

# 扫描干涉场曝光光束自动对准及其收敛性分析

王 玮<sup>1,2</sup> 巴音贺希格<sup>1</sup> 宋 莹<sup>1</sup> 姜 珊<sup>1</sup> 潘明忠<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国家光栅制造与应用工程技术研究中心, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学大珩学院, 北京 100049

**摘要** 光束自动对准技术是扫描干涉场曝光系统中的关键技术之一, 两曝光光束位置与角度的重合程度直接影响所制作光栅掩模的槽型质量。针对光束对准过程中光束调整的两个运动维度之间存在相互耦合的情况, 推导了存在耦合时对准算法的收敛条件, 并分析了光路中反射镜与解耦平面之间存在的装调误差对准性能的影响。分析得出, 装调误差降低了光束对准系统性能, 甚至导致对准算法发散, 通过调节光路中反射镜  $M_2$  和解耦平面的距离  $L_2$  与反射镜  $M_1$  和解耦平面的距离  $L_1$  的比值  $L_2/L_1$  可以优化系统的收敛性能。实验结果表明, 当  $L_2/L_1$  较大时对准系统调节性能较差, 收敛速率较低; 当  $L_2/L_1$  较小时光束对准系统可以快速地收敛到目标位置, 有效地对光束进行对准调节。推导证明与模拟分析可为光束对准系统以及整个曝光光路的设计提供理论指导。

**关键词** 光栅; 扫描干涉场曝光系统; 光束对准; 收敛性能; 装调误差

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1205001

## Beam Alignment and Convergence Analysis of Scanning Beam Interference Lithography Systems

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

<sup>1</sup>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

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

**Abstract** Beam alignment is one of the key techniques in the scanning beam interference lithography system. The coincidence degree between the position and the angle of two exposure beams directly affects the groove quality of the produced grating mask. In view of the mutual coupling between the two dimensions of motion in beam adjustment, the convergence condition of the alignment algorithm is derived, and the influence of assembly error between the reflector and the decoupling plane on the alignment performance is analyzed. The analysis shows that due to the presence of assembly error, the performance of the beam alignment system declines, and even leads to the divergence of the alignment algorithm. The convergence of the system can be optimized by adjusting the ratio  $L_2/L_1$ , where  $L_1$  is the distance between mirror  $M_1$  and decoupling plane, and  $L_2$  is the distance between mirror  $M_2$  and decoupling plane. The experimental results show that when  $L_2/L_1$  is large, performance of the alignment system is poor and the convergence is slow. When  $L_2/L_1$  is relatively small, the beam alignment system can quickly converge to the target position, and the alignment of the beam is effective. The deduction and simulation analysis can provide theoretical guidance for the design of beam alignment systems and whole exposure light paths.

**Key words** gratings; scanning beam interference lithography system; beam alignment; convergence performance; assembly error

**OCIS codes** 050.2770; 220.3740; 220.4830

收稿日期: 2016-08-16; 收到修改稿日期: 2016-09-08

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, 博士生导师, 主要从事光栅理论、光栅制作技术以及光谱技术方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com(通信联系人)

# 1 引 言

20 世纪 90 年代,美国麻省理工学院为了避开采用静态干涉场曝光方式制作大面积全息光栅时在透镜材料获取和透镜加工方面的困难,提出了一种制作全息光栅的新方法,即扫描干涉场曝光(SBIL)技术<sup>[1-5]</sup>。该技术的原理是使两束高斯激光束通过小口径的光学系统后在束腰处叠加形成干涉条纹,再通过二维精密工作台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,从而制作大面积的光刻胶光栅掩模<sup>[6-8]</sup>。SBIL 技术在一定程度上融合了全息光栅与机械刻划光栅的制作特点,在一次性曝光出多条干涉条纹的同时可对这些干涉条纹进行精确拼接。

