扫描干涉场曝光系统中光束对准误差及其控制

王 玮[1,2], 巴音贺希格[1], 潘明忠[1], 宋 莹[1], 李文昊[1]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家光栅制造与应用工程技术研究中心, 吉林 长春 130033;
[2]中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提升扫描干涉场曝光光束对准精度,保证制作的光栅掩模槽形的质量,建立了曝光光束对准误差模型,利用模型对光束对准误差进行了分析。同时为了满足系统对光束重叠精度的要求,设计研制了光束自动对准系统,并对曝光光束进行了对准实验。分析结果表明,当光束存在较大对准误差时,光栅基底表面曝光对比度大幅下降,而且由于采用步进扫描的曝光方式,光刻胶表面出现了各处曝光不均匀的现象,影响光栅掩模槽形的质量。设计的对准系统可以对光束角度与位置进行对准调节,系统整体表现出良好的收敛性能,多步调节后可使光束位置对准精度优于 10 μm,光束角度对准精度优于 9 μrad。这样的曝光光束对准精度可以满足系统要求,达到了预期的设计目的。

关键词 光学设计; 光栅; 扫描干涉场曝光; 光束对准; 曝光对比度; 位置解耦; 角度解耦

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0722003

Beam Alignment Error and Its Control in Scanning Beam Interference Lithography System

Wang Wei[1,2], Bayanheshig[1], Pan Mingzhong[1], Song Ying[1], Li Wenhao[1]

[1] *National Engineering Research Centre for Diffraction Gratings Manufacturing and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;
[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract In order to improve alignment accuracy of exposure beams in the scanning beam interference lithography system and guarantee quality of the fabricated grating mask groove shape, an alignment error model of exposure beams is established and used to analyze the beam alignment error. Meanwhile, to meet the requirement of the system for beam overlapping accuracy, an automatic beam alignment system is designed and fabricated, and alignment experiments are conducted on the exposure beams. Analysis results show that the exposure contrast on the grating substrate surface decreases obviously when the beams have large alignment errors. Under the exposure mode of stepping-scanning, uneven exposure appears at different positions of the photoresist surface, which influencing the quality of grating mask groove shape. The designed alignment system can adjust the beam angles and positions. The system shows good convergence performance as a whole. After multi-step adjustment, the position alignment accuracy of the beams exceeds 10 μm, and the angle alignment accuracy of the beams exceeds 9 μrad. The alignment accuracy of exposure beams satisfies system requirements and the expected purpose is achieved.

Key words optical design; gratings; scanning beam interference lithography; beam alignment; exposure contrast; position decoupling; angle decoupling

OCIS codes 220.3740; 050.2770; 220.4830

1 引 言

20 世纪 90 年代,美国麻省理工学院(MIT)为了克服制作大面积全息光栅时静态干涉场曝光方式在透

收稿日期: 2016-12-14; **收到修改稿日期**: 2017-03-21

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,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**)

镜材料获取和透镜加工方面的困难，提出了一种新的制作全息光栅的技术，即扫描干涉场曝光（SBIL）技术[1-6]。其原理是使两束高斯激光束通过口径不大的光学系统后在束腰处相叠加形成干涉条纹，再通过二维精密工作台以步进扫描的运动方式将该干涉条纹记录于涂有光刻胶的基底上，从而制作大面积的光刻胶光栅掩模。SBIL 技术在一定程度上融合了全息光栅[7]与机械刻划光栅[8-9]的制作特点，可一次性曝光出多条干涉条纹，同时可以将这些干涉条纹进行精确拼接。

传统静态全息光栅制作过程中，激光光束经过扩束后只有中间部分参与曝光，对干涉光束整体的重合程度要求较低，手工调节光束重合程度即能满足要求；而在 SBIL 系统中，毫米级尺寸的曝光光束整体参与曝光，光束重合程度直接影响干涉场中干涉条纹的对比度，人工的调节精度显然难以满足要求，并且 SBIL 技术采用步进扫描的曝光方式，干涉场的不均匀会被以步进扫描的方式放大至光栅基底平面，导致整体光栅掩模表面质量变差。在理论方面，Montoya[2]针对曝光对比度与光栅掩模槽深之间的关系进行了定性分析，结果表明干涉场对比度下降导致光栅掩模质量变差，但是没有建立 SBIL 技术中光束对准误差与曝光对比度之间定量关系的数学模型。关于光束姿态调节的控制技术，在诸多复杂光学系统中均有应用[10-14]，其基本原理是利用诸如位置敏感探测器（PSD）、象限位置探测器等光电传感器测量光束姿态信息，再通过控制器件实时调整光束姿态至预定位置，从而实现光束姿态的实时调整。其中提到的光束姿态实时控制系统一般采用高动态特性的控制元件以及较为复杂的控制算法，但对于 SBIL 曝光光束对准仅需将光束调节至预设目标位置，要求高稳定性与高分辨精度，对于系统实时性需求不高，因此以上系统难以直接应用到 SBIL 系统中的光束对准调节中。鉴于此，本文拟建立一个 SBIL 系统中的光束对准误差对曝光对比度影响的数学模型，分析对准误差对曝光对比度与光栅掩模槽形的影响。同时针对 SBIL 系统设计一套能够自动对准曝光光束的系统，提升系统对准精度与调节效率，以满足系统对于曝光光束对准精度的需求。

2　SBIL 系统对准误差模型与分析

2.1　SBIL 系统对准误差模型

SBIL 系统采用两束高斯光束在束腰位置处干涉，形成干涉条纹，再将其曝光在涂有光刻胶的光栅基底上，如图 1 所示。高斯光束在束腰位置处波前为平面，理想情况下曝光光束在束腰位置处叠加形成干涉场，本文主要讨论两光束重叠程度对制作的光栅掩模的影响，不考虑束腰离焦的影响。

