

# 扫描干涉场曝光系统光斑尺寸与光路设计

王 玮<sup>1,2</sup>, 姜 珊<sup>1</sup>, 宋 莹<sup>1</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在扫描干涉场曝光(SBIL)系统中,曝光光斑尺寸对干涉条纹的拼接精度、光栅制作效率及干涉场质量有着十分重要的影响。为获取合理的曝光光斑尺寸,基于高斯光束的传输规律及扫描拼接数学模型进行了数值模拟,讨论了曝光光斑尺寸对干涉条纹的非线性误差、刻线拼接误差和曝光对比度的影响。结果表明:小尺寸曝光光斑比大尺寸曝光光斑更有利于控制干涉条纹的非线性误差;由于存在周期测量误差,小尺寸曝光光斑有利于减小拼接后的刻线误差并提高曝光对比度。针对 SBIL 系统设计了曝光光路,并对所设计的光路进行了优化。对干涉场左右光斑形貌及干涉条纹相位的非线性误差进行了测量,结果表明:曝光光斑的束腰半径约为 0.9 mm,干涉条纹相位的非线性误差峰谷值为 21.8 nm。

**关键词** 光栅;扫描干涉场曝光系统;高斯光束;光斑尺寸;光路设计

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0905002

## Design of Spot Size and Optical Path in Scanning Beam Interference Lithography System

Wang Wei<sup>1,2</sup>, Jiang Shan<sup>1</sup>, Song Ying<sup>1</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In a scanning beam interference lithography (SBIL) system, the exposure spot size has significant influence on the stitching accuracy of interference fringes, efficiency of grating fabrication and quality of interference field. In order to obtain a reasonable exposure spot size, the influence of exposure spot size on nonlinear error of interference fringe, line stitching error and exposure contrast is discussed by numerical simulation based on the transmission law of Gaussian beam and scanning stitching mathematical model. Results show that, compared with the large-sized spot, the small exposure spot is more conducive to controlling nonlinear error of interference fringe. Because there exists periodic measurement error, a small exposure spot helps to reduce the line error after stitching and enhance the exposure contrast. The exposure optical path of SBIL system is designed and optimized. The left and right spot morphologies of interference field and the nonlinear error of interference fringe phase are measured. Results show that the waist radius of exposure spot is about 0.9 mm, and the nonlinear error peak-valley value of interference fringe phase is 21.8 nm.

**Key words** gratings; scanning beam interference lithography system; Gauss beam; spot size; optical path design

**OCIS codes** 050.2770; 220.3740; 220.4830; 080.3620

## 1 引言

扫描干涉场曝光(SBIL)技术可用于制作全息光栅,其原理是让两束高斯激光通过一定的光学系统后在

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-05-05

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(61227901)

作者简介: 王 玮(1989—),男,博士研究生,主要从事扫描干涉场曝光技术方面的研究。E-mail: wayne\_lzu@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术等方面的研究。E-mail: bayin888@sina.com(通信联系人)

束腰处相叠加并形成干涉条纹,再通过二维精密工作台以步进扫描的方式将该干涉条纹记录于涂有光刻胶的基底上,从而制作出大面积的光刻胶光栅掩模<sup>[1-3]</sup>。SBIL 技术在一定程度上融合了全息光栅<sup>[4-5]</sup>与机械刻划光栅<sup>[6-8]</sup>的特点,可以一次性曝光出多条干涉条纹并对这些干涉条纹进行精确拼接。

SBIL 技术在制作光栅时不仅要考虑静态全息曝光技术中的光束波前和能量分布等因素,还需要考虑条纹扫描拼接的精度,其中干涉条纹非线性误差、刻线误差和曝光对比度是 3 个非常关键的参数。Chen 等<sup>[9]</sup>针对 SBIL 系统提出了一种利用叠栅条纹测量干涉场相位非线性误差的方法,分析了光束夹角失调与束腰位置失调对干涉条纹非线性误差的影响。姜珊等<sup>[10]</sup>分析了 SBIL 系统中周期设定对曝光刻线误差的影响,并建立了相应的扫描拼接模型。

直观上,增大曝光光斑尺寸可以增加步进间隔,减少曝光时间,提高光栅制作效率,但是 SBIL 系统较为复杂,各参数之间相互影响,需要综合考虑各关键参数对光斑尺寸的要求。本文基于高斯光束的传播规律及扫描拼接的特点,通过数值模拟系统讨论了曝光光斑尺寸对干涉条纹非线性误差、刻线误差和曝光对比度等关键参数的影响,为 SBIL 光学系统的设计与曝光刻线拼接精度的提高提供了理论依据。针对 SBIL 光路,设计了优化系统的光学布局,以达到为扫描曝光系统提供高质量干涉场的目的,从而满足系统对干涉场参数调整的需求。

## 2 干涉场尺寸设计

### 2.1 光斑尺寸对干涉条纹非线性误差的影响

SBIL 系统采用高斯激光束作为曝光光源,根据高斯光束的传播理论<sup>[11]</sup>,沿  $z$  轴方向传播的高斯光束复振幅分布的一般表达式为

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \exp\left\{-i\left\{k\left[z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right] - \Phi(z)\right\}\right\}, \quad (1)$$

式中  $\omega_0$ 、 $\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/b)^2}$ 、 $R(z) = z[1 + (b/z)^2]$ 、 $\Phi(z) = \arctan(z/b)$ 、 $b = \pi\omega_0^2/\lambda$  分别为高斯光束的束腰半径、截面半径、等相位面曲率半径、位相因子和共焦参数。高斯光束在任意距离  $z$  处的波前为球面,球面曲率半径由  $R(z)$  确定,如图 1 所示。由(1)式可以看出,当  $z=0$  或  $z \ll b$  时, $R \rightarrow \infty$ ,波面为平面,理想情况下光栅基底应当处于  $z=0$  处。