为确保制作光栅掩模的质量,SBIL 技术需要对左右两束曝光光束精确对准。Montoya<sup>[1]</sup>对扫描干涉场曝光光束重合程度与干涉场对比度之间的关系进行了分析,模拟了对比度与光栅掩模槽深之间相互影响的定量关系,结果表明干涉场对比度下降会造成光栅掩模变浅,光栅质量变差。Chen 等<sup>[9]</sup>针对 SBIL 技术对光束位置与角度的对准要求,构建了一种光束自动对准系统,利用位置敏感探测器(PSD)实现光束位置和角度的测量,然后通过迭代对准的方法控制微动电机镜架驱动反射镜以调整光束位置与角度姿态,最终实现曝光光束对准的目的。Chen 等<sup>[9]</sup>假设光束调整的两个运动维度之间相互独立,证明了所采用迭代对准算法的收敛性。然而,在实际光束对准过程中,光束调整的两个维度并不完全独立,彼此存在相互耦合,而且控制光束姿态的反射镜与解耦平面之间还存在装调误差,这些因素为对准系统的收敛性带来较大影响。鉴于此,本文拟建立一个考虑耦合存在时光束迭代对准算法的数学模型,给出迭代对准算法的收敛条件,并分析光路中反射镜与解耦平面之间存在的装调误差对系统收敛性能、收敛速度的影响,给出存在装调误差时保证对准系统收敛性能的方法,旨在为整个曝光光路的设计提供理论指导。

# 2 光束自动对准系统原理

图 1 所示为 SBIL 技术中的光束自动对准系统,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)、透镜与二维位置敏感探测器。激光经过分束光栅分束后分为左右两束曝光光束,每束曝光光束通过两个二维微动电机驱动的反光镜折反至光栅基底表面并相互叠加形成干涉场。光束对准时,在干涉场位置处放置一个分束棱镜,将左右两曝光光束先后反射至测量光路中。进入测量光路中的光束再次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。

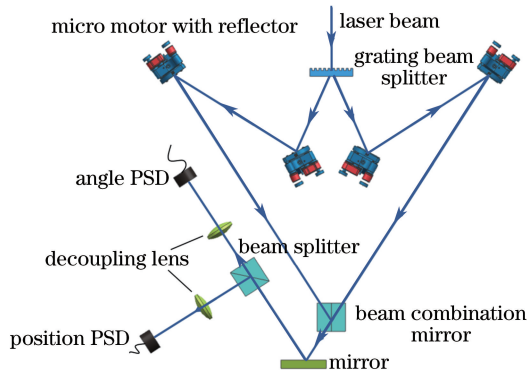


图 1 SBIL 技术中光束自动对准系统原理图

Fig. 1 Diagram of beam automatic alignment system in SBIL

光束对准系统中,光束位置与角度信息通过解耦透镜与位置敏感探测器组合测量得到,利用一个位置 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),位置与角度解耦测量原理如图 2 所示。

如图 2 所示,当光束传播通过透镜后,由光束传播的 ABCD 矩阵,有

$$\begin{pmatrix} d_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

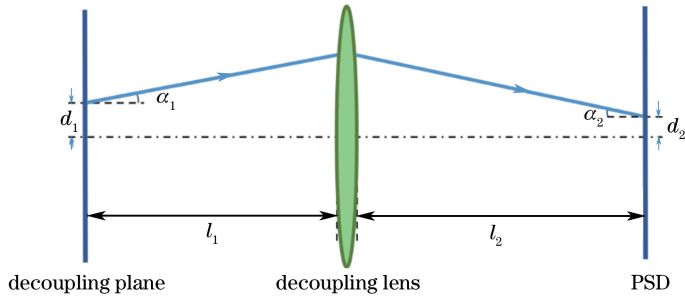


图 2 光束位置与角度解耦原理图

Fig. 2 Principle of beam position and angle decoupling

可得

$$\begin{cases} d_2 = \alpha_1 [l_2 - l_1(l_2/f - 1)] + d_1(1 - l_2/f) \\ \alpha_2 = \alpha_1(1 - l_1/f) - d_1/f \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\alpha_1$ 、 $d_1$  为入射光束的角度与位置， $\alpha_2$ 、 $d_2$  为出射光束的角度与位置。(2) 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。当调节 PSD 位于透镜焦平面上时，即  $l_2 = f$ ，(2) 式退化为  $\alpha_1 = d_2/l_2$ ，即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，(2) 式表示为  $d_2 = d_1(1 - l_2/f)$ ，即对光束位置信息进行测量。根据以上分析可以看出，PSD 测量到的位置信息与解耦平面上光束的角度与位置信息互为共轭，这样即可对光束位置与角度信息进行实时监测。