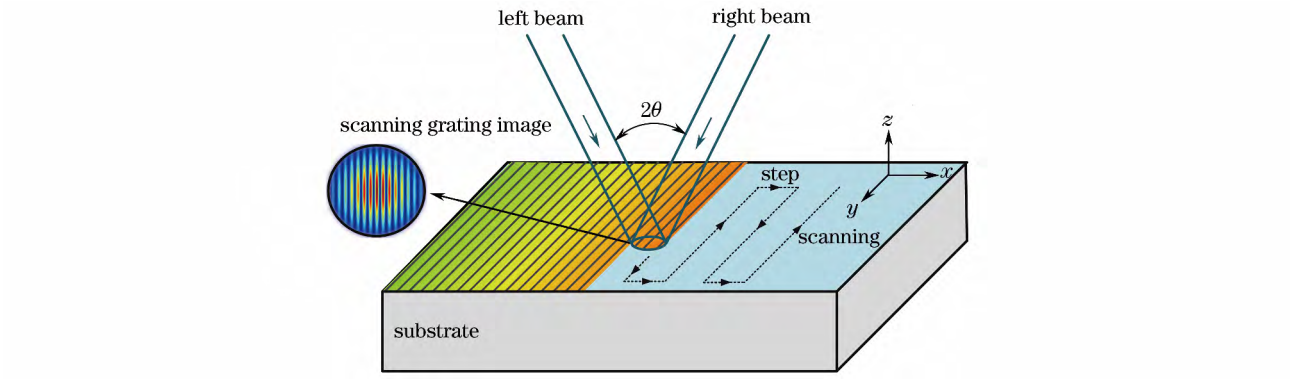


图 1　SBIL 原理图

Fig. 1　Schematic of SBIL

假设基底平面位于 $z=0$ 平面，左右曝光光束能量相当，根据高斯光束传输公式，理想情况下在基底处的光束振幅分布为

$$E_{\mathrm{L}}=A\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right)\exp\left(\mathrm{i}2\pi\frac{\sin\theta}{\lambda}x\right),\tag{1}$$

$$E_{\mathrm{R}}=A\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2}\right)\exp\left(-\mathrm{i}2\pi\frac{\sin\theta}{\lambda}x\right),\tag{2}$$

式中 ω 为束腰半径，λ 为波长，θ 为两光束夹角的一半，A 为归一化常量。

然而在实际工作过程中，两束曝光光束不可能完全重合至理想位置，之间存在一定的对准误差。假设右侧曝光光束相对于左侧光束目标位置存在大小为 δ 的对准误差，可得此时基底上右侧光束振幅为

$$E_{\mathrm{R}}=A\exp\left[-\frac{(x-\delta)^2+y^2}{\omega^2}\right]\exp\left[\mathrm{i}2\pi\frac{\sin\theta}{\lambda}(x-\delta)\right]。\tag{3}$$

两束光相干叠加后的光强分布为

$$I(x,y)=I_{\mathrm{L}}(x,y)+I_{\mathrm{R}}(x,y)+2\sqrt{I_{\mathrm{L}}(x,y)I_{\mathrm{R}}(x,y)}\cos\left(\frac{2\pi}{p}x+\varphi_1\right),\tag{4}$$

式中 $p=\lambda/(2\sin\theta)$ 为两光束相干形成的干涉场条纹周期，$I_{\mathrm{L}}=A^2\exp[-2(x^2+y^2)/\omega^2]$，$I_{\mathrm{R}}=A^2\exp\{-2[(x-\delta)^2+y^2]/\omega^2\}$，$\varphi_1$ 为初始相位，SBIL 技术中可以利用相位锁定的方式精确控制干涉场相位[5]，因此可不考虑对准误差引入的相位移动。

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 轴运动进行扫描曝光，可得每次扫描的曝光量为

$$D_1(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}I(x,y)\mathrm{d}t=\frac{1}{v}\int_{-\infty}^{+\infty}I(x,y)\mathrm{d}y。\tag{5}$$

将(4)式代入(5)式可得

$$D_1(x)=D_{\mathrm{L}1}(x)+D_{\mathrm{R}1}(x)+2\sqrt{D_{\mathrm{L}1}D_{\mathrm{R}1}}\cos\left(\frac{2\pi}{p}x+\varphi_1\right),\tag{6}$$

式中 $D_{\mathrm{L}1}(x)=A\frac{\omega}{v}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\exp\left(-2\frac{x^2}{\omega^2}\right)$，$D_{\mathrm{R}1}(x)=A\frac{\omega}{v}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\exp\left[-2\frac{(x-\delta)^2}{\omega^2}\right]$。

由(6)式可得单次扫描的曝光对比度为

$$\Gamma_1(x)=\frac{2\sqrt{D_{\mathrm{L}1}(x)D_{\mathrm{R}1}(x)}}{D_{\mathrm{L}1}(x)+D_{\mathrm{R}1}(x)}。\tag{7}$$

从(7)式可以看出，当 $D_{\mathrm{L}1}$ 与 $D_{\mathrm{R}1}$ 相同时，扫描曝光的对比度为 1。对准误差的存在导致 $D_{\mathrm{L}1}$ 与 $D_{\mathrm{R}1}$ 之间存在差异，对比度下降。

SBIL 技术采用步进拼接的方式将曝光区域扩大，假设相邻扫描间的步进间隔为 s，则第 n 次扫描时的曝光量为

$$D_n(x)=D_{\mathrm{L}n}(x)+D_{\mathrm{R}n}(x)+2\sqrt{D_{\mathrm{R}n}(x)D_{\mathrm{L}n}(x)}\cos\left(\frac{2\pi}{p}x+\varphi_1\right),\tag{8}$$

