍射波像差(ω_0 较小时曲线重合);当 ω_0 较大时,干涉条纹衍射波像差主要与准直系统焦距有关,焦距越小,由于离焦引起的光栅干涉条纹衍射波像差越显著。表 1 具体给出了 $\omega_0 = 1 \mu\text{m}$, $\omega_0 = 80 \mu\text{m}$ 时不同焦距准直系统的干涉条纹衍射波像差数值。根据(15)式知,在光栅制作面积确定及准直系统焦距不同时,波像差与高斯光束束腰半径无关,应满足 $\Delta\omega = \varphi$,此时波像差大小与离焦系数比

值 $\Delta\omega / D$ 应为某一固定值。分析表 1 数据,在 $\omega_0 = 1 \mu\text{m}$, $\Delta f = 0.5$ mm 条件下,不同焦距准直系统的 φ / D 完全相同,而在 $\omega_0 = 80 \mu\text{m}$ 时,不同焦距准直系统比值 φ / D 差异较大,故几何光线追迹法在 ω_0 较大时不再适用于光栅波像差的理论分析。即使不存在离焦条件下,如图 6(b),在 ω_0 较小时其束腰半径的变化对光栅干涉条纹衍射波像差的影响较小(近似为零)。结合图 6(a)和(b)及表 1 知:在 ω_0 较小时,离焦对干涉条纹衍射波像差的影响主要随离焦系数的增大而逐渐增大,不存在离焦时其束腰半径的变化不影响条纹的衍射波前,此时可认为束腰处为激光点光源;在 ω_0 较大时,准直系统的焦距主要影响干涉条纹衍射波像差的大小,其分析光栅干涉条纹衍射波像差的形成应考虑束腰半径 ω_0 的大小及高斯光束在准直系统中的传播和变换。当曝光光路不存在离焦调节误差时,准直系统焦距越小,光栅干涉条纹周期越大,光束束腰半径变化引起的光栅干涉条纹衍射波像差也越大,但该数值与曝光光路准直系统相对离焦引起的波像差数值相比较小,如图 6(b)、(c)所示。

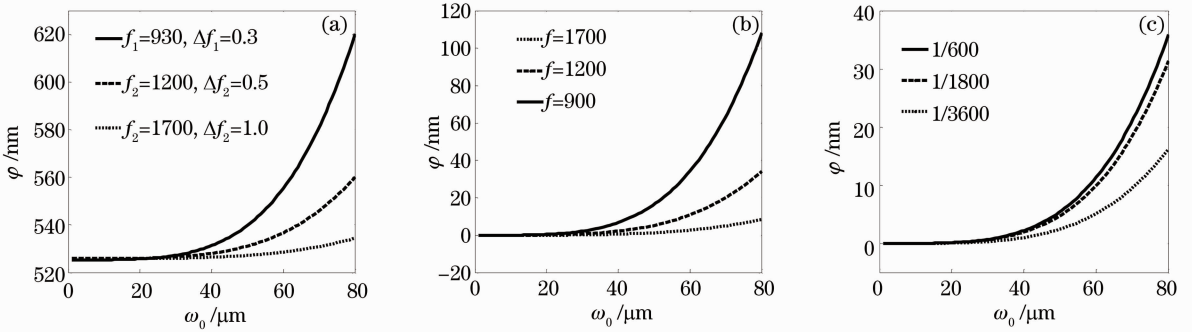


图 6 干涉条纹衍射波像差随束腰半径变化。(a)系统 $\Delta f/f^2$ 相同；(b)系统无离焦且焦距不同；(c)条纹周期不同
Fig. 6 Curves of wavefront aberration for varied initial beam waist radii. (a) For the same $\Delta f/f^2$; (b) for different focal lengths with no defocus; (c) for different periods of fringes

表 1 不同高斯光束束腰半径及系统焦距引起的光栅干涉条纹衍射波像差比较($x=40$ mm)

Table 1 Comparison of the wavefront aberration for different beam waist radii and focal lengths ($x=40$ mm)

$\omega_0/\mu\text{m}$	1			80		
$\Delta f/\text{mm}$	0.5					
f/mm	1200	900	600	1200	900	600
φ/nm	526	935	2104	560	1043	2652
$D=\Delta f/f^2$	3.4722×10^{-7}	6.1728×10^{-7}	1.3889×10^{-6}	3.4722×10^{-7}	6.1728×10^{-7}	1.3889×10^{-6}
φ/D	1.515×10^9	1.515×10^9	1.515×10^9	1.613×10^9	1.690×10^9	1.909×10^9