### 3 光束自动对准算法收敛性分析

SBIL 技术中光束对准采用将一路光束固定、对准另一路光束与已固定光束的策略，为此可以将光束对准光路简化，如图 3 所示。光束姿态调整采用两个二维微动电机驱动反射镜对光束角度及位置进行控制，解耦平面距离反射镜  $M_1$  与  $M_2$  之间的距离分别为  $L_1$  和  $L_2$ ，其中  $L_1 = L_2 + \Delta L$ 。光束对准调整采用迭代调整方法，其原理如下：对于反射镜  $M_1$  与  $M_2$  调整相同的角度，在解耦平面上光束角度产生相同的变化量，但反射镜  $M_1$  对解耦平面上光束位置的调整变化作用较反射镜  $M_2$  大。光束对准调整时，先采用  $M_1$  调整光束位置，再利用  $M_2$  补偿光路角度偏移，交替利用  $M_1$  与  $M_2$  调整光路姿态，最终使光束控制到理想范围内。

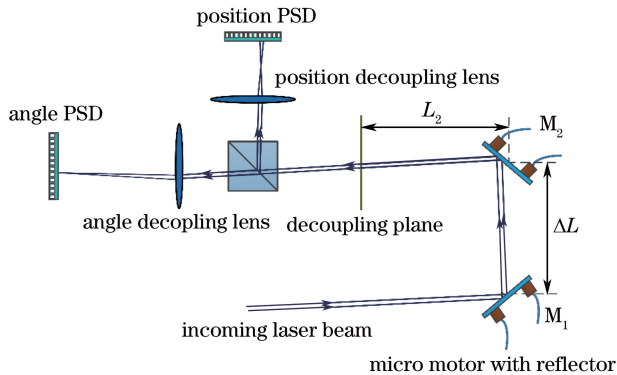


图 3 光束对准光路示意图

Fig. 3 Schematic of beam alignment light path

假设光束调整的两个运动维度之间相互独立，文献[9]建立了光束对准系统迭代调整的数学模型，并证明了此调整方法的收敛性。但在实际操作过程中发现保证以上条件的情况下并不能很好地保证系统的收敛性，说明光束调整的两个运动维度之间并不完全独立，存在相互耦合，即一个维度的独立运动会作用于另一维度，影响了系统的收敛性能。为此，有必要对系统的收敛条件做更为严格的限制，并对系统微动电机与解耦平面两个维度之间的耦合程度进行分析与约束。

建立存在耦合时的光束迭代调整系统的数学模型。首先假设位置解耦平面上的光束位置与理想位置之

间的距离为  $s_0$ , 角度解耦平面上的光束角度与理想角度之间的偏差为  $\theta_0$ 。由于存在耦合作用, 反射镜  $M_1$  与  $M_2$  转动  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  后, 使解耦平面上输出光线位置与角度产生  $\Delta s$  与  $\Delta\theta$  的偏移:

$$\begin{pmatrix} \Delta s \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix}$  为传输矩阵。系统每次调整迭代过程包括对光束位置的调整(a)和角度的调整(b), 具体步骤如下。

第 1 次迭代:

1) 光束位置准直, 驱动  $M_1$  使光束位置变为 0:

$$\begin{pmatrix} s_{1a} \\ \theta_{1a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1^{1a} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_0 - \frac{as_0}{D_1} \end{pmatrix}; \quad (4)$$

2) 光束角度准直, 驱动  $M_2$  使光束角度变为 0:

$$\begin{pmatrix} s_{1b} \\ \theta_{1b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_2^{1b} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{1a} \\ \theta_{1a} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D_2}{b} \left( \frac{as_0}{D_1} - \theta_0 \right) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

第 2 次迭代:

1) 光束位置准直, 再次驱动  $M_1$  使光束位置变为 0:

$$\begin{pmatrix} s_{2a} \\ \theta_{2a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1^{2a} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{1b} \\ \theta_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{aD_2}{bD_1} \left( \theta_0 - \frac{as_0}{D_1} \right) \end{bmatrix}; \quad (6)$$

2) 光束角度准直, 再次驱动  $M_2$  使光束角度变为 0:

$$\begin{pmatrix} s_{2b} \\ \theta_{2b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_2^{2b} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{2a} \\ \theta_{2a} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{aD_2^2}{b^2D_1} \left( \frac{as_0}{D_1} - \theta_0 \right) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

.....