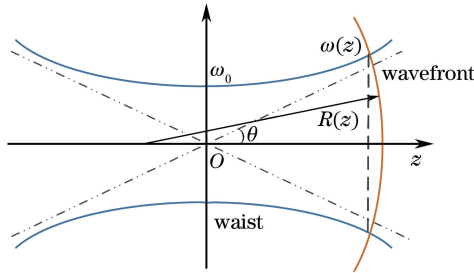


图 1 高斯光束示意图

Fig. 1 Schematic of Gauss beam

SBIL 系统采用两束高斯光束相互干涉的方式形成干涉条纹,左、右两侧曝光光路用各自坐标系  $x_L y_L z_L$  和  $x_R y_R z_R$  表示,为此需要将两曝光光路坐标系统一到光栅基底坐标系  $x y z$  中。图 2 为双高斯光束干涉示意图,由图可见,左、右光路与光栅基底坐标系间的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_L \\ y \\ x \sin \theta_L + d_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_R \\ y \\ -x \sin \theta_R + d_R \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $(x_L, y_L, z_L)$ 、 $(x_R, y_R, z_R)$  分别代表左、右光束的坐标; $(x, y, z)$  代表光栅基底的坐标; $\theta_L$  与  $\theta_R$  分别代表左、右光束与基底法线的夹角,通常  $\theta_L = \theta_R$ ;  $d_L$  与  $d_R$  分别代表左、右光束束腰与光栅基底之间的距离。

由(1)式可见,高斯光束经过一定的传输距离  $z$  后,其波前相位可以表示为

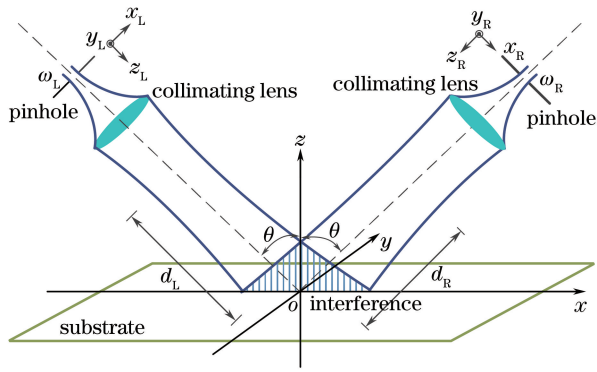


图 2 双高斯光束干涉示意图

Fig. 2 Schematic of interference of double Gauss beams

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

式中  $k$  为波数。将(3)式代入(2)式,可得基底处左、右两干涉光束的相位分布为

$$\begin{cases} \varphi'_L = -kz_L - k \frac{x_L^2 + y_L^2}{2R(z_L)} + \Phi(z_L) \\ \varphi'_R = -kz_R - k \frac{x_R^2 + y_R^2}{2R(z_R)} + \Phi(z_R) \end{cases} \quad (4)$$

对左、右光束相位作差,得到左、右光束相互叠加形成的干涉场相位分布为

$$\varphi' = k(z_R - z_L) - [\Phi(z_R) - \Phi(z_L)] + k \left[ \frac{x_R^2 + y_R^2}{2R(z_R)} - \frac{x_L^2 + y_L^2}{2R(z_L)} \right]. \quad (5)$$

标准干涉场的空间相位分布是以坐标原点为零点进行计算的,即叠加形成的相位需要减去干涉场在原点处的相位常数  $\varphi'_c$ 。通常用干涉场与标准条纹形成的叠栅条纹表征干涉场条纹偏离理想条纹的程度,即

$$\varphi = \varphi' - \varphi'_c - \frac{2\pi}{p}x, \quad (6)$$

式中  $p$  为干涉场条纹周期。(6)式表示左、右曝光系统叠加形成干涉场的相位相对于标准光栅的空间相位差,反映了干涉条纹的波前差,也表征了干涉条纹的弯曲程度。

为了保证曝光时的干涉场质量,在系统两侧光路中设计了空间滤波器,以对光束进行滤波,空间滤波器由聚焦镜、针孔和准直透镜组成。高斯光束经聚焦镜聚焦后经过针孔,光波中的高频分量被截断,光束的光强分布变得平滑,通过针孔后的光束再经过准直透镜后变为平行度好的准直光束。通常认为针孔的位置即为准直前高斯光束束腰的位置,在进行曝光光路设计时要精确计算滤波针孔与准直透镜之间的距离,以保证较好的滤波效果与条纹直线度。高斯光束的传输规律可以采用复参数  $q$  表示<sup>[11]</sup>,  $q$  参数将高斯光束的束斑半径和曲率半径统一在一个表达式中,利用  $q$  参数可以得到高斯光束经过薄透镜后的束腰位置和束腰尺寸。结合(6)式与高斯光束经过透镜的传输规律,可得到光栅基底处干涉条纹的非线性误差。理想情况下,高斯激光束束腰位于光栅基底表面,干涉场处曝光光束的波前为平面,形成的干涉条纹为等间距分布的直条纹,即干涉条纹的相位呈线性分布。然而在实际中,针孔和准直透镜之间的距离与理想值之间存在一定的装调误差,导致干涉场波前出现一定程度的弯曲,即产生了条纹相位的非线性误差。为了直观地分析干涉场尺寸对干涉条纹非线性误差的影响,基于以上数学模型,利用 Matlab 软件模拟存在装调误差时不同干涉场尺寸对条纹非线性误差的影响。模拟时假设针孔与准直透镜的距离为 130 mm,透镜与光栅基底的距离为 190 mm,根据具体干涉场尺寸对透镜焦距进行更改。