式中 $D_{\mathrm{L}n}(x)=A\frac{\omega}{v}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\exp\left\{-2\frac{[x-(n-1)s]^2}{\omega^2}\right\}$，$D_{\mathrm{R}n}(x)=A\frac{\omega}{v}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\exp\left\{-2\frac{[x-\delta-(n-1)s]^2}{\omega^2}\right\}$。

系统经过 N 次步进扫描后，光栅基底上的总曝光量为 N 个单次扫描曝光量的总和，表示为

$$D(x)=\sum_{n=1}^{N}D_n(x)=\sum_{n=1}^{N}D_{\mathrm{L}n}(x)+\sum_{n=1}^{N}D_{\mathrm{R}n}(x)+2\sum_{n=1}^{N}\sqrt{D_{\mathrm{R}n}(x)D_{\mathrm{L}n}(x)}\cos\left(\frac{2\pi}{p}x+\varphi_1\right),\tag{9}$$

式中 $D(x)$ 表示系统经过 N 次扫描后光栅基底上的曝光量，$\sum_{n=1}^{N}D_{\mathrm{L}n}(x)+\sum_{n=1}^{N}D_{\mathrm{R}n}(x)$ 表示光刻胶平均曝光量。由于 $D_{\mathrm{L}n}$ 与 $D_{\mathrm{R}n}$ 的变化频率远小于干涉条纹频率，垂直刻线方向(步进方向)的曝光量对比度公式为

$$\Gamma(x)=\frac{2\sum_{n=1}^{N}\sqrt{D_{\mathrm{R}n}(x)D_{\mathrm{L}n}(x)}}{\sum_{n=1}^{N}D_{\mathrm{L}n}(x)+\sum_{n=1}^{N}D_{\mathrm{R}n}(x)}。\tag{10}$$

2.2　SBIL 系统曝光对准误差对曝光对比度的影响

根据以上模型，模拟分析 SBIL 系统中对准误差对光刻胶曝光量对比度的影响。首先根据(7)式模拟单次扫描曝光时对准误差对曝光对比度的影响。假设曝光光束采用束腰半径 $\omega=1$ mm 的相干高斯光束，对准误差 δ 为 10，100，500 μm，此时单次扫描时的曝光对比度如图 2(a)所示。为了更加直观地体现对准误差

对曝光量的影响，图 2(b)模拟了对准误差为 500 μm 时单次扫描的曝光量，其中光栅周期 p 取10 line/mm（实际中光栅线密度远高于此值，此处为了直观显示干涉条纹的曝光量，设定为此值）。

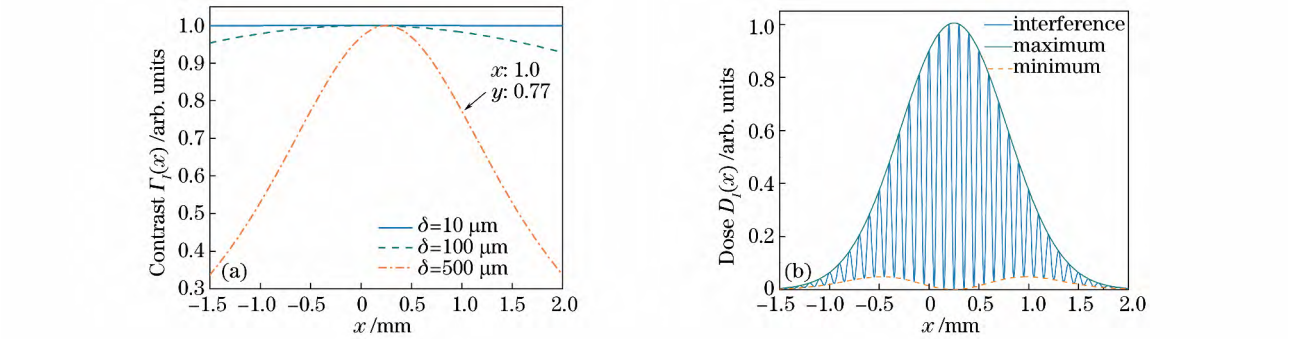


图 2　对准误差对单次扫描曝光对比度的影响。(a)对比度；(b)曝光量

Fig. 2　Effect of alignment error on contrast of individual scanning exposure. (a) Contrast; (b) dose

图 2(a)中横坐标为干涉场径向分布，纵坐标为单次扫描曝光的对比度；图 2(b)中横坐标为干涉场径向分布，纵坐标为单次扫描曝光的曝光量，单位为归一化相对强度。从图 2(a)中可以看出，当对准误差较小时，单次扫描曝光的对比度接近理想值 1；当对准误差加大时，单次扫描的曝光对比度下降，尤其是边缘处的对比度下降十分明显。例如，对准误差为 500 μm 时，在 1 mm 位置处，干涉场曝光量下降至 0.77。相对应地，在图 2(b)中，由于对准误差的存在，干涉条纹中暗条纹光强值明显不为 0，而是出现了一定背景光，如图中黄色虚线所示，这导致了曝光对比度的降低。

SBIL 系统采用步进扫描的方式进行曝光，为了直观地体现重叠扫描过程，图 3 给出了扫描叠加曝光的示意图。图 3(a)为干涉场步进扫描曝光示意图，图 3(b)为干涉场曝光叠加的示意图。