第  $n$  次迭代:

1) 光束位置准直, 再次驱动  $M_1$  使光束位置变为 0:

$$\begin{pmatrix} s_{na} \\ \theta_{na} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1^{na} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{(n-1)b} \\ \theta_{(n-1)b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \left( \frac{aD_2}{bD_1} \right)^{n-1} \left( \theta_0 - \frac{as_0}{D_1} \right) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

2) 光束角度准直, 再次驱动  $M_2$  使光束角度变为 0:

$$\begin{pmatrix} s_{nb} \\ \theta_{nb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_2^{nb} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_{na} \\ \theta_{na} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{aD_2}{bD_1} \right)^{n-1} \frac{D_2}{b} \left( \frac{as_0}{D_1} - \theta_0 \right) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

根据以上递归表达式可以看出系统保持收敛的条件是  $aD_2 < bD_1$ , 为此在光路设计与装调时需要保证传输矩阵满足以上条件。当  $D_1 = L_1, D_2 = L_2, a = b = 1$  时,  $L_2 < L_1$ , 即为文献[9]所分析情况。

以上对准方法的收敛速度取决于  $aD_2$  与  $bD_1$  的比值, 比值越小收敛越快。令  $r = aD_2/bD_1$ , 再定义  $R$  为理想位置误差与初始光束位置误差的比值, 可得到调整迭代次数为

$$n \approx \log_r R. \quad (10)$$

当  $r = 0.5$  时, 期望光束对准误差控制在  $10 \mu\text{m}$  之内, 初始位置误差为  $0.5 \text{ mm}$ , 可计算出迭代调整次数  $n$  约为 6 次; 当  $r = 0.7$  时, 迭代次数增长为 11 次, 收敛速度减慢。

## 4 装调误差对系统的影响

### 4.1 装调误差对系统的影响分析

在光束对准系统中,期望微动电机  $x, y$  方向上的运动只对解耦平面上对应的维度产生作用,两个维度之间互不干扰。但是在实际装调过程中,解耦平面  $x, y$  方向与微动电机的运动方向之间不可避免地存在装调误差,这样会使系统  $x, y$  方向之间存在相互耦合。根据第 3 节分析,系统在  $x, y$  方向上的耦合对系统的收敛性能以及收敛速率都会产生重要影响,为此有必要分析装调误差对系统的影响。反射镜对光束对准调节关系可以简化为图 4 所示的光路模型,图 4(a)为光束调整的平面模型,图 4(b)为光束调整的空间模型。

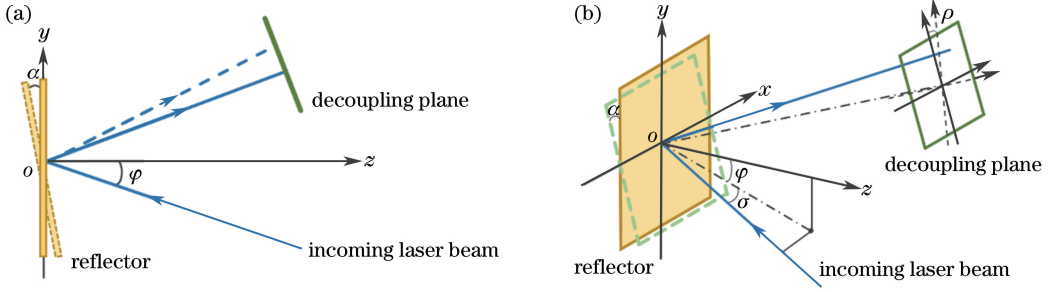


图 4 光束对准调节模型示意图。(a)平面调节模型;(b)存在装调误差下的空间调节模型

Fig. 4 Model diagram of beam alignment. (a) Planar beam alignment model; (b) spatial beam alignment model with assembly errors

根据参考文献[10-11],空间中的反射面可以抽象为一个平面,其表达式为

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (11)$$

式中  $A, B, C, D$  为系数。对应的反射传输矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 - 2A^2/F^2 & -2AB/F^2 & -2AC/F^2 \\ -2AB/F^2 & 1 - 2B^2/F^2 & -2BC/F^2 \\ -2AC/F^2 & -2BC/F^2 & 1 - 2C^2/F^2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式中  $F = (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}$ ,  $(A/F, B/F, C/F)$  为平面的法向量。