图 7 给出了全息光栅波像差在高斯光束束腰半径不同条件下随曝光系统焦距变化的曲线。由图 6 及表 1 分析知,在高斯光束束腰半径足够小时(大约小于 $20\ \mu\text{m}$),用光线追迹法可以很好地近似计算光栅波像差;在高斯光束束腰半径较大时,用高斯光束方法分析系统调整误差有更高的精度。图 7 中虚线和实线分别表示使用光线追迹法及高斯光束相位分析法计算光栅波像差曲线。从图 7 中知,在计算短焦距且大束腰半径系统产生的光栅波像差时,高斯光束相位分析法计算数值与光线追迹法差异较大,其原因是光线追迹法未考虑束腰对光栅波像差的影响,而将其看做点光源,所以计算精度较低。以系统焦距 $f=500\ \text{mm}$, $\omega_0=80\ \mu\text{m}$, 离焦为 $0.5\ \text{mm}$ 分析 $x=40\ \text{mm}$ 处的光栅波像差,光线追迹法获得的波像差大小为 $3029\ \text{nm}$,远小于高斯光束相位法计算的 $4167\ \text{nm}$ 数值。在扫描干涉场曝光系统中通过小光斑干涉光束进行扫描曝光时,系统焦距参数 $f=130\ \text{mm}$, $\omega_0=80\ \mu\text{m}$, 在离焦为 $0.5\ \text{mm}$, $x=2\ \text{mm}$ 位置处,光线追迹法和高斯光束相位法计算的波像差分别为 $112\ \text{nm}$ 和 $143\ \text{nm}$,在通过扫描方法制作大面积光栅时由于误差累积,其波像差差异会更大。故相比光线追迹法,高斯光束经准直系统的参数变化法(即高斯光束相位分析法)更适宜计算短焦距、大束腰半径系统的全息光栅波像差。

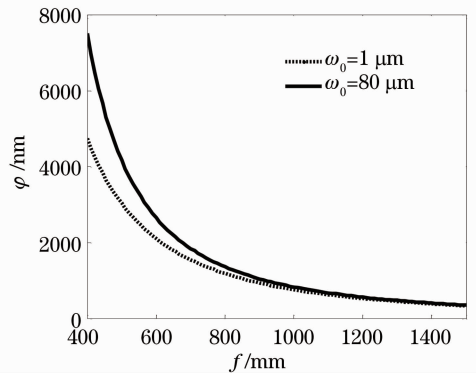


图 7 干涉条纹衍射波像差随曝光系统焦距的变化曲线

Fig. 7 Curves of wavefront aberration for varied focal lengths of the exposure system

3.3 曝光光路中准直系统与基底距离变化对光栅干涉条纹衍射波像差的影响

全息光栅曝光光学系统如果采用光线追迹方法分析光路调节误差与光栅波像差关系时,不存在调节误差时激光经准直系统后的曝光光束为平行光束,准直镜与基底距离变化不会影响光栅干涉条纹的衍射波像差,但使用高斯光束经准直系统变换的相位计算法严格分析时,准直镜与基底距离变化会引起光栅干涉条纹衍射波像差的改变。

图 8 为曝光光学系统中光栅干涉条纹衍射波像

差随透镜与基底距离 Δd 的变化曲线, Δd 表示曝光光路中其中一束光透镜与基底的距离变化, 而另一曝光光束透镜与基底距离保持不变。从图中可知, 透镜与基底距离变化对光栅干涉条纹衍射波像差的影响与曝光系统焦距及干涉条纹周期有关, Δd 一定时, 曝光系统焦距越小, 干涉条纹周期越大, 光栅干涉条纹衍射波像差越大。与曝光光学系统相对离焦

相比, 透镜和基底相对距离 Δd 变化对光栅干涉条纹衍射波像差的影响可忽略不计。表 2 比较了现有曝光光学系统中不同调节误差引起的光栅波像差大小。从表中可知, 在各种光路调节误差中, 左右曝光光路准直系统的相对离焦对光栅干涉条纹衍射波像差影响最为显著, 因此在光路调节过程中应给予严格控制。

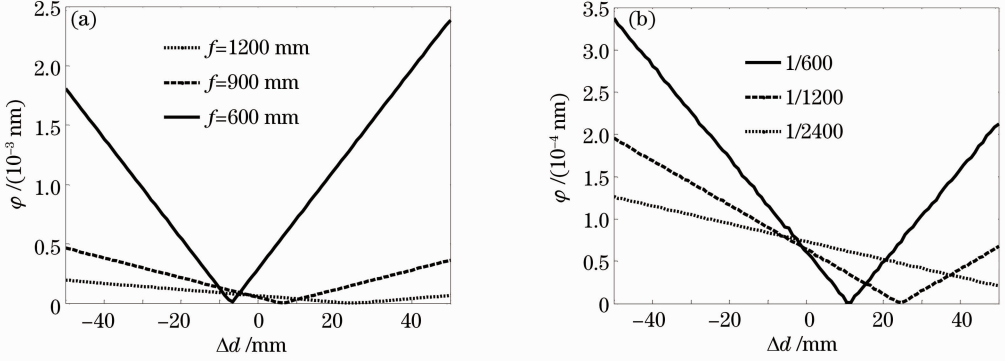


图 8 条纹衍射波像差随准直系统与基底距离变化曲线。(a)系统焦距不同; (b)干涉条纹周期不同

Fig. 8 Curves of the wavefront aberration for different distances between collimating lens and the substrate.