首先模拟理想状态下干涉场的光斑束腰半径分别为 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mm 时干涉条纹的非线性误差,如图 3 所示。图中紫色虚线表示光斑束腰半径,不同颜色线条代表了不同空间位置处干涉条纹的非线性误差。

由图 3 可知,在理想状态下,干涉场光斑束腰半径分别取 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mm 时,干涉条纹的非线性误差均远小于 1 nm。但在系统装调时必然存在装调误差,下面讨论在不同失调量下光斑尺寸对干涉条纹非线

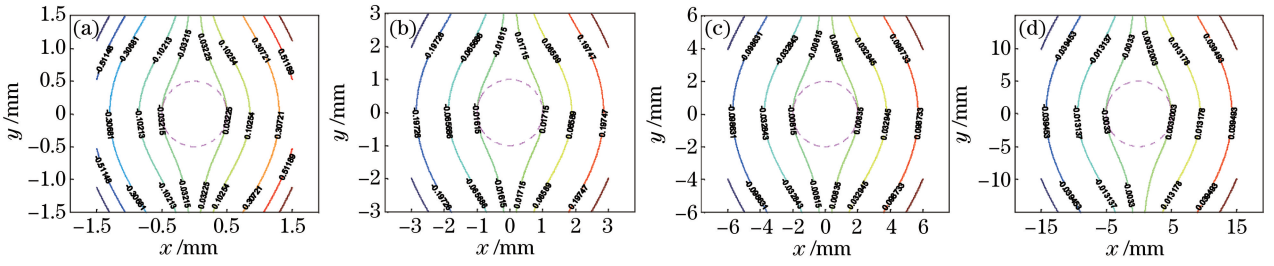


图3 理想状态下不同束腰半径对应的干涉场非线性误差。(a) 0.5 mm;(b) 1.0 mm;(c) 2.0 mm;(d) 5.0 mm

Fig. 3 Nonlinear error of interference field with different waist radii in ideal condition.

(a) 0.5 mm; (b) 1.0 mm; (c) 2.0 mm; (d) 5.0 mm

性误差的影响。当针孔与准直透镜之间的失调量为  $20\ \mu\text{m}$  和  $100\ \mu\text{m}$  时,模拟干涉场的光斑束腰半径分别为  $0.5, 1.0, 2.0, 5.0\ \text{mm}$  时对应的干涉条纹的非线性误差,结果如图4、5所示。

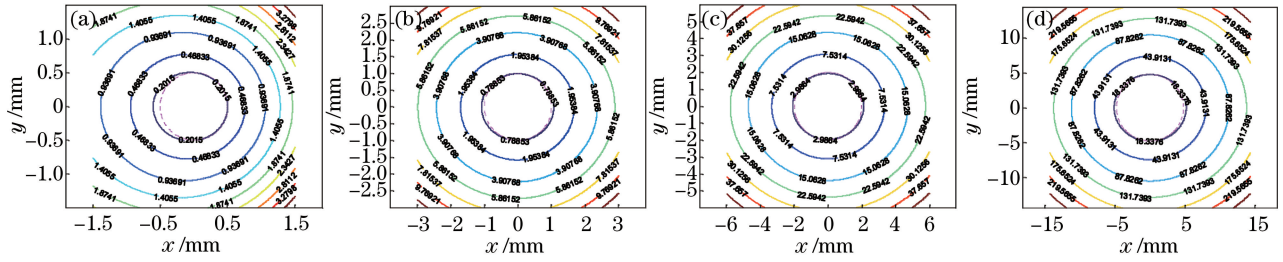


图4 存在  $20\ \mu\text{m}$  失调量时干涉条纹的非线性误差。(a) 0.5 mm;(b) 1.0 mm;(c) 2.0 mm;(d) 5.0 mm

Fig. 4 Nonlinear error of interference fringe with misalignment of  $20\ \mu\text{m}$ . (a) 0.5 mm; (b) 1.0 mm; (c) 2.0 mm; (d) 5.0 mm

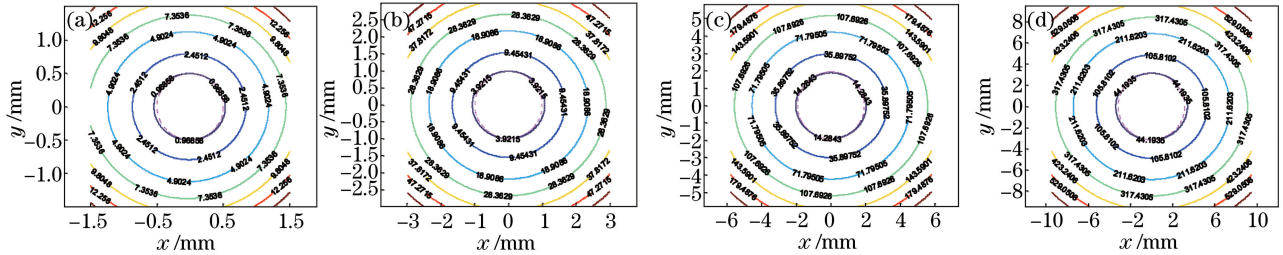


图5 存在  $100\ \mu\text{m}$  失调量时干涉条纹的非线性误差。(a) 0.5 mm;(b) 1.0 mm;(c) 2.0 mm;(d) 5.0 mm