如图 4 所示,初始状态时反射镜平面位于  $xoy$  平面上,偏摆镜法线向量为  $r_0(0, 0, 1)$ ,对应的反射传输矩阵为

$$\mathbf{R}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

当反射镜绕  $x$  轴转动  $\alpha$  后,偏摆镜法线向量变为  $r_m(0, \sin \alpha, \cos \alpha)$ ,对应的反射传输矩阵为

$$\mathbf{R}_M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\alpha) & -\sin(2\alpha) \\ 0 & -\sin(2\alpha) & -\cos(2\alpha) \end{pmatrix}. \quad (14)$$

当光线以一定角度入射到反射镜上,设定光线与  $yoz$  平面的夹角为  $\sigma$ ,光线在  $yoz$  平面上的投影与  $z$  轴夹角为  $\varphi$ ,此时入射光线方向向量可表示为  $\mathbf{p}(\sin \sigma, \cos \sigma \sin \varphi, -\cos \sigma \cos \varphi)$ 。理想情况下,  $\sigma = 0$  表示反射镜平面与光束平面垂直,即图 4(a)所示情况。

反射光线的方向向量  $\mathbf{q}$  为反射镜传输矩阵  $\mathbf{R}$  与入射光线方向向量  $\mathbf{p}$  的乘积,反射镜距解耦平面中心的距离为  $L$ ,可得反射镜转动  $\alpha$  后反射光线在解耦平面上移动向量为

$$\Delta \mathbf{q} = (\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_0)L = \mathbf{p}(\mathbf{R}_M - \mathbf{R}_0)L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 \sin^2 \alpha & -\sin(2\alpha) \\ 0 & -\sin(2\alpha) & 2 \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \sigma \\ \cos \sigma \sin \varphi \\ -\cos \sigma \cos \varphi \end{bmatrix} L. \quad (15)$$

在光束对准过程中,微动电机对反射镜的调整量为毫弧度或微弧度量级,为此转动角度  $\alpha$  可以看作一个高阶小量,忽略高阶小量,(15)式可化简为

$$\Delta \mathbf{q} = 2\alpha L \cos \sigma \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (16)$$

假设实际 PSD 的解耦平面与理想解耦平面之间的装调误差角为  $\rho$ , 如图 4(b) 所示。此时解耦平面上  $x, y$  方向向量为  $\mathbf{r}_x(\cos \rho, -\sin \rho \sin \varphi, \sin \rho \cos \varphi), \mathbf{r}_y(\sin \rho, \cos \rho \sin \varphi, -\cos \rho \cos \varphi)$ 。当偏摆镜绕其  $x$  方向转动  $\alpha$  后反射光线在解耦平面上产生的移动量为

$$D_1 = s_y = \Delta \mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_y = -2\alpha L \cos \sigma \cos \rho. \quad (17)$$

同理可得偏摆镜绕其  $y$  方向转动后反射光线在解耦平面上产生的移动量。通过以上分析可以看出, 反射镜与解耦平面之间存在的装调误差会引入光线运动的调整量中, 从而影响对准算法的传输矩阵, 使得光束的对准调整性能受到影响。

#### 4.2 数值模拟

对存在装调误差条件下的光束对准情况进行模拟, 设光束初始位置与目标点位置偏离  $s_0 = 200 \mu\text{m}$ , 角度偏离  $\theta_0 = 200 \mu\text{rad}$ ; 同时假设仅有反射镜  $M_1$  与位置 PSD 之间装调误差  $\rho_1 = 5^\circ$ , 光束以一定夹角  $\sigma_1 = 25^\circ$  入射至反射镜上, 则(3)式中的传输矩阵变为

$$\begin{pmatrix} D_1 & D_2 \\ a & b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \sigma_1 \cos \rho_1 L_1 & L_2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