(a) For different focal lengths; (b) for different fringe periods

表 2 不同调节误差引起的光栅干涉条纹衍射波像差比较 ($f=1200 \text{ mm}$, $\omega_0=3 \times 10^{-3} \text{ mm}$, $x=40 \text{ mm}$)

Table 2 Comparison of the wavefront aberration for different alignment errors ($f=1200 \text{ mm}$, $\omega_0=3 \times 10^{-3} \text{ mm}$, $x=40 \text{ mm}$)

Varied parameter /mm	Ideal	$z_{1L}+50.5$	$z_{1L}+0.5$	$d_{1L}+150$	$d_{1L}+100$	$\omega_{0L} 2 \times 10^{-3}$	$\omega_{0L} 7 \times 10^{-3}$
		$z_{2L}+50$	$z_{2L}+0$	$d_{2L}+50$	$d_{2L}+0$	$\omega_{0R}+0$	$\omega_{0R} 5 \times 10^{-3}$
Phase error /nm	5.638×10^{-5}	562.5	525.92	2.856×10^{-4}	2.866×10^{-4}	6.02×10^{-5}	0.0048

4 实验验证与分析

图 9 为曝光光学系统中 $\omega_0=3 \mu\text{m}$, $f=1200 \text{ mm}$, 制作刻线密度为 1200 line/mm , 面积为 $85 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$ 的光栅时, 不同离焦量条件下接收到的叠栅条纹图形与理论模拟图形的比较。表 3 给出了不同离焦条件下光栅干涉条纹的衍射波像差及条纹数。叠

栅条纹是光栅干涉条纹与标准光栅的空间相位差, 当相位差为 π 的奇数倍时, 叠栅图形呈现暗条纹, 当相位差为 π 的偶数倍时, 叠栅图形呈现亮条纹。图 9 表明, 在光栅制作面积内, 系统不同离焦条件下叠栅条纹的明暗相间分布与理论计算的叠栅条纹相位分布能够很好地吻合, 此结果说明本文使用的高斯

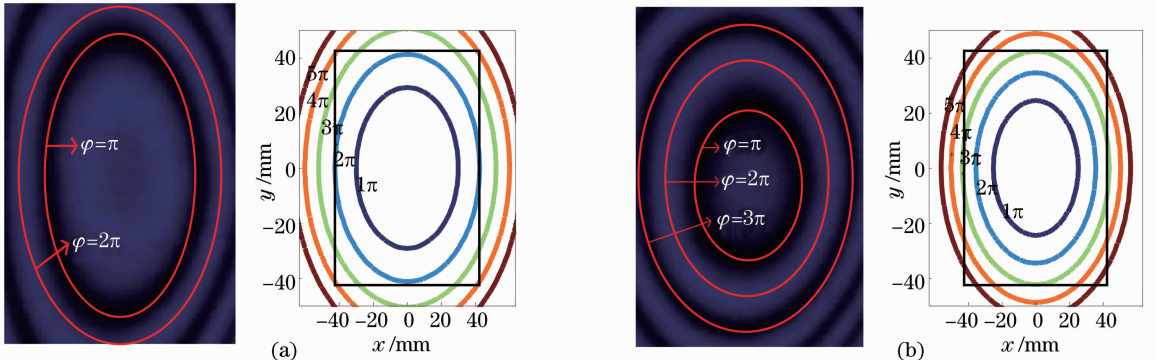


图 9 不同离焦时叠栅条纹与理论模拟条纹衍射波像差分布比较

Fig. 9 Comparison between the Moiré pattern and the simulated phase difference contours for different defocuses

光束经准直系统参数变化法计算叠栅条纹相位分布的正确性,且该方法适合用于分析光路调整误差对光栅干涉条纹衍射波像差的影响。

表 3 不同离焦时叠栅条纹与理论计算条纹的比较(1200 line/mm, $x=42$ mm, $y=0$)

Table 3 Comparison between the Moiré pattern and the simulated contours map for the different defocuses of the IL system (1200 line/mm, $x=42$ mm, $y=0$)

Figure 8	Relative defocus /mm	Phase error /nm	Phase error / π
Fig. 9(a)	0.70	831	1.99
Fig. 9(b)	1.0	1187.44	2.85