Fig. 5 Nonlinear error of interference fringe with misalignment of  $100\ \mu\text{m}$ . (a) 0.5 mm; (b) 1.0 mm; (c) 2.0 mm; (d) 5.0 mm

由图4、5可知,在干涉场光斑束腰半径分别为  $0.5, 1.0, 2.0, 5.0\ \text{mm}$  的条件下,当准直透镜与针孔之间的失调量为  $20\ \mu\text{m}$  时,干涉条纹的非线性误差分别为  $0.20, 0.79, 2.99, 18.34\ \text{nm}$ ;当准直透镜与针孔之间的失调量为  $100\ \mu\text{m}$  时,干涉条纹的非线性误差分别为  $0.96, 3.92, 14.28, 44.19\ \text{nm}$ 。表1给出了不同曝光光斑尺寸下,准直透镜与针孔之间的装调误差为理想情况和失调量分别为  $10, 20, 50, 100, 500\ \mu\text{m}$  时干涉条纹的非线性误差。

由上述分析可以看出,当准直透镜的轴向装调误差相同时,随着干涉场束腰半径的增大,干涉场束腰半径内的非线性误差变大,即大尺寸干涉场不利于条纹非线性误差的调整。综合考虑装调难度,所设计的曝光

表1 不同失调量对于干涉条纹非线性误差的影响

Table 1 Effect of misalignment on nonlinear error of interference fringe

nm

Waist radius / mm	Nonlinear error				
	Ideally	$10\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$	$50\ \mu\text{m}$	$100\ \mu\text{m}$
0.5	$\ll 1$	$\ll 1$	$\ll 1$	$\ll 1$	$\ll 1$
1.0	0.09	0.39	0.70	1.46	9.60
1.5	0.20	0.79	1.41	2.99	18.34
2.0	0.48	1.96	3.50	7.38	36.30
5.0	0.96	3.92	10.09	14.28	44.19

光斑半径尺寸不应过大。

## 2.2 光斑尺寸对刻线误差的影响

结合(1)、(2)式可得左、右光束在束腰位置处叠加形成的干涉场的光强分布为

$$I(x, y) = I_L(x, y) + I_R(x, y) + 2\sqrt{I_L(x, y)I_R(x, y)} \cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \varphi_0\right), \quad (7)$$

式中  $I_L = |E_L|^2$ ,  $I_R = |E_R|^2$ ,  $E_L, E_R$  为高斯光束复振幅;  $p = \lambda / (2\sin\theta)$ , 其中  $\theta$  为光束夹角的一半;  $\varphi_0$  为初始干涉场相位。在 SBIL 技术中, 利用相位锁定技术可以实现干涉场相位的精确控制, 以保证条纹与光栅基底之间的随动。

SBIL 技术通过工作台步进扫描的方式将干涉条纹曝光于光栅基底上, 假设光斑以速度  $v$  沿  $y$  轴运动, 通过扫描曝光可得每次扫描的曝光量为

$$D_n(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dt = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dy. \quad (8)$$

在扫描曝光过程中, 通过步进拼接的方式将曝光区域扩大, 假设相邻步进扫描的间隔为  $s$ , 则系统经过  $N$  次步进扫描后, 光栅基底上的总曝光量为  $N$  个单次扫描曝光的总和, 即

$$D(x) = \sum_{n=1}^N D_n(x). \quad (9)$$

SBIL 系统需要对相邻扫描间的干涉条纹进行精确拼接, 理想情况下干涉场的相对移动量应为整数个条纹周期, 为此干涉条纹周期的准确测量对 SBIL 技术至关重要。每次曝光之前需要对干涉条纹周期进行测量, 实际测量得到的干涉条纹周期与真实干涉条纹周期之间存在一定误差, 假设干涉条纹周期的测量值为  $p_s$ , 其与实际干涉条纹周期  $p$  之间的误差  $p_s = p(1 + \delta p)$ , 即干涉条纹周期在动态条纹锁定过程中的设定值与实际干涉条纹周期值之间的相对误差为  $\delta p$ 。

将误差代入(8)式, 可得存在干涉条纹周期测量误差时第  $n$  次扫描的曝光量为

$$D_n(x) = A_{Dn}(x) \left[ 1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \varphi_{en}\right) \right], \quad (10)$$

式中  $\gamma$  为干涉场对比度;  $A_{Dn}(x) = E_0 \frac{\omega}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp\left\{-2 \frac{[x - (n-1)\varepsilon\omega]^2}{\omega^2}\right\}$ , 其中  $\omega$  为干涉场束腰半径,  $E_0$  为归一化常数;  $\varphi_{en} = -\frac{2\pi(n-1)\varepsilon\omega}{p} \delta p$ 。

经过  $N$  次扫描后, 光栅基底上总的曝光量可表示为

$$D(x) = D_B \left\{ 1 + \frac{D_A(x)}{D_B(x)} \cos\left[\frac{2\pi}{p}x + \Phi_e(x)\right] \right\}, \quad (11)$$