分别模拟  $L_2/L_1 = 0.95, 0.9, 0.8$  时光束对准系统调整 20 步时光束位置与角度的对准情况, 如图 5 所示。

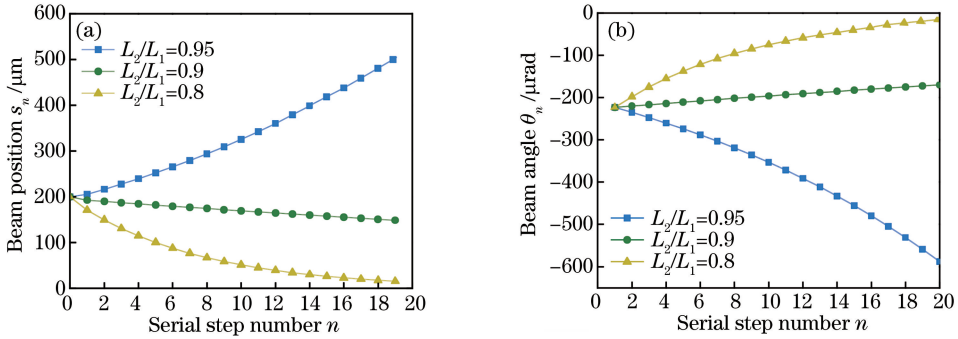


图 5 存在装调误差时光束对准系统调整 20 步过程中光束位置与角度的对准情况。

(a) 光束位置调整情况; (b) 光束角度调整情况

Fig. 5 Beam position and angle alignment during 20-steps adjustment of the beam alignment system in the presence of assembly error. (a) Beam position adjustment; (b) beam angle adjustment

从图 5 可以看出, 当  $L_2/L_1 = 0.8$  时,  $\cos \sigma_1 \cos \rho_1 < L_2/L_1$ , 光束对准系统在 20 步迭代内表现出良好的收敛性, 光束位置与角度较为快速地收敛到目标位置; 当  $L_2/L_1 = 0.9$  时,  $\cos \sigma_1 \cos \rho_1$  与  $L_2/L_1$  数值相当, 对准系统难以表现出正常的收敛性, 在实际中极易出现振荡; 当  $L_2/L_1 = 0.95$  时,  $\cos \sigma_1 \cos \rho_1 > L_2/L_1$ , 系统不满足收敛条件, 系统调节表现出发散性, 无法将光束位置与角度调整至理想位置。

以上分析表明  $L_2/L_1$  越小系统收敛性能越好, 但在实际应用中  $M_2$  与解耦平面之间存在空间滤波器, 所以  $L_2$  并不可能无限减小, 在光路设计时应当合理设计反射镜、空间滤波器与解耦平面的位置, 以保证对准系统良好的收敛性能。

## 5 实验验证

在扫描干涉场曝光系统中搭建了光束自动对准系统, 对准系统的二维微动电机采用 Newfocus 公司的 Picomotor8816 用以驱动反射镜, PSD 为 Newport 公司 OBP-U-9L, 用以测量光束姿态。在光路设计初始, 为了使光路紧凑, 两个微动电机放置的距离较近,  $L_2/L_1$  约为 0.9, 此时对光束进行对准调节, 调整目标点为 0, 结果如图 6 所示。

图 6 中横坐标表示调整步数, 纵坐标表示光束位置与角度信息 ( $x$  方向), 从图中可以看出光束位置调整

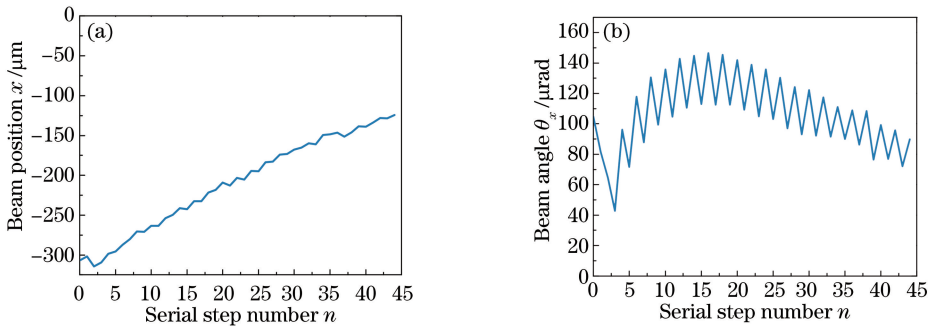


图 6  $L_2/L_1=0.9$  时光束位置与角度对准情况。(a) 光束位置调整情况; (b) 光束角度调整情况

Fig. 6 Beam position and angle alignment when  $L_2/L_1$  is 0.9. (a) Beam position adjustment; (b) beam angle adjustment