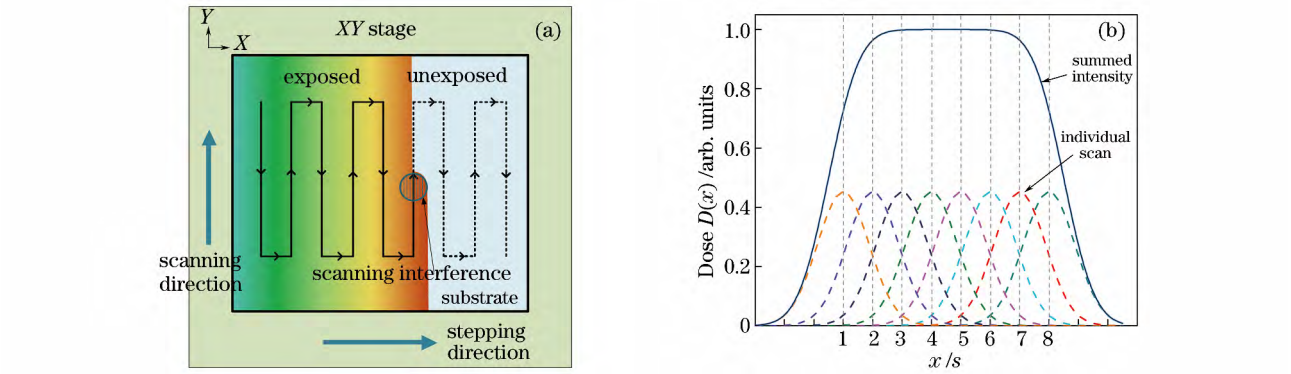


图 3　扫描曝光过程示意图。(a)步进扫描曝光；(b)曝光光束叠加

Fig. 3　Schematic of scanning exposure process. (a) Step-scanning exposure; (b) exposure beam overlapping

图 3(b)横坐标为光栅基底空间坐标 x 与步进间隔 s 之间的比值，即表示步进次数，纵坐标为光栅基底上的曝光量。图中虚线为单次扫描的曝光量，实线为多次扫描叠加的曝光量。从图中可以看出，单次扫描的干涉场能量为高斯分布，拼接叠加后的曝光量为平滑均匀的分布。

基于模型，根据(10)式模拟对准误差 δ 为 10，100，500 μm 时，步进 20 步后总扫描曝光对比度的空间分布，如图 4 所示。

图 4 中横坐标为步进次数，纵坐标为光栅基底表面总曝光对比度 Γ。从图 4 可以看出，当对准误差较小，如 $\delta=10$ μm 时，光栅基底表面各处曝光对比度较为均匀，且接近理想情况下的曝光对比度。当对准误差加大，如 $\delta=500$ μm 时，光栅基底表面曝光对比度出现大幅度下降，同时光刻胶表面整体的曝光量均匀下降，伴随着干涉场的步进运动，各处曝光对比度出现了波纹，说明单次扫描曝光对比度的下降被以步进扫描的方式放大至整个光栅基底表面。边缘附近的对比度凸起是由于第一次或者最后一次曝光时，相比于中间部分少叠加了前一次或者后一次的曝光，由于缺少一次存在背景光的扫描，此处对比度有一定程度的提升，但此处的曝光量低于中间部分。通常在制作光栅时，会将第一次和最后一次的扫描置于光栅基底外部，以保

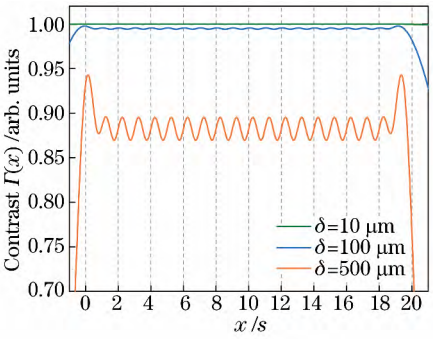


图 4　不同光束对准误差下曝光对比度的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of exposure contrast with different beam alignment errors

证光栅基底上曝光量的均匀性。总体而言，对准误差会导致光刻胶上的曝光对比度下降以及不均匀，造成整体光栅质量的下降。

2.3　曝光对比度对光栅掩模槽形的影响

根据光刻胶的感光与显影特性可知，制作出的光栅掩模质量与光刻胶曝光量有直接联系。为此，分析了曝光量对比度变化对制作出的光栅掩模槽形的影响。根据光栅掩模显影成型机理[15-16]，光栅基底上的光刻胶感光分子会由于曝光量的变化而使激发分子的浓度发生变化。通常为了保证显影后基底上的光刻胶露底，曝光须大于一定的曝光量 D_C，即截止曝光量，一般可以通过改变显影时间改变截止曝光量的大小。对于一定厚度的光刻胶，在一定显影时间内，光刻胶的溶解速率与曝光量成正比，曝光量越大溶解速率越快，通过显影液对曝光量不同的光刻胶进行刻蚀，最终形成浮雕状光栅结构。由上节分析可知，曝光光束对准误差的下降会引起光刻胶上对比度的下降，还会引起对比度在空间上的变化，下面就不同曝光对比度对光栅掩模槽形的影响进行讨论。

假设光栅基底上的初始胶厚为 500 nm，平均曝光量为 $0.6D_C$，模拟不同对比度对应的槽形，如图 5 所示。

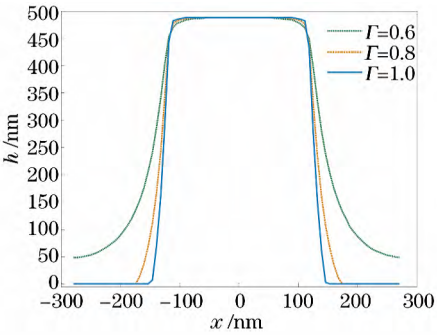


图 5　不同曝光对比度对应的槽形

Fig. 5　Groove profiles corresponding to different exposure contrasts

图 5 中横坐标为刻槽空间分布，纵坐标为刻槽深度 h。从图中可以看出，由于曝光对比度的不同，对应的槽型质量也不相同。曝光对比度较大时，光刻胶上亮条纹处曝光量较为充足，暗条纹处背景光较少，这样被移除的光刻胶与保留的光刻胶较为均匀，制作出的光栅掩模槽深较深，占空比较大，侧壁较为陡直，如图中蓝色实线所示。当基底上曝光对比度较小时，光刻胶上亮条纹处曝光量不足，暗条纹处存在背景光，对应的光栅基底上被移除的光刻胶不均匀，制作出的光栅掩模槽深较浅，占空比较小，侧壁倾角较缓，光栅的制作效率变差，如图中绿色曲虚线所示。