式中  $\tan \Phi_e(x) = \frac{\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \sin \varphi_{en}}{\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \cos \varphi_{en}}$ ;  $D_A(x) = \gamma \sqrt{\left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \sin \varphi_{en}\right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N A_{Dn}(x) \cos \varphi_{en}\right]^2}$ ;  $D_B(x) = \sum_{n=1}^N A_{Dn}(x)$  为光刻胶上的平均曝光量,  $2\pi x/p + \Phi_e(x)$  代表了曝光条纹的相位;  $\Phi_e(x)$  可以认为是曝光条纹相位与曝光光栅相位理论值之间的偏差。剔除  $\Phi_e(x)$  中的线性部分<sup>[12]</sup>, 可得真实曝光刻线相位与理想光栅相位的差值  $\delta_g(x)$ , 即刻线误差。  $D_A(x)$  与  $D_B(x)$  的变化频率远小于干涉条纹频率, 因此垂直刻线方向(步进方向)的曝光量对比度可定义为

$$\Gamma_D(x) = \frac{D_A(x)}{D_B(x)}. \quad (12)$$

在实际曝光过程中, 干涉条纹周期的测量精度可达到  $5 \times 10^{-5}$ , 基于以上模型模拟此时光栅刻线误差  $\delta_g$  随干涉场束腰半径  $\omega$  的变化, 结果如图 6 所示。由图可见, 随着干涉场束腰半径的增大, 重叠曝光后的刻线误差随之增大。根据衍射光栅在 Littrow 条件下的鬼线强度的计算公式  $P_g = (\pi m \delta_g / d)^2$  ( $d$  为光栅周期)<sup>[13-14]</sup>, 可以得到光栅鬼线强度小于  $10^{-5}$  时曝光后的刻线误差小于 0.559 nm, 此时对应的光斑半径小于 1.15 mm。

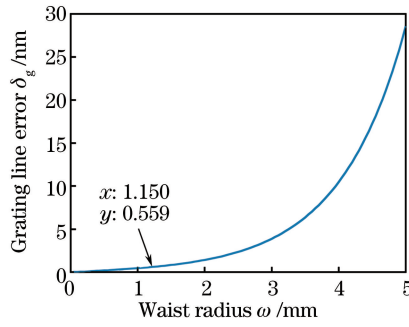


图 6 光栅刻线误差随干涉场束腰半径的变化

Fig. 6 Variation of grating line error with waist radius of interference field

### 2.3 光斑尺寸对曝光对比度的影响

由(11)、(12)式可知,当存在周期误差时, $N$ 次扫描后光栅基底上总的曝光量会出现波动。实际可以达到的周期测量精度为 $5 \times 10^{-5}$ ,模拟此条件下不同干涉场束腰半径对于曝光对比度的影响如图7所示。图7(a)为光斑尺寸分别为0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0 mm时,经过8次扫描拼接得到光栅基底上的曝光对比度变化。横坐标为光栅基底横向坐标 $x$ 与步进间隔 $s$ 之间的比值,纵坐标为曝光对比度,不同曲线对应不同的束腰尺寸;图7(b)为光斑尺寸为0.1~5.0 mm时多次扫描中的曝光对比度。图中阴影部分表示基底上不同位置曝光对比度的变化范围,蓝色实曲线、绿色虚线和黄色曲线分别为扫描过程中光栅基底上的曝光对比度最大值、最小值和平均值。图7(a)与图7(b)是相互对应的,如图7(a)中红色方框中的曲线表示束腰半径为3 mm时扫描过程中曝光对比度出现的波动与图7(b)中红色方框区域对比度的变化相对应。

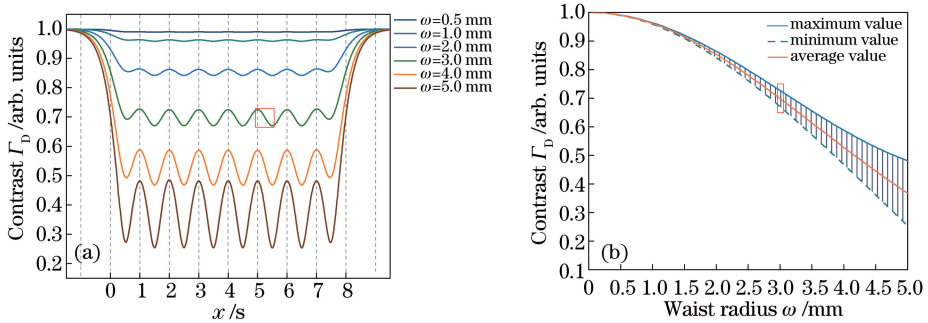


图 7 一定周期误差下曝光对比度随(a)步进间隔和(b)干涉场束腰半径的变化

Fig. 7 Variation of exposure contrast with (a) step interval and (b) waist radius of interference field at certain period error

由图7可见,在一定的周期测量误差下,光束口径增大会使曝光对比度减小,例如当 $\omega$ 由1 mm增大至3 mm时,光刻胶上的最低对比度由0.96减小至0.67。光束口径增大使光刻胶上曝光对比度的波动幅度也增大,例如当 $\omega$ 为1 mm时,对比度变化范围为0.958~0.963;当 $\omega$ 为3 mm时,对比度变化范围为0.67~0.725;当 $\omega$ 增大至5 mm时,对比度变化范围为0.481~0.259。在SBIL系统中,期望在制作光栅过程中光刻胶上的曝光对比度不低于0.9,以保证光栅掩模满足刻蚀需求,为此干涉场半径应当设计在1 mm左右。

综上所述,存在一定的装调误差时,小尺寸曝光光斑的非线性误差优于大尺寸光斑,或者说小尺寸曝光光斑更利于获取更大非线性误差的干涉场。此外,存在周期测量误差时,小尺寸曝光光斑可以降低拼接后的刻线误差,有利于控制光栅鬼线强度、增大扫描拼接后的曝光对比度并改善光栅表面的均匀性。根据以上分析,综合考虑各方面因素,曝光光斑半径应当设计在1 mm左右。