5 结 论

采用 q 参数讨论高斯光束经曝光光路准直系统的传播和变换,给出了叠栅条纹相位分布的数学解析式,由此分析光路轴向调节误差引起的光栅干涉条纹衍射波像差变化,得出如下结论:1)在光路无轴向调节误差下,参数 f/ω_0 相同的准直系统具有相同的干涉条纹衍射波像差,在存在的各种光路轴向调节误差中,左右曝光光路准直系统的相对离焦对光栅干涉条纹衍射波像差影响最为显著;2)相对离焦对曝光光路的影响与准直系统焦距及光栅周期有关,相同离焦量条件下,准直系统焦距越小,光栅周期越大,相对离焦引起的光栅干涉条纹衍射波像差越大;3)无论是否存在离焦,高斯光束束腰半径的变化对光栅干涉条纹衍射波像差的影响随准直系统焦距的增大而逐渐减小,在束腰半径较小时可将束腰看作为点光源,在准直系统焦距较小且束腰半径较大时,则通过 q 参数计算高斯光束经准直系统变换后的相位分布法更适合讨论系统轴向调整误差与光栅衍射波像差的关系。同时考虑全息曝光系统离轴误差和轴向调节误差对光栅衍射波像差的影响问题将另文讨论。

参 考 文 献

- Zhu Saoji, Zou Haixing, Bao Xuecheng *et al.*. Diffraction Gratings [M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 343~345
祝绍箕, 邹海兴, 包学诚等. 衍射光栅[M]. 北京:机械工业出版社, 1986. 343~345
- Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Modeling and *in-situ* monitoring of the asymmetric exposure and development of holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 65~69
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊等. 全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 65~69
- Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling of *in-situ* monitoring curves during development of holographic gratings

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1146~1150
赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟 [J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1146~1150
- E. H. Anderson, V. Bogli, M. L. Schattenburg *et al.*. Metrology of electron-beam lithography systems using holographically produced reference samples [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1991, **9**(6): 3606~3611
- J. Ferrera, M. L. Schattenburg, H. I. Smith. Analysis of distortion in interferometric lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1996, **14**(6): 4009~4013
- J. Ferrera, V. V. Wong, S. Rishton *et al.*. Spatial-phase-locked electron-beam lithography: initial test results [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1993, **11**(6): 2342~2345
- Xu Fuquan, Jin Lu, Li Wenhao *et al.*. Influence of defocus of exposure system on diffraction wavefront of plane holographic grating [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, **1**(1): 57~61
徐福全, 金 陆, 李文昊. 曝光系统离焦对平面全息光栅衍射波前的影响[J]. 中国光学与应用光学, 2008, **1**(1): 57~61
- Zhang Wei, Wu Jianhong, Zhu Jianqiang *et al.*. New method for the fabrication of pulse compression grating [C]. *SPIE*, 2006, **6149**: 614921
- Zhang Wei, Wu Jianhong, Li Chaoming. Effect of wavefront aberration of grating on pulse compression [J]. *Hign Power Laser and Partical Beams*, 2005, **17**(3): 399~402
张 伟, 吴建宏, 李朝明. 光栅波像差对脉冲压缩的影响[J]. 强激光与离子束, 2005, **17**(3): 399~402
- Zhang Wei, Wu Jianhong, Zhu Jianqiang *et al.*. New method to regulate light path of pulse compression grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1609~1613
张 伟, 吴建宏, 朱健强等. 脉冲压缩光栅光路调节新方法研究 [J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1609~1613
- Li Chaoming, Wu Jianhong, Chen Xinrong *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression masaic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1943~1946
李朝明, 吴建宏, 陈欣荣等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(7): 1943~1946
- Wang Shihua, Wu Jianhong, Li Chaoming *et al.*. Wavefront aberration analyse of large aperture grating fabricated by plano-convex lens [J]. *Laser Journal*, 2007, **28**(6): 48~50
王诗华, 吴建宏, 李朝明等. 用平凸透镜制作大口径光栅的像差分析 [J]. 激光杂志, 2007, **28**(6): 48~50
- C. G. Chen. Beam Alignment and Image Metrology for Scanning Beam Interference Lithography Fabricating Gratings with Nanometer Phase Accuracy [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2003
- Bayanheshig, Shao Xianxiu, Cui Jicheng *et al.*. The off-axis parabolic/liloyd's mirror interferometric system for manufacturing plane holographic gratings [J]. *Optics Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 56~63
巴音贺希格, 邵先秀, 崔继承等. 制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛艾镜干涉系统 [J]. 光学精密工程, 2011, **19**(1): 56~63
- Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 165~170
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 165~170
- C. G. Chen, P. T. Konkola, J. Ferrera *et al.*. Analyses of vector Gaussian beam propagation and the validity of paraxial and spherical approximations [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(2): 404~412
- P. Konkola, C. G. Chen, R. Heilmann *et al.*. Beam steering system and spatial filtering applied to interference lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2000, **18**(6): 3282~3286