从以上分析可以看出，光路中存在的对准误差引起光刻胶上曝光对比度的下降与不均匀，导致制作出的光栅掩模槽形变浅且一致性变差，最终可能影响光栅效率与光栅杂散光水平。在传统全息光栅制作过程中，光束对准通常通过眼睛判断，人眼对于光束重叠精度的判断误差为百微米左右。根据以上分析，这样的精度水平难以达到扫描干涉场制作光栅的要求。鉴于此，有必要设计一套精度更高的曝光光束对准系统，以保证 SBIL 技术对光束重叠精度的要求。

3　光束自动对准系统设计

3.1　光束自动对准系统简介

基于以上模拟与分析，结合 SBIL 光路特点，设计了一套光束自动对准系统，如图 6 所示。该系统主要包括激光光源、二维微动电机、反射镜、分束棱镜(BS)、透镜与二维 PSD。激光经过分束光栅后分为左右两束曝光光束，每侧曝光光束先经过一个声光调制器(AOM)，出射的+1 级衍射光先后经过两个二维微动电机驱动的反射镜折反至光栅基底表面，形成干涉场。光束对准时，在干涉场位置处放置一个分束棱镜，首先通过 AOM 调整左侧光束打开，右侧光束关闭，使左侧光束由分束棱镜反射进入测量光路中，作为右侧光束对准基准。再通过 AOM 切换至左侧光束关闭，右侧光束打开，使右侧光束由分束棱镜透射进入测量光路中，从而进行对准调节。进入测量光路中的光束再被分束棱镜分为两路，一路光经过角度解耦透镜成像在位于焦平面的角度解耦 PSD 上，对光束角度信息进行解耦；另一路光经过位置解耦透镜成像在位置解耦透镜上，对物平面上的位置信息进行解耦。

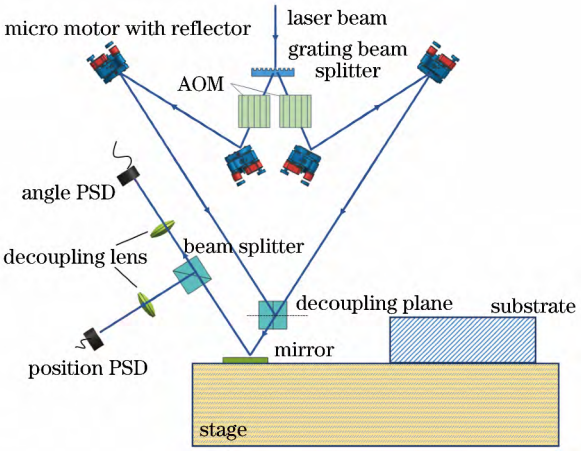


图 6　SBIL 技术中光束对准系统原理图

Fig. 6　Schematic of beam alignment system in SBIL technique

3.2　对准系统测量原理与设计

光束对准系统中，光束位置与角度信息通过解耦透镜与 PSD 组合测量得到，利用一个 PSD 探测光束在解耦平面上的位置波动，同时利用另一角度 PSD 测量光束在解耦平面上的角度变化(光束在垂直于光轴的任意平面上的角度变化均相同)。定义 PSD 关于位置解耦透镜的共轭平面为解耦平面，此平面上光束位置与角度的波动信息与 PSD 测量信息互为共轭，这样即可对光束位置与角度信息进行监测。在系统设计搭建中，使解耦平面的设计位置与干涉场平面重合，以保证干涉场的测量与控制精度。位置与角度解耦测量原理如图 7 所示。

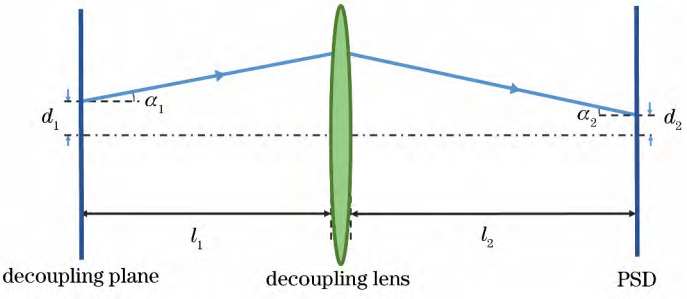


图 7　光束位置与角度解耦原理图

Fig. 7　Principle diagram of beam position and angle decoupling

如图 7 所示，光束传播通过透镜后，由光束传播的 $ABCD$ 矩阵，有

$$\begin{bmatrix} d_2 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ \alpha_1 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

可得

$$\begin{cases} d_2 = \alpha_1[l_2 - l_1(l_2/f - 1)] + d_1(1 - l_2/f) \\ \alpha_2 = \alpha_1(1 - l_1/f) - d_1/f \end{cases}。 \tag{12}$$

(12)式为探测平面(PSD 平面)与解耦平面上光束位置与角度的对应关系式，当调节 PSD 位于透镜焦平面时，即 $l_2 = f$，此时公式退化为 $\alpha_1 = d_2/l_2$，即为对光束角度进行测量解耦；当解耦平面与 PSD 满足共轭关系式 $1/l_1 + 1/l_2 = 1/f$ 时，公式表示为 $d_1 = d_2(1 - l_2/f)$，即为对光束位置信息进行测量。