呈现出收敛趋势,但调整速度很慢;光束角度调整出现了一定程度的振荡,但也有收敛趋势,收敛速度同样较慢。整体来说,由于光路的  $L_2/L_1$  设计值较大,光路难以表现出良好的收敛性能。

根据第 2、3 节的分析,将  $L_2$  调节至更靠近解耦平面的位置,即  $L_2/L_1$  减小至 0.6 左右,此时对光束进行对准调节,调整目标点为 0,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,此时光束角度与位置的对准调整都表现出明显的收敛趋势,收敛速度较快,在 20 步对准调整后,光束位置对准精度优于  $20 \mu\text{m}$ ,光束角度对准精度优于  $10 \mu\text{rad}$ ,表明系统可以迅速地对曝光光束进行对准调整。

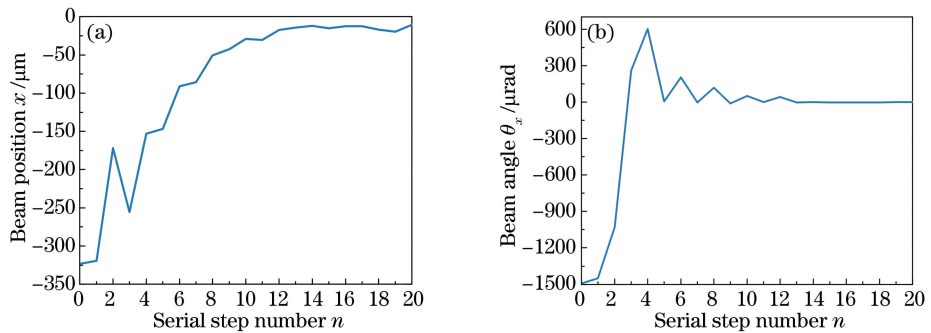


图 7  $L_2/L_1=0.6$  时光束位置与角度对准情况。(a) 光束位置调整情况; (b) 光束角度调整情况

Fig. 7 Beam position and angle alignment when  $L_2/L_1$  is 0.6. (a) Beam position adjustment; (b) beam angle adjustment

## 6 结 论

对扫描干涉场曝光光束自动对准系统进行了研究,建立了光束对准过程中光束调整的两个运动维度之间存在耦合时的迭代对准数学模型,给出了存在耦合情况下的光束迭代收敛条件,分析了光路中反射镜与解耦平面之间存在的装调误差对系统收敛性能、收敛速度的影响,并对存在装调误差情况下的对准光路进行了实验验证,得到以下结论:1) 光束调整的两个运动维度之间存在相互耦合时,光束迭代算法保持收敛的条件是  $aD_2 < bD_1$ ,为此在光路设计与装调时需要保证传输矩阵满足条件;2) 装调误差会降低对准系统性能,甚至导致对准算法发散,在光路设计时合理设定  $L_2/L_1$  可以使系统的收敛性能满足要求;3) 实验验证表明,适当的  $L_2/L_1$  设计值可以优化曝光光束对准系统的性能,也证明以上分析可为光束对准系统以及整个曝光光路的设计提供理论指导。

## 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 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.
- 4 He Kai, Liu Shijie, Hou Yongqiang, *et al.* Broadband and high resolution spectral measurement technique for pulse compression gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1005002.  
何 凯, 刘世杰, 侯永强, 等. 用于脉冲压缩光栅的宽带高分辨率光谱测量技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1005002.
- 5 Yu B, Jia W, Zhou C H, *et al.* Grating imaging scanning lithography[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(8): 080501.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Chen C G, Heilmann R K, Joo C, *et al.* Beam alignment for scanning beam interference lithography[J]. *Vacuum Science & Technology B*, 2002, 20 (6): 3071-3074.
- 10 Beggs J S. Mirror-image kinematics[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1960, 50(12): 1517-1518.
- 11 Zhu F, Tan J, Cui J. Common-path design criteria for laser datum based measurement of small angle deviations and laser autocollimation method in compliance with the criteria with high accuracy and stability[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 11391-11403.