### 3 系统光学透镜布局

采用高斯激光束作为曝光光束,系统中的透镜是唯一能改变光束特性的光学元件,其设计与布局直接影响到系统的整体性能。在设计时需要考虑以下因素:1)控制光束发散角;2)传输过程中避免因光斑发散过大而引入波前误差;3)调整光束束腰位置及尺寸,使其满足光学元件布局的长度需要及系统曝光精度的要

求;4) 透镜结合针孔光阑组成空间滤波器,滤去光束中的高频噪声,以保证光斑能量的均匀性。系统光源为 Spectra-Physics 公司生产的 BeamLok 2080 型 Kr 离子激光器,波长为 413.1 nm,出射光束的束腰半径为 0.8 mm,束腰位于激光器后端。系统欲制作的光栅周期为 1800 lp/mm (555.6 nm),即曝光光束与光栅基底的夹角为 21.8°。

### 3.1 理论计算

基于以上要求对曝光光路中的透镜进行了设计。系统共采用 5 个透镜,其中位于主光路上的中继透镜起到调制激光光束的作用,可确保光束传播 10 m 后不显著扩大;另外 4 个透镜位于两侧的空间滤波器中,起到聚焦和准直的作用。根据高斯光束在透镜中的传输规律,计算得到中继透镜的焦距为 3286 mm,聚焦镜的焦距为 130 mm,准直透镜的焦距为 192 mm,准直透镜到光栅基底的距离为 452 mm。透镜分布距离如图 8 所示。

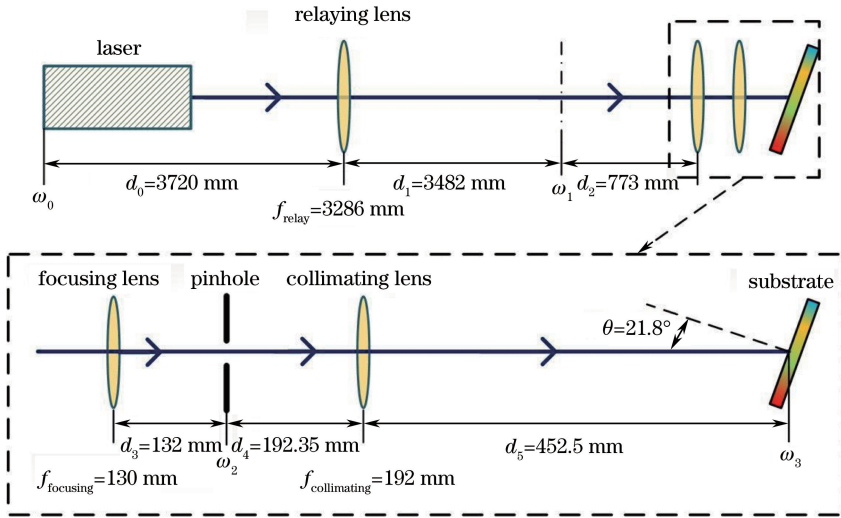


图 8 透镜分布距离示意图

Fig. 8 Schematic diagram of lens distribution distance

图 8 中  $\omega_0$  为激光器出射光束束腰半径,初始时束腰位于激光器后端,束腰半径为 0.8 mm; $\omega_0$  距离中继透镜的距离  $d_0$  为 3720 mm,中继透镜焦距  $f_{Relay}$  为 3286 mm。 $\omega_1$  为经过中继透镜后的光束束腰半径,大小为 0.54 mm,束腰位于图中虚线所示平面处,距离中继透镜  $d_1$  为 3482 mm。之后光束经过聚焦透镜进行会聚,聚焦镜焦距  $f_{focusing}$  为 130 mm, $\omega_1$  距离聚焦透镜  $d_2$  为 773 mm, $\omega_2$  为经过聚焦透镜后的光束束腰半径,大小为 30.4  $\mu\text{m}$ ,此处设置针孔对光束进行滤波,以消除光波中的高频分量,平滑光强分布,保证干涉场质量。 $\omega_3$  为经过准直透镜后的光束束腰半径,准直透镜焦距  $f_{collimating}$  为 130 mm,此时束腰位于光栅基底表面,干涉场波前相位分布最优,准直透镜距离光栅基底表面距离  $d_4$  为 773 mm。基于以上计算设计可得最终光栅基底处光斑尺寸  $\omega_3$  为 0.83 mm,考虑到光束倾斜入射至光栅基底表面,基底表面上光斑实际尺寸计算值为  $\omega_3 / \cos \theta = 0.9 \text{ mm}$ 。

### 3.2 优化设计

以上计算基于理想薄透镜,未考虑光学材料及加工精度的影响,为此系统利用 Code V 对光路透镜设计布局进行优化,系统透镜采用 JGS1 光学石英玻璃。

利用 Code V 中的高斯光束分析功能,对高斯光束的传输进行追迹优化。最终优化结果显示,高斯光束传播至接收面(干涉场)时, $x$  方向光束的束腰半径为 0.8449 mm, $y$  方向光束的束腰半径为 0.9100 mm,此时波面近似为平面,此结果满足设计预期,达到了系统要求。

## 4 干涉场参数测量

### 4.1 光斑形貌测量

采用 Ophir-Spiricon 公司生产的光束质量探测器 BeamGage 对光斑形貌进行测量。将光束质量探测器放置于干涉场中,挡住其中一路光束,并对另一路光束进行采样测量;保持探测器固定不变,采用相同的方法