PSD 选用 Newport 公司 OBP-U-9L 型探测器，角度解耦透镜焦距为 500 mm，角度 PSD 位于其后焦面上；位置解耦透镜焦距为 400 mm，PSD 距离透镜 550 mm。采用的模数转换器分辨率为 16 bit，输入范围为 ±10 V，即分辨率为 0.305 mV，其信号转换关系为 2.5 mV 对应 1 μm，相应的 PSD 位置分辨率为 0.122 μm。根据(12)式可以计算得到系统角度测量分辨率为 0.244 μrad，位置测量分辨率为 0.325 μm。

3.3　光束自动对准系统设计及调整原理

光束自动对准系统执行元件选用 Newfocus 公司的二维微动电机 Picomotor8816，其角度分辨率为 0.7 μrad。控制软件基于 LabVIEW 语言编写，将角度 PSD、位置 PSD、微动电机的硬件输入输出功能封装成硬件系统服务器，通过预先定义的共享变量库进行数据交换。主控计算机中的自动对准程序通过 USB 接口获取位置 PSD、角度 PSD 信息，经控制算法处理后，通过网络接口控制微动电机对光路进行调整。图 8 为光束自动对准控制器的原理框图。

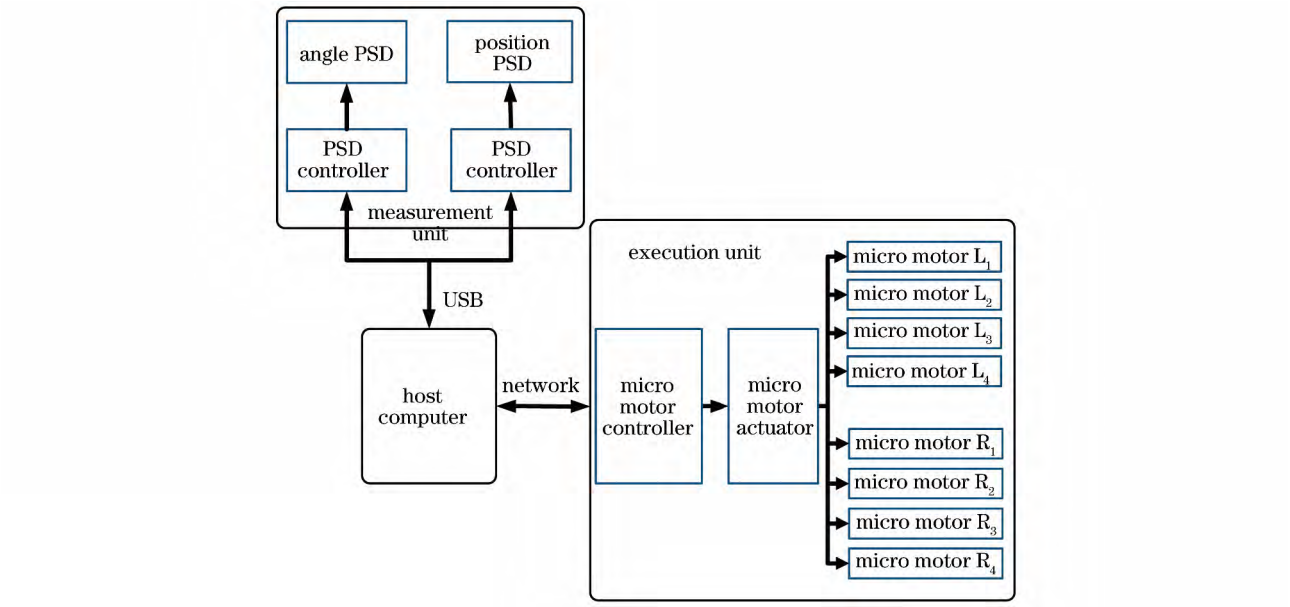


图 8　光束自动对准控制器原理框图

Fig. 8　Principle block diagram of beam auto-alignment controller

图 9 是光束自动对准系统控制流程图，控制流程是：1)进行硬件系统初始化，包括 PSD 参数设置、PSD 初始化、微动电机设置、微动电机初始化等；2)打开左侧曝光光束，获取左侧光束位置信息与角度信息，设定为目标点，输入调整参数(位置调整阈值、角度调整阈值、迭代次数等)；3)打开右侧曝光光束，准备开始进行对准调节；4)测量此时光束位置信息，计算与目标位置的偏差，并进行数据存储；5)调节位置微动电机，对光束位置进行调节；6)测量此时光束角度信息，计算与目标角度的偏差，并进行数据存储；7)调节角度微动电机，对光束角度进行调节；8)判断当前光束位置与角度是否在可接受范围内，当可接受时，则跳出控制程序，不可接受时，则跳至步骤 4)进行再次对准。步骤 4)～8)组成了光束自动对准系统稳定的迭代闭环控制。

4　实验结果与分析

根据以上分析与设计，在 SBIL 光路中研制了光束自动对准系统，如图 10 所示。为了保证微动电机运行在合理工作范围中，设置其调整比例为 0.1。图 11 为一个对准周期中光束角度与位置的对准过程，图 11

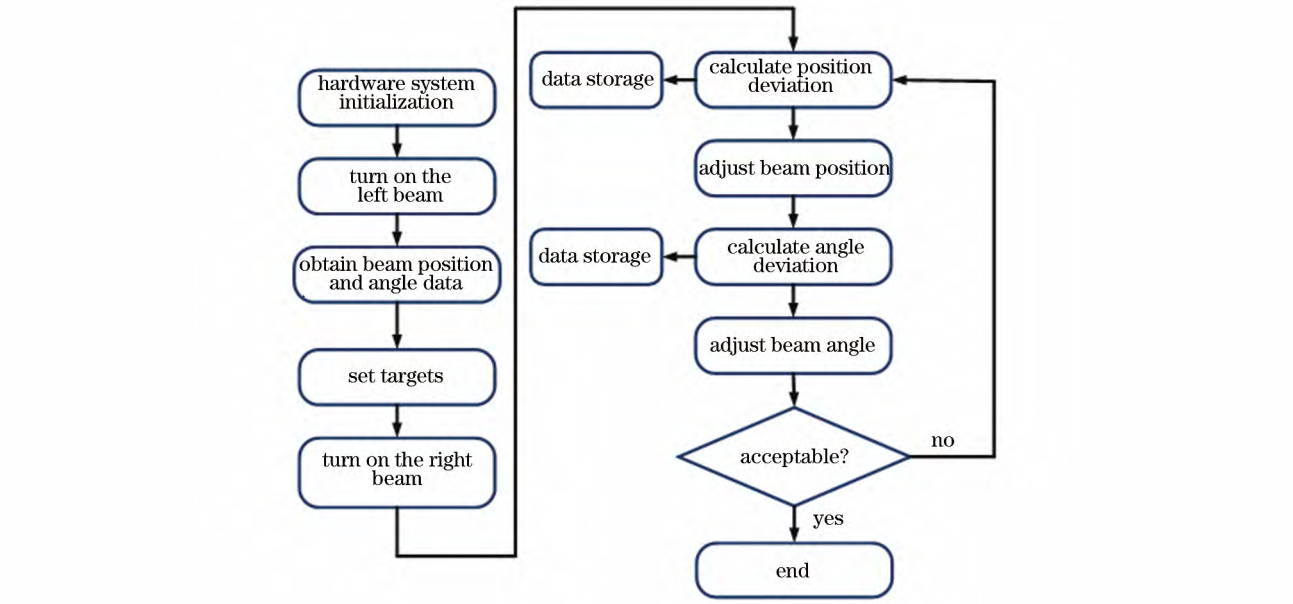


图 9　光束自动对准系统控制流程图

Fig. 9　Controlling flow chart of beam alignment system

(a)表示 x 轴方向对准过程，图(b)表示 y 轴方向对准过程，图中蓝色曲线表示光束位置调节，对应图中左侧坐标，图中绿色曲线表示光束角度调节，对应图中右侧坐标。从图 11 可以看出，光束角度与位置在一定调节步数后逐渐收敛到目标位置，表明对准系统具有良好的调节能力。

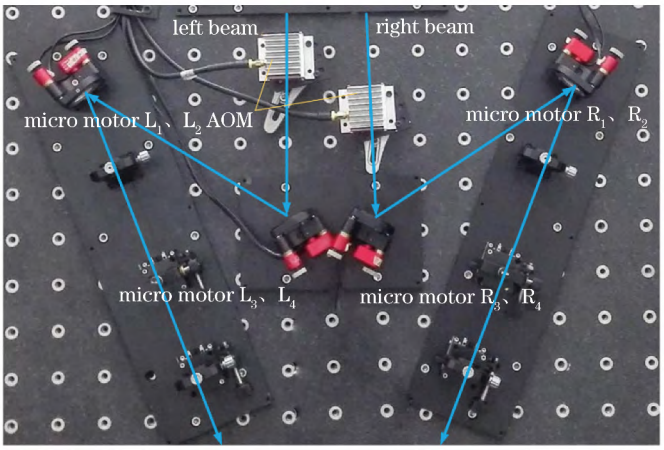


图 10　光束自动对准系统实物图

Fig. 10　Photograph of beam auto-alignment system

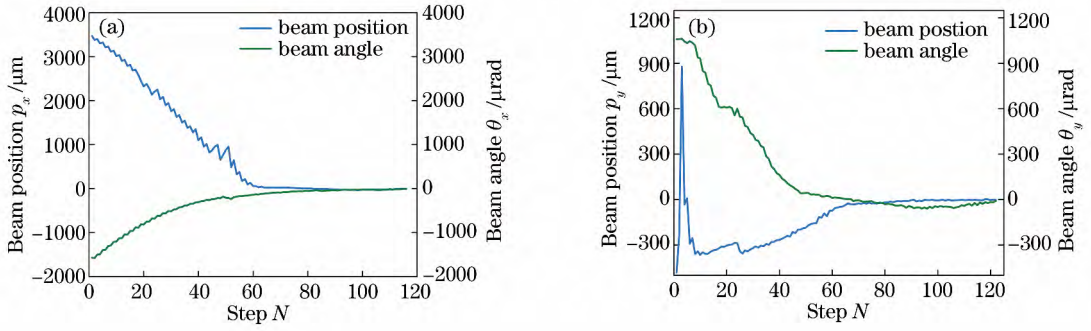


图 11　光束自动对准结果。(a) x 轴方向光束调整情况；(b) y 轴方向光束调整情况

Fig. 11　Result of beam alignment. (a) Beam adjustment in x direction; (b) beam adjustment in y direction

图 12 为 40 次光束对准结果，将 40 组对准实验结果进行处理，得出 40 组对准数据的最大值与标准差，如表 1 所示。图 12(a)为光束位置调节结果，图 12(b)为光束角度调节结果，横坐标对应相应的 x 轴方向，纵坐标对应相应的 y 轴方向。图中绿色虚线代表 40 次调整结果中的最大值，红色虚线代表 40 次调整结果的标准差。