对另一路光束进行采样测量。

测试过程中需经过衰减片把功率减小到饱和功率以下,测量结果如图 9 所示。图 9(a)为左侧光斑形貌,图 9(b)为右侧光斑形貌。由图可见,光斑呈良好的高斯形分布,能量较均匀,左右光斑形貌较为一致。左侧光束  $x$  方向的束腰半径为 0.92 mm,  $y$  方向的束腰半径为 0.95 mm;右侧光束  $x$  方向的束腰半径为 0.94 mm,  $y$  方向的束腰半径为 0.98 mm。该结果满足系统对光斑形貌的要求。

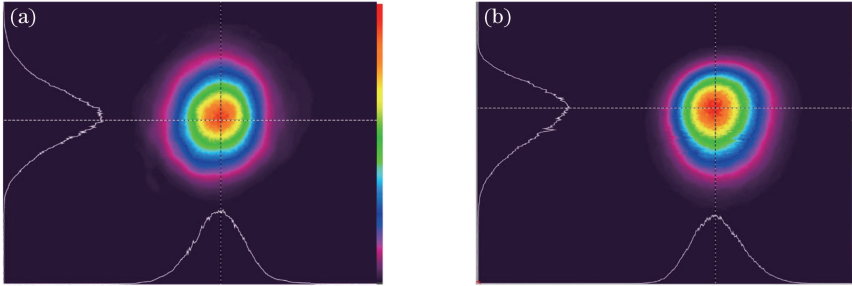


图 9 左右曝光光斑形貌图。(a)左侧;(b)右侧

Fig. 9 Morphologies of left and right exposure spots. (a) Left side; (b) right side

#### 4.2 干涉条纹相位的非线性误差测量

用探测器难以直接测量干涉场相位,此系统采用简单实用的哈里哈兰<sup>[15]</sup> 五步相移算法对相位差进行测量,如图 10 所示,其基本原理如下:将一块与干涉条纹周期相同的基准光栅放置于干涉场中,此时光栅在 Littrow 条件下工作。右侧曝光光束经基准光栅反射后的 0 级反射光与左侧曝光光束经基准光栅衍射后的 -1 级衍射光重合,重合光束经过反射镜折转后被 CCD 接收。干涉场光斑直径仅为 2 mm,在此区域中可以认为基准光栅具有理想直线度。通过相位锁定技术控制干涉条纹的相位,进行 5 次  $\pi/2$  的相移,利用 CCD 相机记录这 5 幅叠栅条纹图像,并据此还原此时干涉条纹的相位分布,即可得到干涉条纹的非线性误差。利用相位锁定技术与五步相移算法测量干涉条纹相位的非线性误差是 SBIL 系统中的一项关键技术,有关此技术的具体设计与分析已有不少论述<sup>[16-17]</sup>,此处不做具体展开。

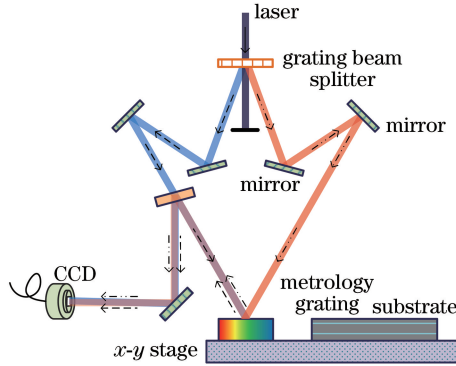


图 10 干涉条纹相位测量示意图

Fig. 10 Schematic of interference fringe phase measurement

根据以上原理,在系统中搭建了干涉条纹相位测量系统,利用相位锁定技术使光束相位产生  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$  的变化,CCD 采集得到的五步相移图像如图 11 所示。图中图样的细条纹为系统的噪声,将采集得到的叠栅条纹图样数据通过哈里哈兰五步相移算法进行还原,可得干涉图样相位分布,去除干涉条纹相位的理想斜面即为干涉条纹的相位非线性误差分布,如图 12 所示。图 12(a)为干涉条纹相位的非线性误差分布的二维图,图 12(b)给出了干涉条纹相位的非线性误差分布的三维图。

计算得到的干涉条纹相位非线性误差峰谷(PV)值为 21.8 nm,可见实际测量得到的干涉条纹相位与设计值之间有一定的误差,主要由于光学元件存在一定的加工与装调误差,光路中存在的表面缺陷及空气中悬浮的灰尘也会对光束产生一定调制。但整体而言,相位非线性误差较大的区域分布在边缘,光束边缘的能量较弱,因此对系统产生的影响有限。扫描和拼接的均化作用减小了曝光刻线误差。目前测量得到的相位非



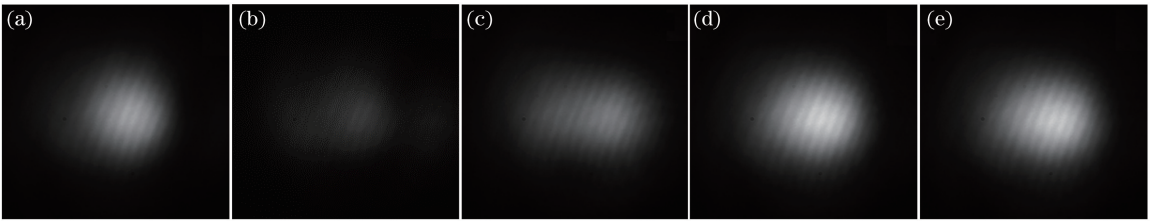


图 11 五步相移干涉图像。(a) 0;(b)  $\pi/2$ ;(c)  $\pi$ ;(d)  $3\pi/2$ ;(e)  $2\pi$

Fig. 11 Interference patterns of five-step phase shifting. (a) 0; (b)  $\pi/2$ ; (c)  $\pi$ ; (d)  $3\pi/2$ ; (e)  $2\pi$