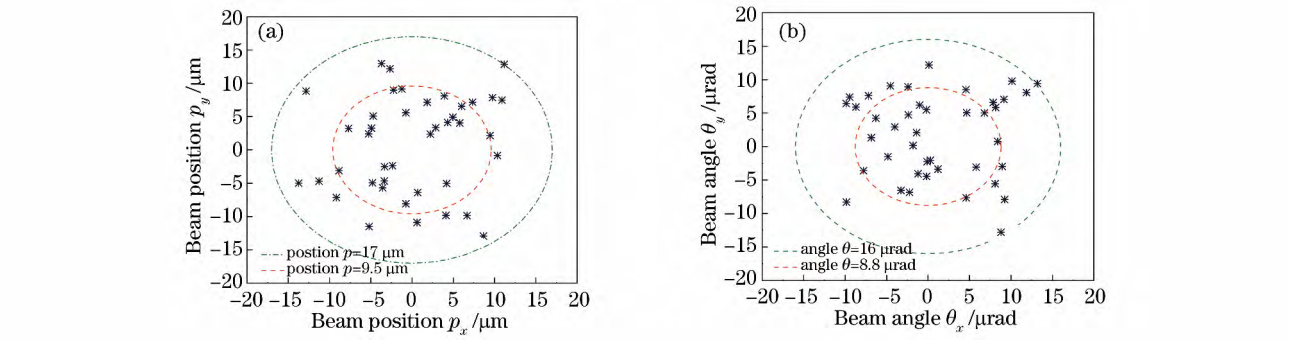


图 12　40 次光束自动对准结果。(a)光束位置调整情况；(b)光束角度调整情况

Fig. 12　Result of beam alignment for 40 times. (a) Beam position adjustment; (b) beam angle adjustment

表 1　40 次光束位置与角度对准结果

Table 1　Results of beam position and angle alignments for 40 times

Parameter	Maximum	Standard deviation
Beam position p_x /μm	−13.73	6.53
Beam position p_y /μm	12.97	6.95
Beam position p /μm	17.03	9.53
Beam angle θ_x /μrad	10.13	6.54
Beam angle θ_y /μrad	12.18	5.90
Beam angle θ /μrad	16.17	8.81

从以上实验结果可以看出，所设计的自动对准系统可以对光束角度与位置进行对准调节，系统整体表现出良好的收敛性能。多步调节后可以达到光束位置对准精度优于 10 μm，光束角度对准精度优于 9 μrad。这样的对准结果可以满足曝光对比度与刻槽成形对于曝光光束重叠精度的要求，达到了预期的设计目的。

5　结　　论

针对 SBIL 系统，建立了曝光光束对准误差模型，分析了对准误差、曝光对比度与光栅掩模槽形之间的关系，同时设计研制了一套光束自动对准系统，并进行了对准实验。光束存在较大对准误差时，光栅基底表面曝光对比度下降，导致基底上被移除的光刻胶不足，使制作的光栅掩模槽深变浅，占空比减小；同时由于采用步进扫描的曝光方式，光刻胶表面出现各处曝光不均匀的情况，导致光栅表面均匀性变差。所设计的对准系统可以对光束角度与位置进行有效的对准调节，系统收敛性能良好，多步调节后可以达到光束位置对准精度优于 10 μm，光束角度对准精度优于 9 μrad，对准结果可以满足曝光对比度与光栅掩模刻槽对曝光光束对准精度的要求，达到了预期的设计目的。

参　考　文　献

[1] Konkola P T. Design and analysis of a scanning beam interference lithography system for patterning gratings with nanometer-level distortions[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

[2] Montoya J. Toward nano-accuracy in scanning beam interference lithography[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.

[3] Chen C G. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

[4] 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.

[5] Song Ying, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al*. Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 318-324.
宋 莹，巴音贺希格，齐向东，等. 移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统的设计[J]. 光学 精密工程，2014，22(2)：318-324.

[6] 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.

[7] Han Jian. The research on the lithography system optimization and the grating mask profile parameters controlling in the fabrication of the holographic grating[D]. Beijing: Graduate University of 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]. 北京：中国科学院研究生院，2012.

[8] Li Xiaotian, Qi Xiangdong, Yu Haili, *et al*. Yaw angel correction of grating line based on single piezoelectric actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2039-2046.
李晓天，齐向东，于海利，等. 基于单压电执行器的光栅刻线摆角修正[J]. 光学 精密工程，2014，22(8)：2039-2046.

[9] Yang Chao, Yu Haili, Feng Shulong, *et al*. Influence of running accuracy of ruling carriage system on grating spectrum performance[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2674-2682.
杨 超，于海利，冯树龙，等. 光栅刻划刀架系统的运行精度对光栅光谱性能的影响[J]. 光学 精密工程，2014，22(10)：2674-2682.

[10] Konkola P T, Chen C G, Heilmann R K, *et al*. Beam steering system and spatial filtering applied to interference lithography[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2000, 18(6): 3282-3286.

[11] Bao Jianfei, Huang Lihua, Zeng Aijun, *et al*. Study on beam stabilization technique in lithography illumination system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0908004.
鲍建飞，黄立华，曾爱军，等. 光刻机照明系统中光束稳定技术研究[J]. 中国激光，2012，39(9)：0908004.

[12] Li Yao, Wang Ding, Guo Xiaoyang, *et al*. Fast and accurate laser beam automatic alignment system based on COMS sensor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0916002.
李 耀，王 丁，郭晓杨，等. 基于CMOS传感器的高速高精度激光光束自动准直系统[J]. 中国激光，2013，40(9)：0916002.

[13] Li Hong, Wang Dongfang, Zou Wei, *et al*. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002003.
李 红，王东方，邹 伟，等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光，2013，40(10)：1002003.

[14] Wei Pengfei, Liu Jun, Li Xiaofang, *et al*. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1590-1595.
尉鹏飞，刘 军，李晓芳，等. 激光光束实时监测与自动准直系统设计[J]. 光学学报，2008，28(8)：1590-1595.

[15] Li L F. Application of diffraction theory to analysis and fabrication of waveguide gratings[D]. Tucson: The University of Arizona, 1988.

[16] 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.