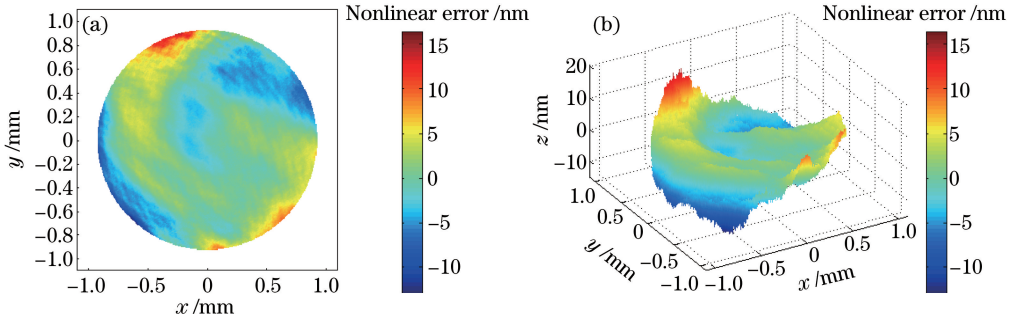


图 12 干涉条纹相位的非线性误差分布。(a)二维图;(b)三维图

Fig. 12 Nonlinear error distributions of interference fringe phase. (a) Two-dimensional figure; (b) three-dimensional figure

线性误差完全满足系统使用要求。

## 5 结 论

针对 SBIL 系统曝光光路,分析了曝光光斑尺寸对条纹非线性误差、刻线误差和曝光对比度的影响。结果表明:存在一定的装调误差时,小尺寸光斑的非线性误差优于大尺寸光斑;由于存在周期测量误差,小尺寸光斑可以降低拼接后的刻线误差,有利于控制光栅鬼线强度、增大扫描拼接后的曝光对比度并改善光栅表面的均匀性。结合系统对测量、调整的要求,计算、设计并优化了系统的光学布局。利用光束质量探测器测量了曝光光束形貌,通过哈里哈兰五步相移法测量了干涉条纹的非线性误差,结果表明:曝光光斑能量较为均匀,左右光斑形貌较为一致,光束的束腰半径为 0.9 mm 左右,干涉条纹的相位非线性误差 PV 值为 21.8 nm,以上结果均满足系统要求,达到了预期设计目的。

## 参 考 文 献

- [1] Montoya J. Toward nano-accuracy in scanning beam interference lithography[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [2] Paul T K. Design and analysis of a scanning beam interference lithography system for patterning gratings with nanometer-level distortions[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [3] Cheng Weilin, Zhu Jing, Zhang Yunbo, *et al.* Status and development of scanning beam interference lithography system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100001.  
程伟林, 朱 菁, 张运波, 等. 扫描干涉场曝光中关键技术的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100001.
- [4] Han Jian. The research on the lithography system optimization and the grating mask profile parameters controlling in the fabrication of the holographic grating[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.  
韩 建. 全息光栅曝光光学系统优化及光栅掩模参数控制方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- [5] Montoya J C, Chang C H, Heilmann R K, *et al.* Doppler writing and linewidth control for scanning beam interference lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2005, 23(6): 2640-2645.
- [6] Li Xiaotian, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.* Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve

- error, location error on plane grating performance[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308009.
- 李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308009.
- [7] Cai Jinda, Wang Ying, Yan Tingmeng, *et al.* Closed-loop control system for diffraction grating ruling machine[J]. Optical and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2417-2423.  
蔡锦达, 王 英, 颜廷萌, 等. 衍射光栅刻划机的闭环控制系统[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2417-2423.
- [8] Song Nan, Feng Shulong, Yu Haili, *et al.* Design and analysis of diamond carrier aerostatic guideway in large diffraction grating ruling engine[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408007.  
宋 楠, 冯树龙, 于海利, 等. 大光栅刻划机气浮刀架导轨设计与分析[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408007.
- [9] Chen G C. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: Fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [10] Jiang Shan, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.* Effect of period setting value on printed phase in scanning beam interference lithography system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0905003.  
姜 珊, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 扫描干涉场曝光系统中周期设定对曝光刻线相位的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905003.
- [11] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.* Laser principle[M]. 6<sup>th</sup> ed. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2009: 70-78.  
周炳琨, 高以智, 陈侗荣, 等. 激光原理[M]. 第6版. 北京: 国防工业出版社, 2009: 70-78.
- [12] Jiang Shan, Bayanheshig, Song Ying, *et al.* Effect of measured interference fringe period error on groove profile of grating masks in scanning beam interference lithography system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0405003.  
姜 珊, 巴音贺希格, 宋 莹, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期测量误差对光栅掩模槽形的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0405003.
- [13] Yu Haili. Research on larger stroke nan-positioning technology and application based on dual-frequency laser interferometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.  
于海利. 基于双频激光干涉测量的大行程纳米定位技术及其应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- [14] Zhu Shaoqi, Zou Haixing, Bao Xingcheng, *et al.* Diffraction grating[M]. Beijing: China Machine Press, 1986: 112.  
祝绍萁, 邹海兴, 包兴诚, 等. 衍射光栅[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 112.
- [15] Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase shifting interferometry: A simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. Applied Optics, 1987, 26: 2504-2506.
- [16] Chen G C. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: Fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [17] Jiang Shan. Study on measurement and adjustment of interference fringes for scanning beam interference lithography system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.  
姜 珊. 扫描干涉场曝光系统干涉条纹测量与调整方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.